

Der Stationenpark der Imaginata

Text und Abbildungen:

Christina Walther

Fotos:

Christian Neumann (S. 81)

Karoline Schuch (S. 175)

Christina Walther

*Imaginatio facit casum *)*

Unsere Empfehlung zum Umgang mit den
Imaginata-Stationen ist kurz:
Nimm dir Zeit!
Benutze alle Sinne.
Richte deine Aufmerksamkeit auf zweierlei:
Auf die Station und dich selbst.

*Wer ein Handbuch
liest, erwartet
Anleitung.*

Mach aus deinen Wahrnehmungen, aus
dem Staunen oder aus der Irritation Fragen
an die Station. Auch im Handbuch findest
du kurze Fragen und
Experimentieranweisungen zu den
Stationen.
Probier es aus – vielleicht findest du ja
selbst oder im Gespräch mit anderen
Antworten?

*Wer ein Handbuch
liest, hat Fragen.*

Deine Überlegungen oder die Erklärungen,
die das Handbuch anbietet, bewirken im
besten Fall zweierlei: Sie beantworten
deine Fragen, und sie werfen neue auf.

*Wer ein Handbuch
liest, erwartet
Erklärungen.*

*) imaginatio: Vorstellungskraft, Einbildung
 facit: von facere: machen, leiten, tun
 casum: von casus: Fall, Begebenheit, Abenteuer

Provokationen.....	5
Möbiusbahn.....	7
Mal Spirale.....	9
Turm von Hanoi.....	13
Kleine Baumeister.....	17
Leonardos Brücke.....	21
Begehrbarer Bogen.....	23
Reuleaux-Räder.....	25
Das Oloid.....	27
Hörspiegelstrecke.....	29
Tuschelmuschel.....	31
Hör-Spirale.....	33
Spiegelzeichner.....	35
Schwebespiegel.....	37
Kopftausch-Fenster.....	39
Geheimbotschaften.....	41
Ich bin drei!.....	43
Meeresrauschen.....	45
Schwärzer als Schwarz.....	47
Black Box.....	49
Tastatour.....	51
Lichtlose Küche.....	53
Licht-Labyrinth.....	55
Holzknoten.....	56
Magnetische Kugelrollbahn.....	56
Kreuz.wort.weise.....	56
Klangtor.....	56
Sinneswandel.....	57
Farben? Blind!.....	59
Farbige Schatten.....	61
Schwarzlicht-Kabinett.....	63
Lebensräder.....	65
Wundertrommel.....	67
Pulfrich-Pendel.....	69
Drehscheiben.....	71
Drehscheibe ´Spirale´.....	73
Haus der Riesenzwerge.....	75
Moiré Effekt.....	77
Hörbar.....	79
Dauerwelle.....	81
„Haste Töne“– Monochord.....	83
„Haste Töne“– Gewichtsmonochord.....	85
„Haste Töne“– Orgel.....	87
Klangmikroskop.....	89
Hör-Lampe/Hörspiegel-Ohren.....	91
Summsteine.....	93
Stereo-Sound.....	95

Tastbar	97
Balance Bretter.....	99
Seekrank.....	101
Das Schiefe Haus von Jena	103
Linsen und Spiegel.....	105
Planspiegel	107
Seitenrichtiger Spiegel	109
Tripel-Spiegel	113
Rotierende Spiegel	115
Spiegelbuch	117
Spiegeltunnel.....	119
Spiegel-Allee	121
Partner-Kaleidoskop.....	123
Pyramiden-Kaleidoskop.....	125
Begehbare Kaleidoskop.....	127
Spiegelwürfel	129
Sechzehnfaches Spiegelbild	131
Kugelspiegel	133
Wölbspiegel	135
Begehbare Lochkamera.....	137
Große Kamera.....	139
Historische Reproduktionskamera	143
Fresnel-Linse.....	145
Prinzipien	147
Balancier-Besen	149
Knall und Fall.....	151
Die Macht der Dominosteine.....	153
Balance-Stäbe.....	155
Hochseilrad	157
Die ungehorsame Garnrolle	159
VIP-Schaukel	161
Kugelwettlauf	163
Zweifach-Rollbahn.....	165
Dosenwettlauf	167
Mara-Ton	169
Sandfiguren-Pendel	171
Chaos-Pendel	173
Klick-Klack	175
Drehstuhl.....	177
Pirouetten-Maschine.....	179
Coriolis' Karussell	181
Schwebende Kugel.....	183
Wirbelkanone.....	185
Hand-Batterie	187
Waltenhofensches Pendel	189
Plasmakugel	191

Provokationen

Erstaunen, Unsicherheit, Gelächter. Wie fühlt man sich, wenn man drei Jahre alt ist und an einem viel zu großen Tisch die Ellenbogen nicht aufstützen darf? Wenn das Gewohnte in Frage gestellt wird, beginnt das Nachdenken.

Anfänglich einfache Aufgaben – einen Turm umsetzen, Holzklötze stapeln – faszinieren uns und werfen Fragen auf. Sie fordern uns heraus zur Suche nach Antworten, Strukturen, Regeln und Lösungen.

Wenn wir uns durch Unerwartetes und Unbekanntes provozieren lassen, machen wir neue Erfahrungen und bilden neue Vorstellungen – wir lernen.

Möbiusbahn

Außengelände

Ein runder Schienenstrang –
doch ist die Bahn, die darauf fährt, nach einer Runde wieder in der Startposition?



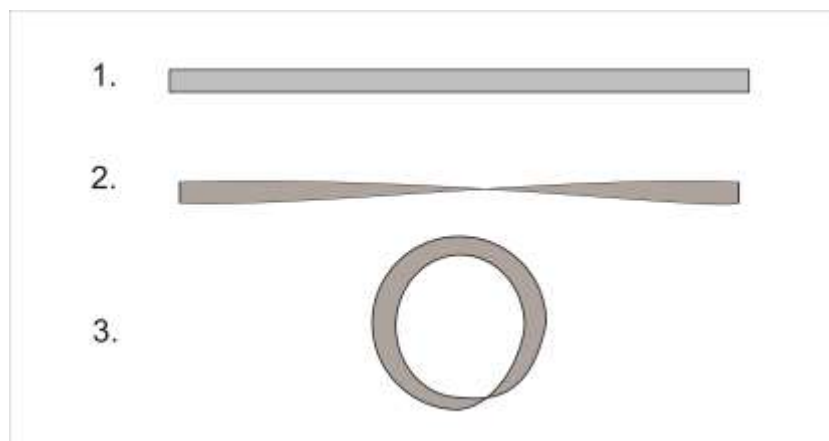
- Wie viele Schienenstränge hat die Bahn?
- In welcher Position würdest du nach einer Runde ankommen, wenn der Wagen nicht schwenkbar wäre?

Das Edelstahlprofil der Möbiusbahn hat an jeder Stelle eine andere Neigung, die sich vor dem Bau nicht ohne Weiteres berechnen ließ. So wurde zunächst ein 1:1-Modell aus Holz gebaut, um die korrekten Maße für die Herstellung der Schienen zu nehmen.

Wenn Besucher gefragt werden, wie viele Schienen die Möbiusbahn hat, so sind sie auf den ersten Blick schnell geneigt, zwei Schienen zu sehen, auf denen der Wagen fährt. Nimm dir Zeit, die Bahn gründlich anzuschauen: Bei der Möbiusbahn handelt es sich tatsächlich um einen einzelnen Schienenstrang, der paradoxerweise zu sich selbst parallel verläuft. Fährt nun eine Person auf der Möbiusbahn, so kommt sie entgegen der ursprünglichen Blickrichtung wieder an – die Frage, ob jemand lieber in Fahrtrichtung oder entgegengesetzt fährt, erübrigt sich also bei dieser Bahn.

Der Leipziger Mathematiker und Astronom August Ferdinand Möbius (1790–1868) veröffentlichte 1765 die Beschreibung einer „einseitigen Fläche“. Diese später „Möbius-Band“ genannte Figur ist die mathematische Inspiration für unsere Bahn.

So ein Möbius-Band ist recht einfach gemacht: Du verdrehst ein Ende eines Papierstreifens um 180° und klebst anschließend beide Enden zusammen (Wenn du die Enden des Papierstreifens ohne Drehung miteinander verklebst, erhältst du einen Papierring).

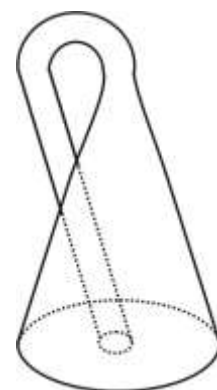


Das Möbius-Band hat einige Besonderheiten, die du bei genauerer Betrachtung selbst entdecken kannst. Fährst du mit dem Finger an der Kante des Möbiusbandes entlang, so stellst du fest, dass es nur eine in sich geschlossene Kante gibt; sie entspricht dem Schienenstrang unserer Möbiusbahn. Ein Papierring hingegen hat zwei Kanten und zwei voneinander verschiedene Flächen, nämlich eine Innen- und eine Außenseite (In der Mathematik nennt man solche Objekte „orientierbar“).

Die Fläche des Möbiusbandes ist in sich geschlossen, es gibt keine Vorder- und Rückseite (die Fläche ist „nichtorientierbar“), statt dessen kannst du mit deinem Finger nach zwei Umrundungen die komplette Fläche des Bandes abfahren – ebenso wie nach zwei Runden der Wagen der Möbiusbahn wieder in der ursprünglichen Position ist.

Das Möbiusband birgt weitere Überraschungen. Was z.B. passiert, wenn man es entlang der Mittellinie aufschneidet oder es drittelt, probierst du am besten selbst aus.

Auch andere „nichtorientierbare Mannigfaltigkeiten“ haben interessante Eigenschaften: Die „Boysche Fläche“ ist eine geschlossene Fläche ohne „innen und außen“. Etwas anschaulicher ist die „Kleinsche Flasche“, ein befüllbarer Hohlkörper mit einer in sich geschlossenen Oberfläche



Mal Spirale

110 kV-Halle

Welche Muster entstehen, wenn die Scheibe sich dreht und du darauf malst?
Kannst du auch gerade Linien malen?



- Überlege, bevor du beginnst, wie die Muster wohl aussehen könnten.
- Bewege die Kreide gleichmäßig von innen nach außen, während die Scheibe sich dreht.
- Zeichne kleine Kreise, während die Scheibe sich dreht.
- Versuche, eine gerade Linie auf die sich drehende Scheibe zu zeichnen.

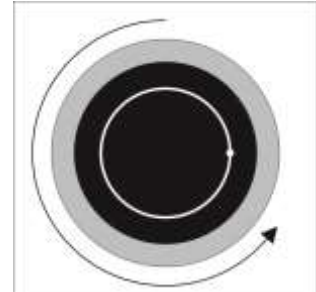
Bei dem von Denys Fischer entwickelten Spirographen entstehen wie bei der Malspirale mandalaähnliche Muster.

Bei der Malspirale zeichnest du mit Kreide auf einen sich drehenden Untergrund. Die dabei entstehenden Bögen, Schleifen und Spiralen ergeben sich aus der Kombination zweier Bewegungen: zum einen dreht sich die Zeichenfläche, zum anderen bewegst du die Kreide.

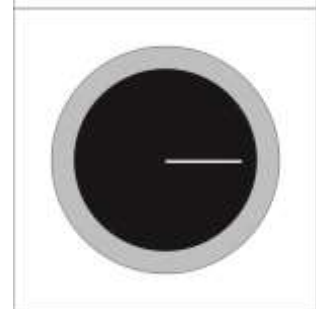
Nach welchen Regeln entstehen die Muster auf der Malspirale?

Vielen fällt es schwer, sich das Resultat zweier gleichzeitig stattfindender Bewegungen vorzustellen, und so sollten wir zunächst die einzelnen Bewegungen betrachten:

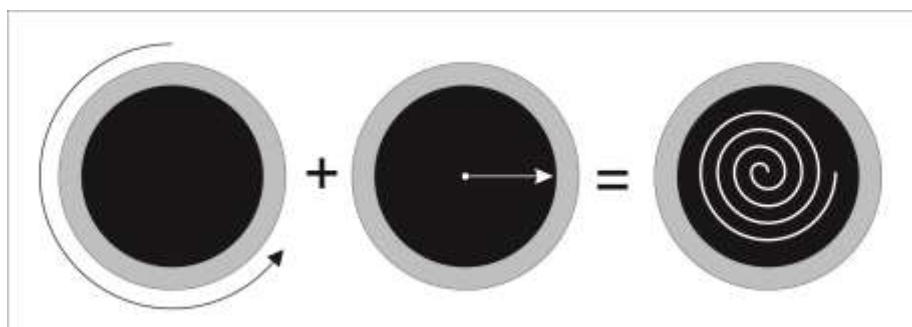
Die einfachste Möglichkeit ist, die Kreide auf die sich drehende Tafel aufzusetzen und ruhig zu halten. So entsteht ein Kreis.



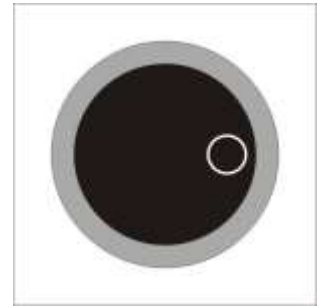
Ebenso einfach ist es, wenn die Tafel unbewegt bleibt und mit der Kreide ein Strich nach außen gezogen wird.



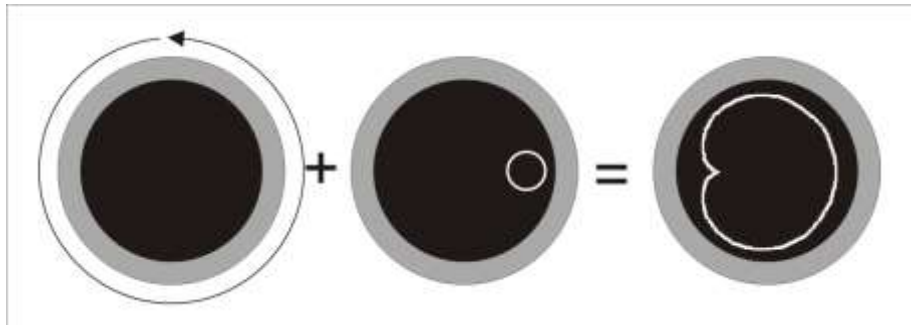
Doch wie sieht die Kombination beider Bewegungen – drehende Tafel und nach außen gezogene Kreide – aus? Je nachdem wie schnell du die Kreide ziehst und wie schnell sich die Tafel dreht, werden recht unterschiedliche Figuren entstehen, die aber immer asymmetrisch sind. Mit einiger Übung, und wenn du die Kreide langsamer werdend nach außen ziehst, gelangen dir schließlich schöne Spiralen.



Was passiert, wenn du einen Kreis statt eines Strichs auf die sich drehende Tafel malst?



Bei genau einem gezeichneten Kreis je Tafelumdrehung entsteht eine „apfelartige“ Kurve.



Zeichnest du mehrere Kreise, während die Tafel sich dreht, erscheinen herz- oder blumenförmige Figuren, die umso mehr Blütenblätter haben, je schneller du die Kreise zeichnest. Solche Muster, die aus der Kombination zweier Kreisbewegungen entstehen, werden Epizykloiden genannt. Du wirst vielleicht feststellen, dass es sehr schwierig ist, symmetrische Figuren zu zeichnen. Dies gelingt dir nur, wenn du während einer Tafelumdrehung genau einen, zwei (oder eine andere ganzzahlige Anzahl) Kreise zeichnest.

Epizykloiden werden aufgrund ihrer mathematischen Eleganz auch als „Helena der Geometer“ bezeichnet; dennoch war und ist die Betrachtung und Berechnung solcher Rollkurven mehr als nur ästhetischer Zeitvertreib. Astronomen von der Antike bis zur Neuzeit versuchten, die sichtbare Planetenbewegung als die Kombination zweier Kreisbewegungen zu beschreiben. Durch diese „Epizykeltheorie“ wurden in einem geozentrischen Weltbild die scheinbaren Schleifenbahnen der Planeten erklärt. Heute noch werden z.B. Komplikationen in mechanischen Uhrwerken mittels der Berechnung von Epizyklen konstruiert.

Eine andere Eigenschaft von Zykloiden begegnet dir bei der Station „Zweifachrollbahn“.

Turm von Hanoi

110 kV-Halle

Eine Reihe runder Scheiben unterschiedlicher Größe sollen von einem Stab auf einen der beiden anderen versetzt werden. Dabei gelten folgende Regeln:

- In jedem Zug darf nur eine einzige Scheibe umgesetzt werden.
- Es darf nie eine größere Scheibe auf eine kleinere gelegt werden.



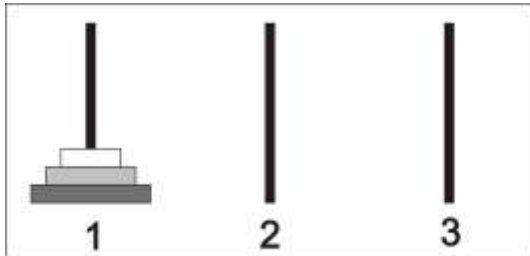
- Probier zunächst, nur 3 Scheiben umzusetzen! Wie viele Züge sind mindestens dafür nötig?
- Wenn du die „3-Scheiben-Aufgabe“ erfolgreich gelöst hast, nimm weitere Scheiben hinzu!
- Findest du die „3-Scheiben Aufgabe“ wieder?
- Zähl die Schritte, die du benötigst!

Das Spiel ist auch unter dem Titel „Turm des Brahma“ oder „Weltende Puzzle“ bekannt und wurde erstmals von dem französischen Mathematiker Édouard Lucas (1842-1891) beschrieben.

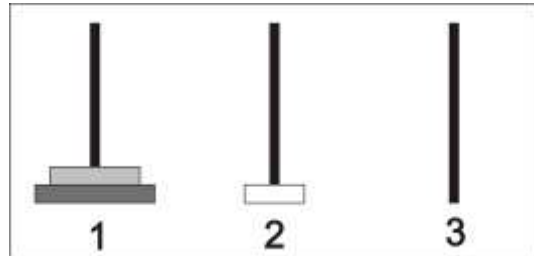
Vielleicht hast du dich beim Probieren gefragt, ob es eine gute Strategie für dieses Spiel gibt und bist dabei auf folgende Frage gestoßen:

Wie viele Züge sind mindestens nötig, um einen Turm von einem Stab auf den anderen zu setzen?

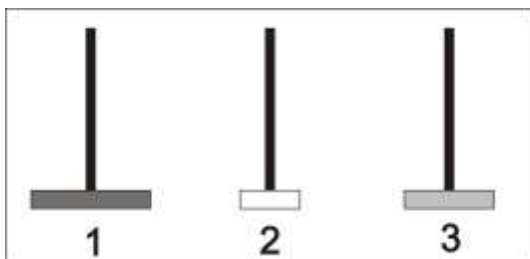
Wenn du mit drei Scheiben beginnst, werden mindestens sieben Züge benötigt, wobei ein Stab „Zwischenstation“ für zwei Scheiben ist.



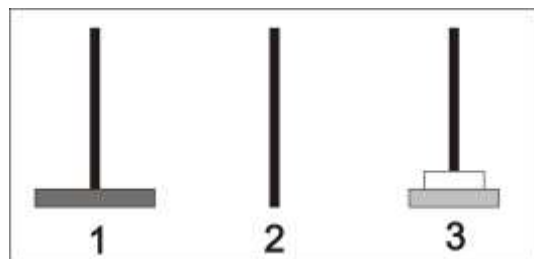
Anfang



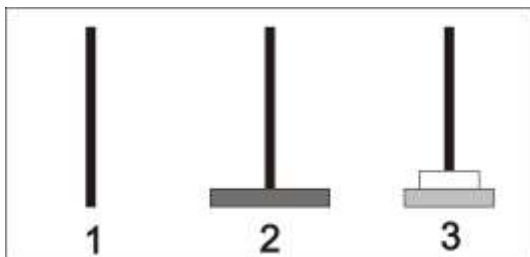
Schritt 1



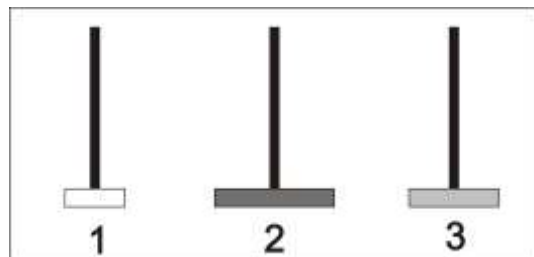
Schritt 2



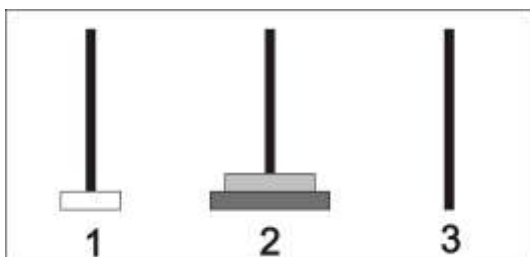
Schritt 3



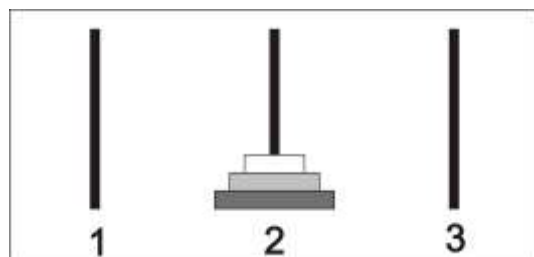
Schritt 4



Schritt 5



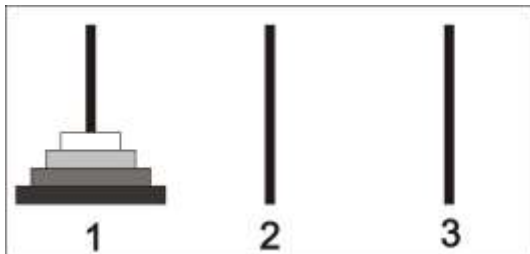
Schritt 6



Schritt 7

Um nun einen Turm mit vier Scheiben von Stab 1 auf Stab 2 zu versetzen, müssen zunächst drei Scheiben auf Stab 3 versetzt werden (Schritt 7). Dann wird die Scheibe 4 auf Stab 2 gesetzt (Schritt 8). Zum Schluss müssen die drei Scheiben noch von Stab 3 auf Stab 2 gesetzt werden (Schritt 15). Du findest hier also zweimal die „3-Scheiben-Aufgabe“ wieder.

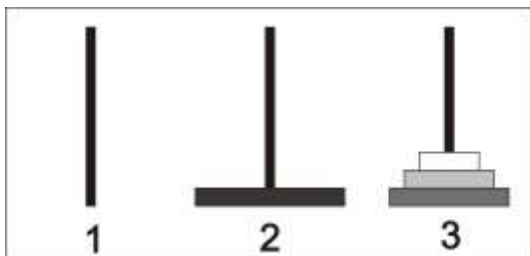
Für die „3-Scheiben-Aufgabe“ waren 7 Schritte notwendig. 1 Schritt ist für das Versetzen der Scheibe 4 nötig; somit werden für vier Scheiben insgesamt 15 ($2 \times 7 + 1$) Schritte benötigt.



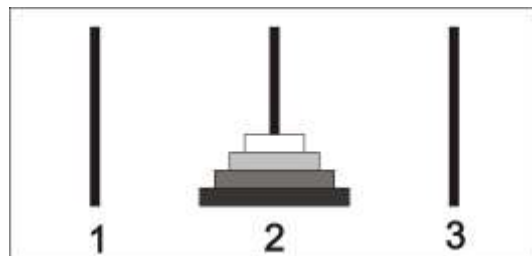
Anfang...



...Schritt 7



Schritt 8...



...Schritt 15

Nimmst du 5 Scheiben, so muss der 4-er Turm zweimal umgesetzt werden und ein Schritt ist noch für das Versetzen der großen Scheibe nötig.

Für jede weitere Scheibe lässt sich also Folgendes verallgemeinern: Fügt man eine weitere Scheibe hinzu, so sind doppelt so viele Schritte wie vorher und ein weiterer zum Umsetzen der größten Scheibe nötig.

Scheibenanzahl	Schritte		Zweierpotenz
2	3	3	$2^2 = 4$
3	$2 \times 3 + 1$	7	$2^3 = 8$
4	$2 \times 7 + 1$	15	$2^4 = 16$
5	$2 \times 15 + 1$	31	$2^5 = 32$
6	$2 \times 31 + 1$	63	$2^6 = 64$
7	$2 \times 63 + 1$	127	$2^7 = 128$
8	$2 \times 127 + 1$	255	$2^8 = 256$
9	$2 \times 255 + 1$	511	$2^9 = 512$
10	$2 \times 511 + 1$	1023	$2^{10} = 1024$

Vergleicht man die Anzahl der nötigen Schritte mit den Zweierpotenzen der Scheibenanzahl, so ist folgender allgemeiner Zusammenhang zu erkennen:

$$S = 2^n - 1$$

wobei S die Anzahl der Schritte und n die Scheibenanzahl ist.

Kleine Baumeister

110 kV-Halle

Versuche die Bauklötze so aufzuschichten, dass sie möglichst weit überstehen. Kann der oberste Klotz wohl so weit überstehen, dass er ganz über den untersten hinausragt?



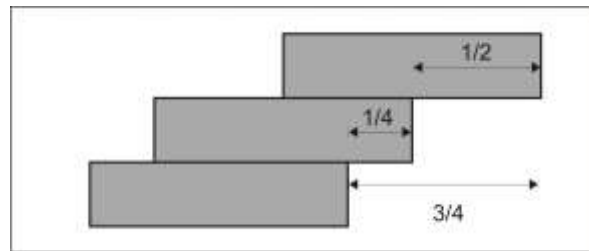
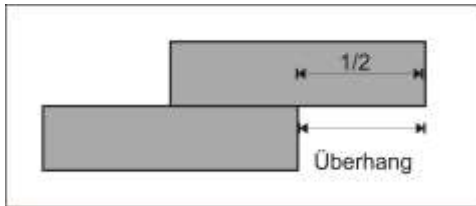
- Beginne mit zwei Klötzen:
Wie weit kann der obere Klotz höchstens überstehen?
- Was passiert, wenn ein dritter Klotz draufgelegt wird?
- Was passiert, wenn ein dritter Klotz zwischen den ersten und den zweiten geschoben wird?
- Versuche den Turm von oben nach unten zu bauen!

Mögliche Lösungen für diese Aufgabe haben ausschließlich theoretischen bzw. spielerischen Wert; eine praktische Anwendung gibt es (bislang) nicht.

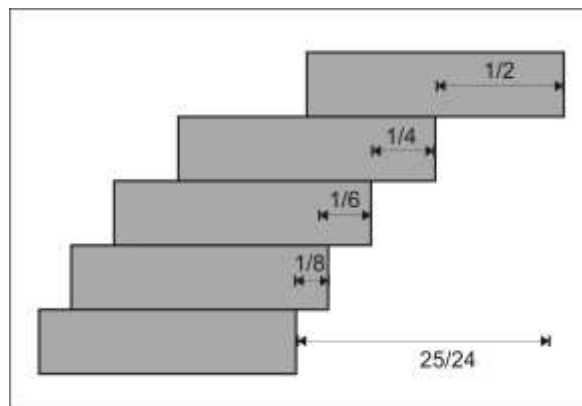
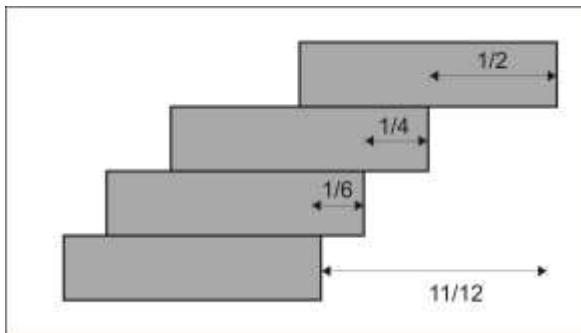
Die Suche nach der besten Lösung lässt sich in folgende Frage fassen:

Wie groß kann der Überhang, d.h. die Länge, die der oberste Klotz über den untersten herausragt, höchstens sein?

Für zwei Klötze ist die Frage durch einfaches Ausprobieren schnell gelöst: Der Überhang kann höchstens die Hälfte der Klotzlänge betragen. Legst du einen dritten Klotz oben drauf, so kann der Überhang nicht mehr größer werden, da sonst beide Klötze herunter fallen. Anders ist es, wenn der dritte Klotz unter den zweiten geschoben und zusammen mit ihm vorsichtig nach vorn bewegt wird: Der Überhang vergrößert sich um $\frac{1}{4} = \frac{1}{2} * \frac{1}{2}$ der Klotzlänge, so dass er nun insgesamt $\frac{3}{4} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}$ der Klotzlänge beträgt.



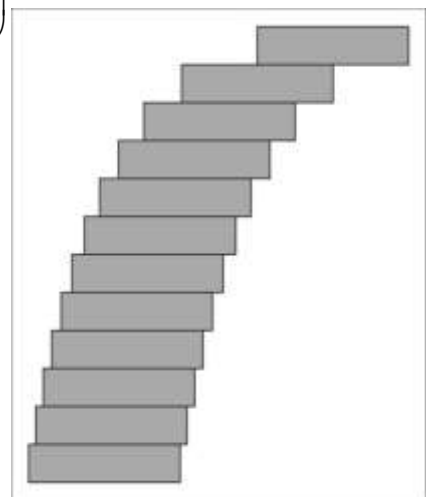
Den vierten Klotz solltest du nun ebenfalls nicht oben drauf legen, sondern unter den dritten schieben. Der Überhang vergrößert sich nur noch um $\frac{1}{6} = \frac{1}{2} * \frac{1}{3}$ und beträgt insgesamt $\frac{11}{12} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6}$ der Klotzlänge. Beim fünften Klotz vergrößert sich der Überhang lediglich um $\frac{1}{8} = \frac{1}{2} * \frac{1}{4}$, beträgt jedoch insgesamt $\frac{25}{24} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{8}$ und ist somit erstmals größer als 1. Für einen Überhang einer kompletten Klotzlänge musst du also mindestens vier Klötze auflegen.



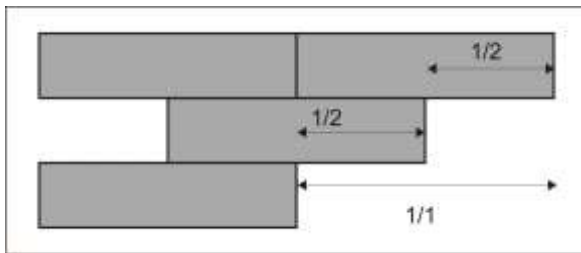
Verallgemeinern lässt sich dies zu folgendem Zusammenhang:

$$L = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{8} + \frac{1}{10} + \frac{1}{12} + \dots = \frac{1}{2} * \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \dots \right)$$

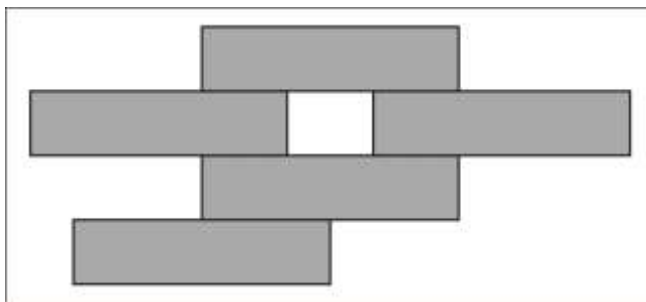
Du kannst in der Klammer die sogenannte harmonische Reihe erkennen. Je mehr Glieder sie hat – also je mehr Klötze du nimmst – umso größer wird sie und sie kann theoretisch beliebig groß werden, wächst allerdings immer langsamer. So sind, je größer der Überhang wird, immer mehr Klötzer nötig: Mit elf Klötzen ist der Überhang eineinhalbmal so lang wie die Klotzlänge. Für einen Überhang von zwei Klotzlängen sind 31 Klötze nötig; für einen Überhang von drei Klotzlängen gar 227 Klötze.



Größere Überhänge sind möglich, wenn die aufgestapelten Klötze mit Gegengewichten stabilisiert werden. Im einfachsten Fall wird der aufgelegte zweite Klotz mit zwei weiteren nebeneinander aufgelegten Steinen stabilisiert, so dass bereits mit drei aufgelegten Steinen ein Überhang von einer Klotzlänge möglich ist.



Legst du einen vierten Stein auf die nebeneinander liegenden Steine, so kannst du sie etwas hervorziehen, und einen noch größeren Überhang erreichen.

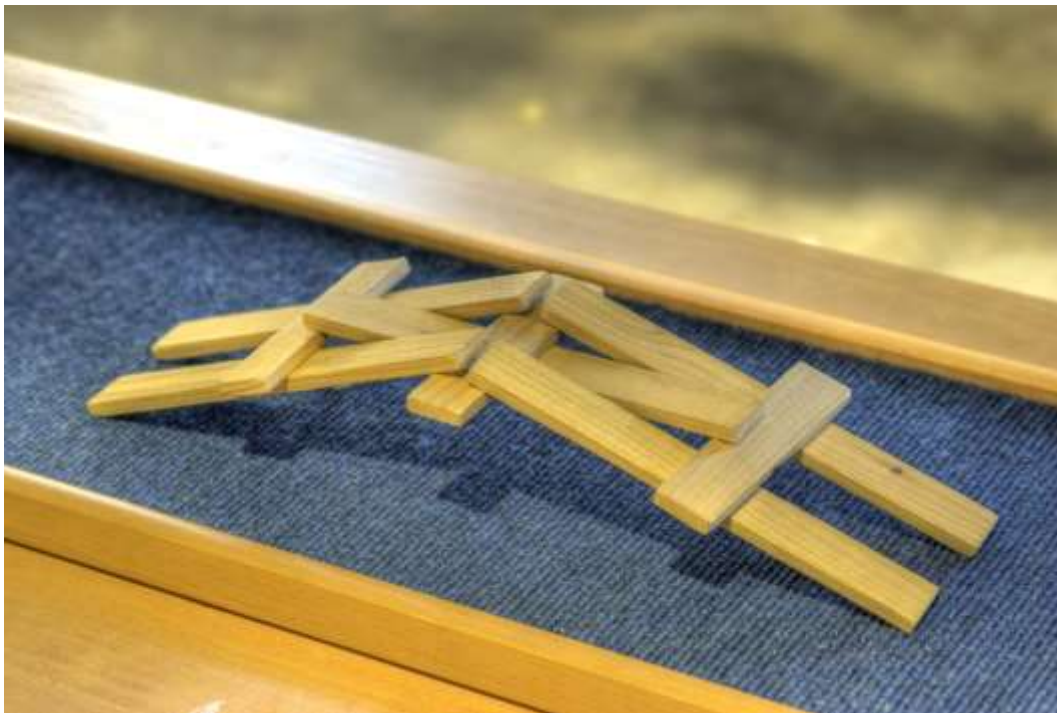


Gegengewichte und Lücken erlauben also wesentlich größere Überhänge als eine Konstruktion nach der Harmonischen Reihe. Wenn dir genügend Zeit, Geduld und Klötze zur Verfügung stehen, kannst du mit Lücken und Gegengewichten aus 921 Klötzen einen Turm mit einem Überhang von 10 Steinen konstruieren!

Leonardos Brücke

110 kV-Halle

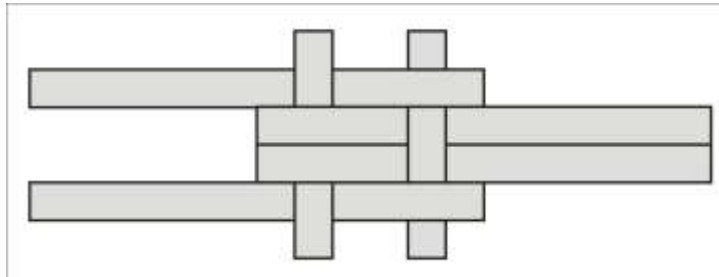
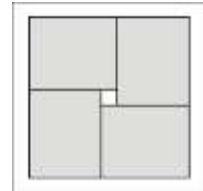
Wie kann man mit Brettern, die zu kurz sind, um von einem zum anderen Ufer zu reichen, einen Fluss überspannen? Ohne Werkzeug und sonstige Hilfsmittel soll eine tragende Brücke über das Wasser geschlagen werden.



- Bau eine Brücke aus sechs Brettern!
- Erweitere diese Brücke um jeweils vier Bretter!
- Wie groß kann deine Brücke werden?
- Gelingt es dir, eine Brücke aus genau acht Brettern zu konstruieren?
- Ist eine Erweiterung auch mit drei Brettern möglich?
- Welches Konstruktionselement haben alle Brücken gemeinsam?

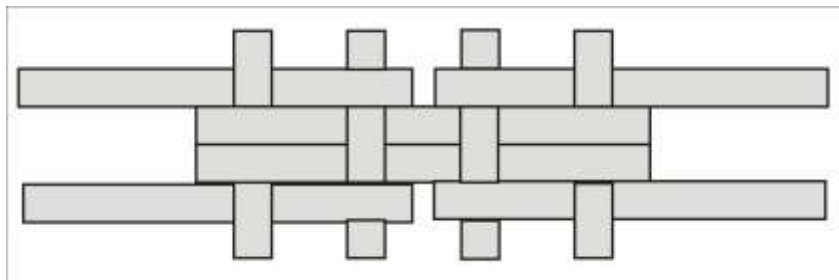
In einem Brief, mit dem er sich bei seinem späteren Dienstherren Ludovico da Sforza bewarb, schrieb Leonardo da Vinci: „...ich habe eine Anleitung zur Konstruktion sehr leichter und leicht transportabler Brücken, mit denen der Feind verfolgt und in die Flucht geschlagen werden kann, und für andere, festere Brücken, die Feuer und Kampfhandlungen standhalten und bequem gehoben und gesenkt werden können...“

Das grundlegende Konstruktionselement der Brücke ist dir vom Weihnachtspäckchen bekannt: Mit dem „Vierlaschenverschluss“ lassen sich Kartons einfach verschließen. In der einfachsten Brücke aus sechs Brettern ist das Muster gleich zweimal zu erkennen.



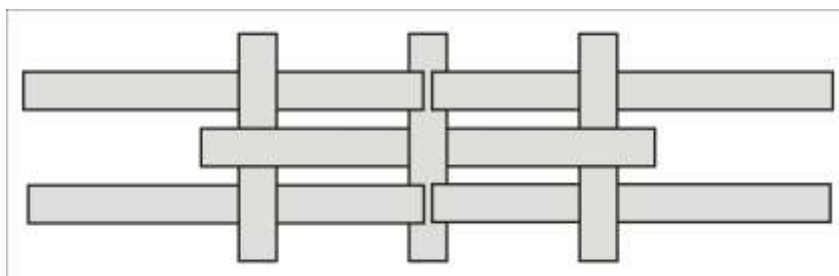
Je nachdem, wie weit du die Bretter auseinander ziehst, vergrößert sich die Baulänge (die Länge zwischen den Auflagepunkten) der Bretter. Die maximale Spannweite hängt zunächst nur von dem Verhältnis von Brettdicke zur Baulänge des Brettes ab. Diese Spannweite kann aber tatsächlich nur erreicht werden, wenn die Bretter möglichst rau sind und eine hohe Haftreibung haben.

Die Spannweite lässt sich aber auch durch eine Erweiterung der Brückenkonstruktion vergrößern. Mit jeweils vier Brettern kannst du die Sechserbrücke um ein Glied erweitern.



Leider kann die Brücke nicht beliebig verlängert werden; denn wenn die äußeren Bretter zu steil werden, ist die Haftreibung nicht mehr groß genug und die Querbretter rutschen ab.

Sind auch andere Konstruktionen als die ursprünglich von *da Vinci* beschriebenen möglich? Du kannst die „6+4-Brücke“ soweit vereinfachen, dass nur noch acht Bretter nötig sind. Dazu werden jeweils ein langes und ein kurzes Brett aus der Mitte herausgenommen.



Entsprechend sind zur Erweiterung der Brücke nicht vier Bretter, sondern nur 3 Bretter nötig. Die Baulänge wird dadurch der Bretter annähernd so groß wie das Brett selbst, so dass die Brettlänge gut ausgenutzt wird. Allerdings ist diese Konstruktion nur bei sehr rauen Brettern stabil.

Begehbare Bogen

110 kV-Halle

Wenn du die Steine in der richtigen Reihenfolge zusammenbaust, wird der Bogen so stabil, dass du darauf stehen kannst.

An welcher Stelle kann der Bogen das meiste Gewicht tragen?



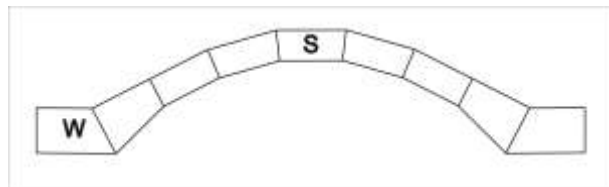
- Gelingt es dir, den Bogen ohne Schablone zu bauen?
- Welchen Stein gibt es nur einmal?
- Versuche, beim fertigen Bogen die Steine langsam nach innen zu drücken.
Bei welchen Steinen gelingt es dir, bei welchen nicht?
- Was würde passieren, wenn die beiden äußeren Steine nicht mit der Grundplatte verbunden wären?

*„Da ging ich, in mich gekehrt,
durch das gewölbte Tor,
sinnend zurück in die Stadt.
Warum, dachte ich, sinkt wohl
das Gewölbe nicht ein, da es
doch keine Stütze hat? Es
steht, antwortete ich, weil alle
Steine auf einmal einstürzen
wollen - und ich zog aus
diesem Gedanken einen
unbeschreiblich erquickenden
Trost, der mir bis zu dem
entscheidenden Augenblicke
immer mit der Hoffnung zur
Seite stand, daß auch ich mich
halten würde, wenn alles mich
sinken läßt.“*

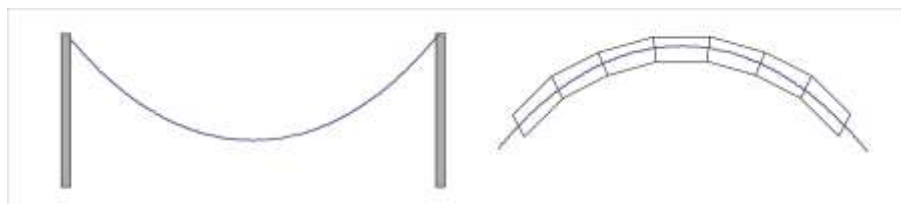
Heinrich von Kleist im Brief
an Wilhelmine von Zenge

Die vermutlich älteste Bogenbrücke – das Aquädukt von Jerwan – stammt aus dem 7. Jh. v. Chr. und befand sich auf dem Gebiet des heutigen Irak. Auch bei gemauerten Toröffnungen oder den Gewölben großer Kirchenschiffe finden sich die gleichen konstruktiven Merkmale und Eigenschaften, die du an dem Begehbaren Bogen aus Holzsegmenten untersuchen und erkennen kannst.

Vielleicht hast du festgestellt, dass es sehr schwierig ist, den Bogen ohne die Holzschablone zu bauen. Für alle Bogenkonstruktionen werden stets sogenannte „Lehrgerüste“ verwendet, die sehr sorgfältig und aufwendig gebaut werden müssen. Erst wenn der oberste Stein eingesetzt ist, wird der Bogen stabil und das Gerüst kann entfernt werden. Dieser letzte Stein wird „Schlussstein“ (S) genannt und aufgrund seiner besonderen Bedeutung oftmals noch eindrucksvoll verziert. Der Schlussstein ist auch der einzige, der dich tragen kann. Er leitet deine Gewichtskraft gleichmäßig an seine Nachbarn weiter. Wenn du seitlich gegen einen anderen Stein des Bogens drückst, wirkt deine Kraft mehr oder weniger parallel zu den Fugen, so dass der Stein schnell herausgedrückt werden kann. Nur wenn die Kraft zuerst auf den keilförmigen Schlussstein wirkt, wird sie senkrecht zu den Fugen von einem Stein zum nächsten weitergeleitet, bis sie schließlich von einem Widerlager (W) aufgenommen wird. Wenn der Bogen so flach wie unserer ist, wirkt die Kraft am Widerlager vor allem nach außen, so dass es fest gegründet, d.h. mit dem Boden verbunden sein muss.



Das Widerlager muss aber nicht nur dein Gewicht – die Nutzlast, sondern auch das Eigengewicht des Bogens aufnehmen. Bei unserem Holzbogen spielt das sicherlich keine Rolle; bei großen Steinbrücken übersteigt das Eigengewicht die Nutzlast jedoch oft um ein Mehrfaches. Es stellt sich daher die Frage, wie eine große Stabilität mit möglichst geringem Materialaufwand erreicht werden kann. Bereits in der Antike wurde diese Idealform des Bogens beschrieben: sie folgt der „Kettenkurve“, d.h. der Linie, die eine durchhängende Kette annimmt.



Nicht nur für Bauingenieure ist es wichtig, dass man so eine Form auch mathematisch beschreiben kann: In der Nähe des Scheitelpunktes ähnelt die Kurve einem Kreissegment bzw. einer Parabel, so dass sich flache Bögen oder Kurven näherungsweise mit diesen Funktionen darstellen lassen. Lange Ketten können nur mit einer hyperbolischen Cosinusfunktion, der sogenannten Katenoide, exakt beschrieben werden. Mit dieser Funktion lässt sich auch der ideale Bogen berechnen, der allein durch seine Eigenlast auch bei großer Höhe ohne Mörtel stabil ist.



Der Gateway Arch in St. Louis, Missouri, wurde nach einer der Katenoide ähnlichen Stützlinie konstruiert. (Foto: Bev Sykes)

Reuleaux-Räder

110 kV-Halle

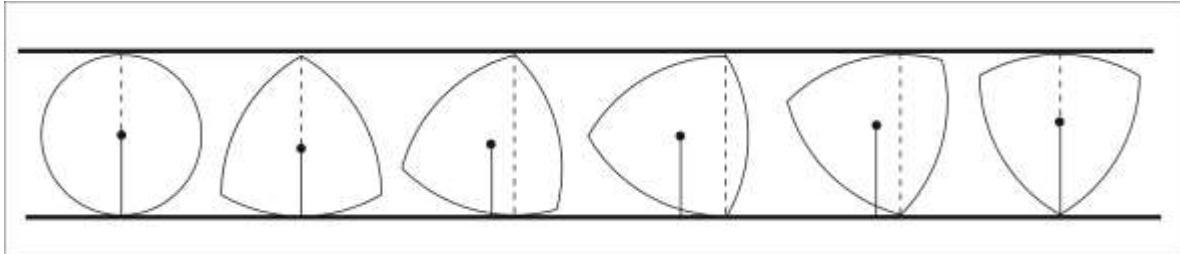
Kann der Balken auf diesen Rädern gerollt werden, auch wenn sie gar nicht rund sind?



- Wie bewegt sich die Achse der Räder beim Rollen?
- Lege das große Holzbrett auf die Räder.
- Lege das Holzbrett auf die Achsen der Räder.
- Wie viele Ecken hat ein Kreis?

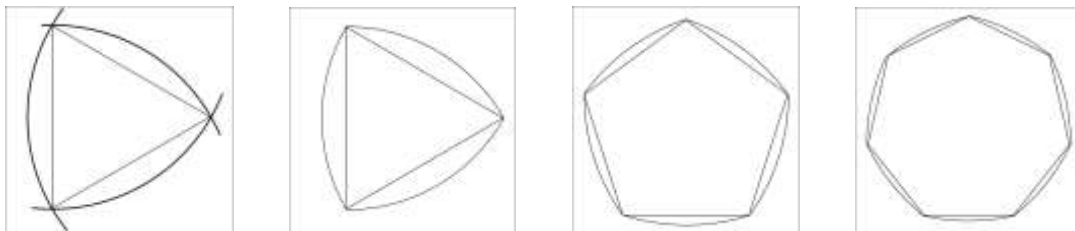
Der Rotationskolben eines Wankelmotors hat die Form eines Reuleauxrades. Wankelmotoren wurden in zahlreichen Fahrzeugtypen getestet; das erste Serienfahrzeug mit einem solchen Motor war in den sechziger Jahren der NSU Wankel Spider.

Man glaubt es kaum, aber Räder müssen nicht immer rund sein. Der deutsche Ingenieur Franz Reuleaux (1829–1905) beschrieb ein Rad, die auch mit Ecken rollt. Das „Reuleaux-Rad“ ist eine spezielle Art des „Gleichdicks“. So nennt man Formen, bei denen alle Durchmesser die gleiche Länge haben. Das einfachste Gleichdicks ist der Kreis; doch auch beim dreieckigen Reuleaux-Rad ist der Durchmesser immer konstant. Sehr anschaulich wird dies, wenn du das Brett auf die Reuleaux-Räder legst: Der Durchmesser des Rades, also der Abstand zwischen Boden und Brett ist immer gleich groß.

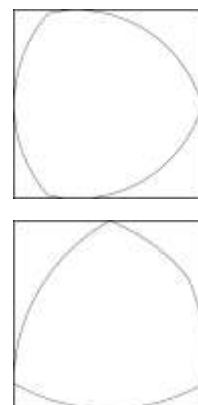


Betrachtest du jedoch den Radius, d.h. den Abstand der Achse zum Boden, so siehst du den Unterschied zwischen dem Kreis und dem Reuleaux-Rad: Beim Kreis ist auch dieser Abstand konstant, d.h. du kannst ein Brett auf der Achse rollen. Ein Reuleaux-Rad hingegen hat einen veränderlichen Radius, so dass sich die Achse sich beim Rollen auf und ab bewegt und du keine Lasten auf der Achse transportieren kannst.

Ein Gleichdick kann auch mehr als drei Ecken haben. Um weitere Formen mit konstantem Durchmesser zu finden, hilft ein Blick auf die Konstruktion eines Reuleaux-Rades: Ausgehend von einem gleichseitigen Dreieck werden drei Kreisbögen mit dem Radius der Seitenlänge geschlagen, die jeweils zwei Ecken des Dreiecks berühren.



In der gleichen Weise kann ausgehend von jedem ungeradzahligem n -Eck (also Fünfeck, Siebeneck...) ein Gleichdick konstruiert werden. Die n -Ecke müssen dabei nicht einmal regelmäßig sein. Für alle Gleichdicks gilt, dass sie sich so in ein Quadrat einpassen lassen, dass sie stets dessen vier Seiten berühren. Eine technische Anwendung dieser Eigenschaft sind zum Beispiel Bohrer für nahezu quadratische Löcher.



Je größer die Seitenzahl eines n -Ecks wird, desto mehr nähert sich die Form des Gleichdicks einem Kreis an und desto größer wird das Verhältnis von Durchmesser zu Fläche. Um bei Münzen Material zu sparen, werden diese daher manchmal in Form eines Gleichdicks gestaltet; so dass bei gleichem Durchmesser – den die Münzautomaten erkennen können – weniger Münzmetall benötigt wird. Zudem können die Münzen einfacher anhand der Form erkannt werden.

Das Oloid

110 kV-Halle

Lege das Oloid auf die schiefe Ebene und beobachte seine Bewegung.



- Welche Teile der Oloid-Oberfläche berühren beim Abrollen den Boden?
- Betrachte das Oloid genau; kannst du einen Kreis oder ein Quadrat darin erkennen?

Der Künstler und Techniker Paul Schatz (1898-1979) hat diesen Körper entdeckt und eine Vielzahl von technischen Anwendungsbereichen beschrieben, die auf seinen eigentümlichen Abrolleigenschaften beruhen, z.B. Rühr- und Belüftungsanlagen oder Mischer für homöopathische Arzneien.

Der seltsam taumelnde Lauf des Oloids ist mit keiner anderen Bewegung vergleichbar. Du solltest dir Zeit nehmen, die Abrolleigenschaften genau zu beobachten und ihren Gesetzmäßigkeiten auf die Spur zu kommen.

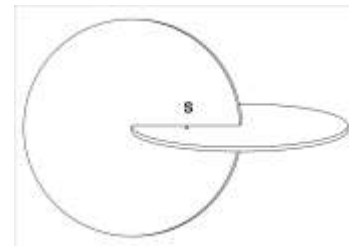
Stell dir vor, du würdest das Oloid mit Farbe bepinseln und anschließend über Papier rollen lassen. Nach genau zwei Umdrehungen wäre die Farbe vollständig abgerieben und das Oloid würde folgenden Abdruck hinterlassen:



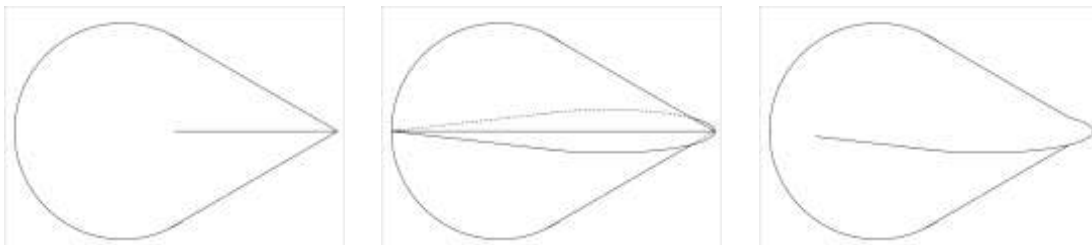
Diese Form ist die Mantelfläche des Oloids. Du kannst sie – wenn noch einige Klebefalze hinzugefügt werden – als Bastelvorlage für ein Papieroloid verwenden.

Das Oloid ist der einzige (bislang bekannte Körper) der über seine komplette Oberfläche abrollt. Andere Rollkörper, z.B. Zylinder, rollen zwar ebenfalls über die Mantelfläche ab, ihre Seitenflächen berühren die Unterlage jedoch nicht. Es gibt aber auch Gemeinsamkeiten im Abrollverhalten von Oloid und Zylinder: Bei Beiden (ebenso wie bei einer Kugel) ist der Schwerpunkt gleichzeitig der Mittelpunkt ihrer Taumel – bzw. Drehbewegung, d.h. er bleibt immer in einer Höhe.

Besser noch als beim Oloid kannst du dies beim Scheibenoloid sehen: Sein Schwerpunkt S liegt auf der Hälfte der Verbindungslinie beider Scheiben. Wenn du während des Abrollens den Schwerpunkt beobachtest, kannst du erkennen, dass er sich auf einer geraden Linie bewegt, während der gesamte Körper taumelt.



Das Scheibenoloid kannst du aus zwei zu Hälften eingeschnittenen runden Bierdeckeln leicht selbst bauen; etwas schwieriger ist die Konstruktion eines Oloids: Anstelle von zwei runden Scheiben werden zwei tropfenförmige Flächen ineinander gesteckt; die Verbindung der Kanten beider Flächen ergibt die Mantelfläche des Oloids.



Die Tropfenform wird aus einem Kreis und einem gleichseitigen Dreieck konstruiert. Als dritte Grundform kannst du ein Quadrat erkennen, indem du das Oloid von der Seite betrachtest.

Hörspiegelstrecke

Außengelände

Stellt Euch vor jeweils eine Spiegelschüssel und sprecht hinein. An welcher Stelle müssen sich eure Köpfe befinden, damit Ihr besonders gut hört und zu verstehen seid?



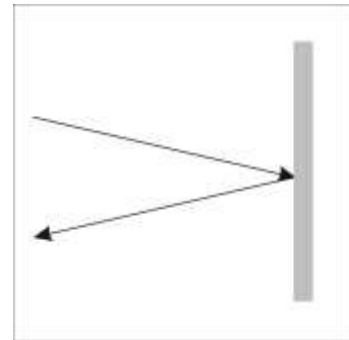
- Hast du schon mal in einen Rasierspiegel geschaut?
- Halte deinen Kopf so, dass du etwa in die Mitte des Spiegels schaust.
- Bewege dich langsam nach hinten.
- Wo hörst du deinen Partner besonders gut?

Die Kuppel der alten Hall of Representatives im Capitol in Washington D.C. soll geheime Gespräche erheblich erschwert haben. Angeblich war sie so konstruiert, dass vertrauliche Unterhaltungen auch am anderen Ende des Raumes gut verstanden werden konnten.

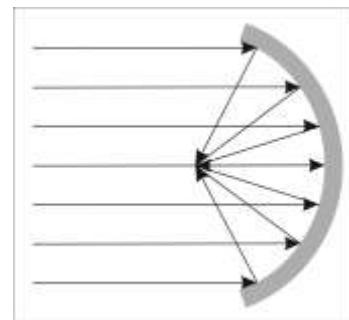
Vielleicht ist es dir auch schon in der Tuschelmuschel aufgefallen: Gekrümmte Wände verändern, wie und was wir hören. Bei den Hörspiegeln handelt es sich um nichts anderes als die Parabolspiegel zweier Satellitenantennen. Solche Antennen dienen der Bündelung und dem Empfang von Radiosignalen; unsere Hörspiegel funktionieren auf die gleiche Weise, nur dass es hier um Schallwellen geht.

Beim Sprechen (oder Singen) kommen Schallwellen aus deinem Mund, die du oder andere hören (All das funktioniert natürlich auch ohne Hörspiegel). Mit den Hörspiegeln könnt ihr euch über große Entfernungen verständigen, selbst wenn ihr Euch den Rücken zudreht – dein Partner und du müssen nur im richtigen Abstand gegen die Hörspiegel sprechen.

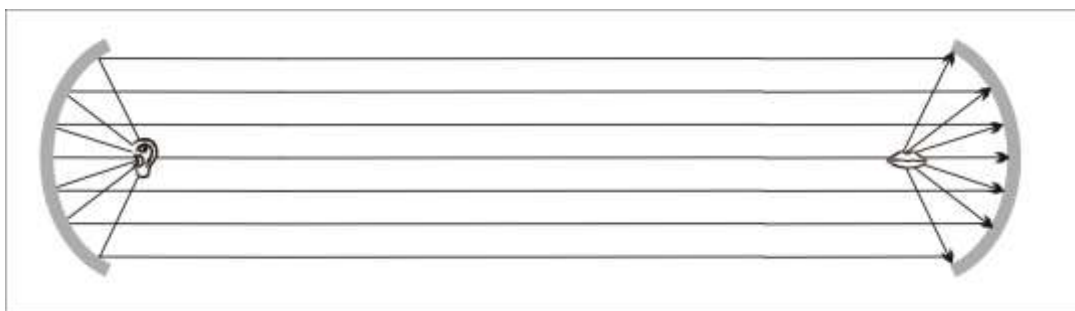
Zur Veranschaulichung dessen, was mit den Schallwellen am Hörspiegel passiert, kann folgende Überlegung hilfreich sein: Schallwellen werden an glatten Flächen reflektiert, d.h. zurückgeworfen. Wie bei einem Ball, den du gegen eine Mauer wirfst, ist dabei der Winkel, mit dem sie auf die Oberfläche auftreffen gleich dem Winkel, mit dem sie zurückgeworfen werden. (Der Übersichtlichkeit halber zeigt die Grafik nicht die Schallwellen, sondern nur deren Weg.)



Wenn die Oberfläche nicht gerade, sondern kreisförmig oder parabolisch gekrümmt ist, werden parallel eintreffende Schallwellen so reflektiert, dass sie sich alle in einem Punkt treffen. Diesen Ort kannst du durch Ausprobieren selber finden, es ist der, an dem du deinen Partner besonders gut verstehst.



Umgekehrt¹ werden alle Schallwellen, die von dir ausgehen, wenn du sprichst, so reflektiert, dass sie den Spiegel parallel verlassen. Vom gegenüberliegenden Spiegel werden die parallelen Schallwellen wieder in einen Punkt gebündelt, so dass dein Partner dich gut verstehen kann.



Dieser Punkt, in dem alle parallel einfallenden Wellen fokussiert werden, heißt Brennpunkt. Bei Parabolantennen ist in diesem Punkt der Empfangskopf angebracht.

Tuschelmuschel

Außengelände

Setzt Euch gegenüber und sprecht gegen die Wand.
Eine Person stellt sich in die Mitte und versucht, den anderen etwas zu sagen oder deren Gespräche zu belauschen.



- Kannst du deinen Partner besser verstehen, wenn er dich anschaut oder wenn er seitlich flüstert?
- Geh langsam und laut sprechend in die Mitte der Tuschelmuschel. Was hörst du? Was hören die anderen?
- Stell dich in die Mitte und sprich einige Worte. Wie klingt deine Stimme für dich, wie für die anderen?
- Hast du eine Idee, warum in der Kuppeldecke eine Öffnung ist?

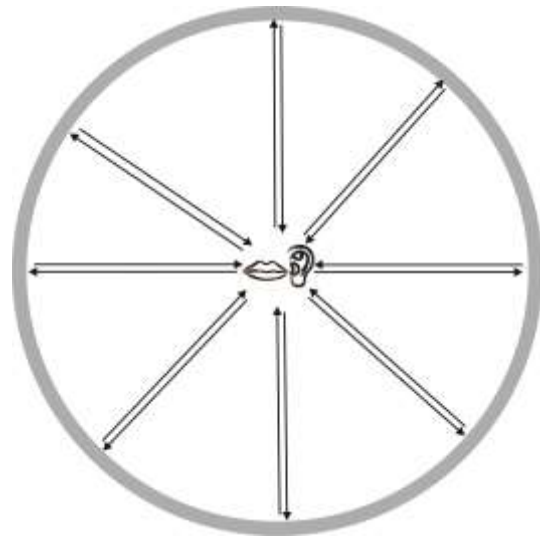
Die Kuppel der St. Pauls Cathedral in London hat eine kreisförmige Galerie von etwa 32 m Durchmesser. Zwei Besucher, die sich gegenüber stehen, können sich entweder über die Mitte schreiend verständigen oder ganz leise gegen die Wand flüstern.

Sobald sie auf der Bank in der Tuschelmuschel sitzen, werden selbst laute Schülergruppen ganz schnell still. Auch du stellst vielleicht fest, dass auf einmal alle Gespräche sehr deutlich zu hören sind und dass es sogar reicht, gegen die Wand zu flüstern, um sogar von einer gegenüberstehenden Person gut verstanden zu werden. Ganz anders geht es dir, wenn du dich in die Mitte stellst: Während du Mühe hast, den Gesprächen der anderen zu folgen, klingen deine eigenen Worte dumpf und verzerrt.

Diese Effekte treten nicht nur in Kuppeln auf (hier allerdings besonders eindrucksvoll), sondern in allen Räumen mit kreis- oder ellipsenförmigen Grundriss und glatten Wänden. Schallwellen, die aus deinem Mund kommen, werden an harten Oberflächen zurückgeworfen (reflektiert). Wenn diese Flächen – wie in der Tuschelmuschel – gleichmäßig gekrümmt sind, wird der Schall immer wieder reflektiert und so entlang der Kuppelwand weitergeleitet, bis sie das Ohr deines Gegenübers erreichen. Diese an der Oberfläche „klebenden“ Wellen werden *Rayleigh*-Wellen genannt. Der Nobelpreisträger John William Strutt, 3. Baron Rayleigh (1842–1919) demonstrierte erstmals die Weiterleitung von Wellen an gekrümmten Oberflächen.



Da die Schallwellen, wenn jemand am Rand spricht, also im Wesentlichen auch am Rand weitergeleitet werden, kannst du ihn schlecht verstehen, wenn du in der Mitte stehst. Wenn du selbst etwas sagst, werden die von deinem Mund ausgehenden Schallwellen zwar ebenfalls an der Wand reflektiert, allerdings genau auf dich zurück. Viele Besucher wirken erschrocken, wenn sie in der Mitte etwas sagen und senken ihre Stimme. Da die Schallwellen fast genau zum Ohr des Sprechers zurückkehren, wirkt die eigene Stimme unnatürlich laut. Du stellst vielleicht fest, dass deine Stimme nicht nur lauter, sondern auch



„anders“ als sonst klingt. Allerdings hörst nur du selbst deine Stimme „wie aus dem Lautsprecher“, für alle anderen klingt sie wie immer. Stehst du nämlich in der Mitte der Tuschelmuschel, so hörst du den Schall, der von der Wand reflektiert wird und über die Luft zu deinem Ohr gelangt deutlich verstärkt. Normalerweise hörst du eine andere Stimme: Wenn du sprichst, so wird der Schall in deinem Körper, vor allem über die Knochen, von den Stimmlippen zum Ohr übertragen – an diesen Klang bist du gewöhnt. In der Mitte der Tuschelmuschel wird er von dem „fremden Klang“ überlagert, was den meisten Besuchern Unbehagen oder sogar Irritationen bereitet.

Bleibt die Frage nach der Öffnung in der Decke. Die Antwort darauf findest du sicher selbst, wenn du überlegst, was mit einem aufgespannten Regenschirm an einem stürmischen Tag passiert.

Hör-Spirale

Außengelände

Leg dein Ohr an den Schlauch und sprich langsam und deutlich in das andere Ende.



- Sprich kurze, laute Worte!
- Was schätzt du, wie viel Zeit vergeht zwischen dem gesprochenem und dem gehörten Wort?
- Was schätzt du, wie lang ist die Hörspirale?

Kleine Froschmännchen, die aufgrund ihrer kleinen und leiseren Schallblase keine Partnerin finden, haben bei tieferen Temperaturen bessere Chancen. Da kalte Luft den Schall besser leitet, klingt die Schallblase bei tiefen Temperaturen lauter – die Männchen werden eher „erhört“.

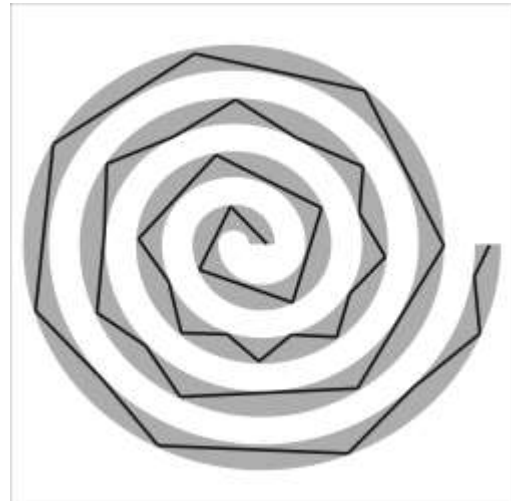
Wer die große Spirale auf dem Außengelände zum ersten Mal sieht, fragt meist erst nach deren Zweck, dann nach deren Größe. Ersteres ist schnell geklärt: Wenn du dein Ohr an eine Ende der Spirale hältst und in das andere Ende laut hineinsprichst, so hörst du die Worte mit einiger Verzögerung.

Die zweite Frage ist wesentlich schwieriger zu beantworten. Zwar lässt sich die Gesamtlänge anhand der Zahl der Windungen und deren Durchmesser überschlägig berechnen, aber das weder besonders genau noch einfach.

Eine andere Möglichkeit ist es, sich die die Geschwindigkeit des Schalls zunutze zu machen. In Luft und bei einer Temperatur von 20° C legt Schall in einer Sekunde 324 m zurück. Um die Länge des Rohres zu berechnen, musst du jetzt wissen, wie lange der Schall von einem Ende des Rohres zum anderen benötigt. Die Vermutungen der Besucher reichen von einer halben bis zu zwei Sekunden. Offensichtlich fällt es schwer, so kurze Zeiten zu schätzen. Ein Anhaltspunkt kann immerhin sein, dass das menschliche Ohr zwei Geräusche nur dann getrennt wahrnehmen kann, wenn zwischen ihnen mindestens eine Zehntelsekunde liegt. Da du das gesprochene und das gehörte Wort als zwei Ereignisse wahrnimmst, muss das Rohr auf alle Fälle länger als 32 m sein.

Unsere Berechnung wird allerdings dadurch verfälscht, dass das Rohr gekrümmt ist und die Schallwellen an den Rohrwandungen immer wieder reflektiert werden und daher einen längeren Weg als die eigentliche Rohrlänge zurücklegen. Selbst wenn du also die Verzögerung genau messen könntest; die daraus berechnete Rohrlänge wäre zu lang.

Somit bleibt letztlich nur, bei den Erbauern der Hörspirale nachzufragen: Nach deren Angaben ist das Rohr 160 m lang.

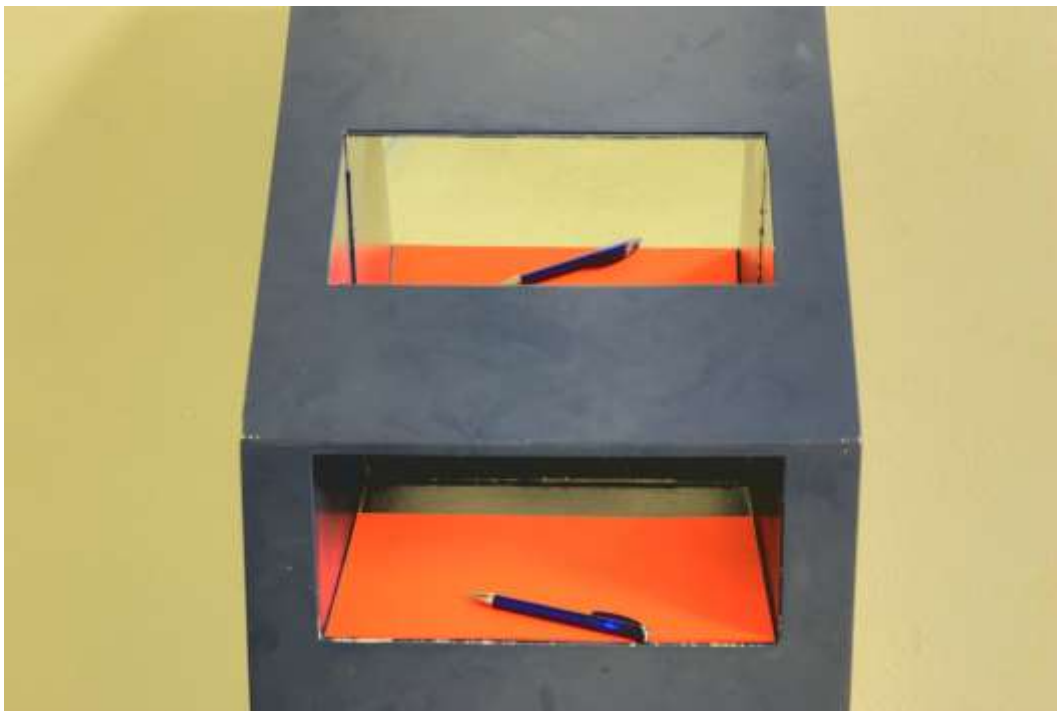


Spiegelzeichner

Boxengasse

Blicke in den Spiegel und zeichne oder schreibe so, dass es im Spiegel seitenrichtig erscheint.

Versuche ein Kreuz zu zeichnen oder das Haus vom Nikolaus. Profis schaffen sogar die fünf Olympischen Ringe (Vorsicht: oben drei, unten zwei!).



- Zeichne zunächst senkrechte und waagerechte Linien. Wobei hast du mehr Schwierigkeiten.
- Versuche mit geschlossenen Augen zu zeichnen. Kannst du dein Bild im Spiegel seitenrichtig erkennen?
- Wie viele Versuche benötigst du, um deinen Namen so zu schreiben, dass er im Spiegel richtig lesbar ist?

*„Ich habe in meinem
Kopf viele Vorstellungen.
Ich weiß nur nicht, was
sie bedeuten.“*

Lewis Carroll,
Alice im Spiegelland

Wenn ein Säugling seinen Kopf zur Seite dreht, streckt er dabei reflexartig den Arm und das Bein der gleichen Seite. Dies sind die Anzeichen für eine beginnende Auge-Hand-Koordination. Ob beim Griff nach der Teetasse oder beim Ballspielen – die Fähigkeit, die Bewegungen der Hand auf das, was wir sehen, abzustimmen, ist unerlässlich selbst für einfache Tätigkeiten.

Vielleicht erinnerst du dich ja noch daran, wie schwer dir das Schreiben der ersten Buchstaben gefallen ist – hier wurden die verschiedenen Bereiche deines Gehirns, die an der Auge-Hand-Koordination beteiligt sind, vor ganz neue Herausforderungen gestellt. Mit der Zeit, mit jedem gemalten Bild und mit jedem geschriebenen Wort hast du dein Gehirn trainiert und Routinen entwickelt, so dass dir Zeichnen und Schreiben schließlich flüssig „von der Hand“ geht.

Beim Spiegelzeichner helfen diese Routinen jedoch nicht und führen sogar in die Irre. Da dein Auge das Spiegelbild deiner Hand und des Geschriebenen sieht, kann das Gehirn das Gesehene und deine Handbewegungen nicht sinnvoll miteinander in Beziehung setzen. Vielleicht stellst du fest, dass gerade bei senkrechten Bewegungen der Stift immer wieder in die falsche Richtung „rutscht“ und so deine Schreibversuche kaum lesbar sind.

Dass du nach einigen Versuchen allerdings trotzdem ein halbwegs passables Schriftbild bekommst (vielleicht sogar in Schreibschrift?), zeigt, wie schnell dein Gehirn auf neue Aufgaben mit neuen Routinen reagiert – und du „wieder etwas gelernt“ hast.

Schwebespiegel

Boxengasse

**Zwei Personen stellen sich an den Seitenrändern des Spiegels gegenüber:
Stellt Euch so an den Rand des Spiegels, dass ein Bein vor und ein Bein hinter dem Spiegel steht, euer Körper also gerade zur Hälfte sichtbar ist.
Hebt nun beide das noch sichtbare Bein hoch und betrachtet das Spiegelbild eures Gegenübers!**

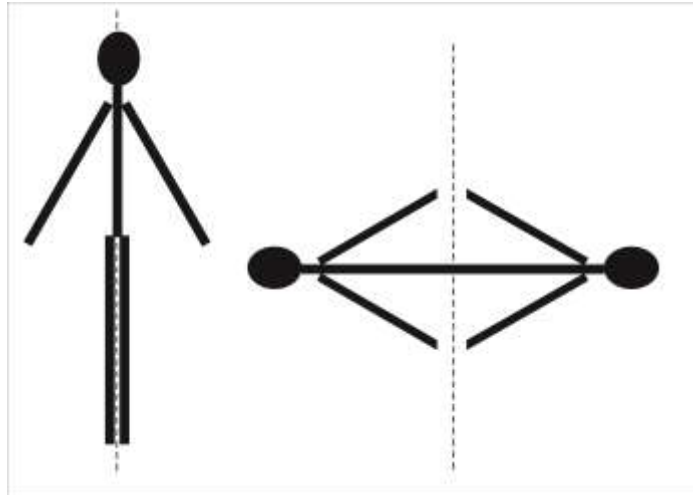
Fallen euch noch weitere „Kunststücke“ ein?



- Was siehst du selbst? Was sehen die anderen?
- Beobachte die Zuschauer!

Viele Zauberkünstler und Illusionisten haben Nummern mit fliegenden Objekten im Programm. Die Illusion eines scheinbar frei schwebenden Autos entsteht z.B. unter Zuhilfenahme großer Spiegel.

Der Schwebespiegel ist eine der Stationen, wo der Spaß beim Zuschauen größer ist als bei Selberrmachen. Wie beim „Haus der Riesenzwerg“ oder „Ich bin drei“ kann man die verblüffende Wirkung von außen besser wahrnehmen als von innen. So solltest du mit Mehreren am Schwebespiegel experimentieren: mal als „halbe Person“, mal als Publikum. Die Irritation entsteht vor allem dadurch, dass Menschen (wie die meisten Tiere) längssymmetrisch sind. Wenn wir eine Körperhälfte verdoppeln, sieht es wie ein kompletter Körper aus. Diese Illusion funktioniert nicht, wenn du dich quer zur Spiegelkante legen würdest – unser Körper hat nur eine Symmetrieebene.



Wenn Personen allerdings sehr asymmetrische Gesichter haben (was gar nicht so selten vorkommt), sehen ihre halb gespiegelten Gesichter oft etwas seltsam aus – zweimal die linke Gesichtshälfte ist eben nicht das Gleiche wie zweimal die rechte Gesichtshälfte.

Kopftausch-Fenster

MdF

Setzt euch zu zweit so am halbdurchlässigen Spiegel gegenüber, dass eure Augen etwa auf derselben Höhe sind.

Die seitliche Beleuchtung erzeugt auf beiden Gesichtern starke Schlagschatten. Was kann man in jenen Partien des eigenen Gesichts erkennen, die nicht beleuchtet werden?

- Findet zunächst heraus, welcher Schalter welche Lampe steuert.
- Dreht abwechselnd an den Schaltern. Welche Partien eurer Gesichter werden beleuchtet? Welches Gesicht kannst du erkennen?
- Beleuchtet eure Gesichter ausschließlich von rechts oder von links. Was siehst du?
- Achte auf die Seite, die im Schatten liegt. Was siehst du dort?
- Schau anderen Besuchern bei dem Experiment zu, achte auf deren Gesichter!

Bei den großen Spiegelflächen, die man oft in Supermärkten sieht, handelt es sich um sogenannte Einwegspiegel. Während der Kunde im hell beleuchteten Verkaufsraum lediglich sein eigenes Spiegelbild sieht, kann eine Person im verdunkelten Raum hinter der Glasfläche ungesehen das gesamte Geschehen beobachten.

Die Station Kopftauschfenster bereitet vielen Besucherinnen und Besuchern anfangs Schwierigkeiten: Die Partner müssen vier Lampen mit vier Schaltern bedienen, die Köpfe aufeinander ausrichten, und das erfordert Kooperation, Geduld und Zusammenspiel. Aber es lohnt sich, denn diejenigen Besucher, die sich auf ihr jeweiliges Gegenüber und die Station einlassen, sind fasziniert: Das eigene Gesicht erscheint langsam in dem des Anderen; das Spiegelbild zeigt zur Hälfte das eigene und das Gesicht des Gegenübers. Wenn du andere Besucher beobachtest, kannst du manchmal feststellen, wie beide Partner sogar ihren Gesichtsausdruck aufeinander abstimmen.

Den Effekt selbst hast du vielleicht schon mal an einem dämmerigen Nachmittag beobachten können: Solange es in deinem Zimmer dunkler als draußen ist, kannst du durch dein Fenster nach außen sehen, denn normales Fensterglas hat eine Lichtdurchlässigkeit von etwa 95 %. Schaltest du im Zimmer das Licht ein, kannst du draußen nichts mehr erkennen. Selbst normale Glasscheiben wirken vor einem dunklen Hintergrund wie Spiegel.

Beim Kopftauschfenster ist dieser Effekt dadurch verstärkt, dass das Glas beschichtet ist. Es wirkt wie ein halbdurchlässiger Spiegel und lässt nur die Hälfte des Lichtes durch. Der Übergang zwischen Lichtdurchlässigkeit (Transmission) und Spiegelwirkung (Reflexion), tritt daher schon bei sehr kleinen Helligkeitsänderungen auf, so dass je nach Beleuchtung das eigene Gesicht (Spiegelung) oder das des Gegenübers (Lichtdurchlass) zu erkennen ist.

Geheimbotschaften

110 kV-Halle

Zwei Spieler sitzen sich gegenüber, ohne den „Bauplatz“ des anderen zu sehen. Jeder hat einen Satz Bausteine.

Baue die Holzklötzchen zu einer Figur auf, die dein Partner nicht sehen kann.

Gib deinem Partner eine „Bauanleitung“ für deine Figur, ohne dabei zu sprechen.

Gelingt es deinem Partner, die Figur nachzubauen?

Viele Spieler erfinden recht spontan eine Zeichensprache zur Verständigung. Kannst du als Zuschauer die Geheimsprache anderer Spieler verstehen?



- Beginnt zunächst mit drei oder vier verschiedenen Holzklötzchen.
- Wir oft müsst ihr spielen, um euch „gut zu verstehen“?
- Welche „Wörter“ hat eure gemeinsam entwickelte Sprache?

Sprache ist ein wirkungsvolles Mittel zur sozialen Abgrenzung, frei nach dem Motto „Wer nicht mitreden kann, gehört nicht dazu.“

Auch Wissenschaftlern jeder Disziplin wird gelegentlich vorgeworfen, eigentlich einfache Begriffe und Sachverhalte mit unnötig komplizierten (meist griechischen oder lateinischen) Begriffen zu beschreiben.

Da ist es kaum verwunderlich, dass es für die Lehre von der verborgenen Übermittlung von Informationen ebenfalls einen Fachbegriff gibt: *Steganographie*.

Kann man sich wortlos verstehen? Verliebte würden diese Frage sofort mit Ja beantworten, aber kann man auch ein gemeinsames „Bauvorhaben“ ohne Worte bewältigen?

Bei den Geheimbotschaften müssen dein Partner und du eure gemeinsame Sprache erfinden, in der ihr euch möglichst kurz und eindeutig verständigen könnt, in der ihr euch die notwendigen Informationen über die gebaute Figur übermitteln könnt, und das alles ohne gesprochene Worte – eine Zeichensprache.

Wie viele und welche Informationen sind mindestens nötig, um eine Figur exakt zu beschreiben?

Sicher hast du schon während des „Sprechens“ mit deinem Partner bemerkt, dass ihr euch über folgende Dinge verständigen müsst:

- Anzahl der Holzklötzchen
- Form (Quader, Kegel, Zylinder...)
- Orientierung (liegend, hochkant...)
- Position (rechts, hinten, übereinander...)

Tatsächlich ist zu beobachten, dass die Spieler für Form, Orientierung und Position bestimmte Gesten entwickeln, die als Zeichen zugleich die „Wörter“ ihrer gemeinsamen Sprache sind. Dabei entsteht eine eigene Grammatik, bei der für jedes Klötzchen einen neuer „Satz“ beginnt. Jeder dieser „Sätze“ hat dann drei „Satzglieder“, nämlich die Gesten für Form, Orientierung und Position, wobei Form und Orientierung manchmal in einer Geste verbunden werden. Natürlich können sowohl die „Wörter“ als auch die Anordnung der „Satzglieder“ von Sprache zu Sprache verschieden sein. Einige Spieler deuten vielleicht zunächst auf die Position, während andere zuerst die Form des Holzklötzchens beschreiben.

Bei allen Unterschieden scheinen viele Spieler eine recht ähnliche „Grammatik“ (ein Satz je Holzklötzchen) zu verwenden, so dass auch unbeteiligte Beobachter oft „mitdeuten“ können. Ebenso interessant ist die Tatsache, dass sich die wenigsten Spieler vorher über eine gemeinsame Sprache einigen, sondern vielmehr die „Sprache“ beim „Sprechen“ entwickeln; ganz ähnlich einem Kleinkind, das die Sprache durch das Sprechen erlernt.

Ich bin drei!

110 kV-Halle

Wie mögen sich Kleine in der Welt der Großen fühlen?



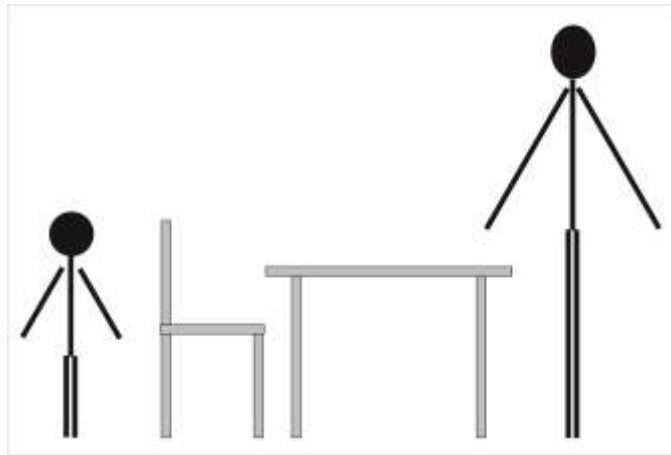
- Was schätzt du, wie groß ist ein dreijähriges Kind?
- Wie groß müsste jemand sein, dem diese Möbel „passen“?
- Wie fühlst du dich, wenn du am großen Tisch sitzt?
- Beobachte andere Besucher!

*„Erwachsen ist man,
wenn der Po größer ist
als der Kopf.“*

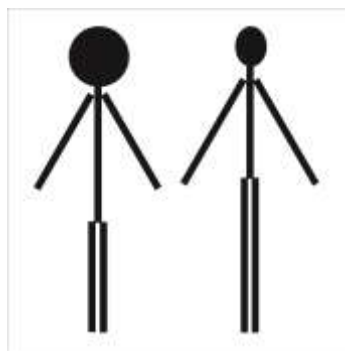
Emilia, 6 Jahre

Die meisten von uns können sich nicht mehr an die Zeit vor dem dritten Lebensjahr erinnern. Wir wissen nicht, was und wie wir in dieser Zeit gefühlt haben; Erfahrungen und Erlebnisse können uns allenfalls von anderen berichtet werden.

Das Arrangement übergroßer Möbel in der Imaginata lädt ein, sich in die Erlebniswelt eines dreijährigen Kindes hineinzusetzen. Tisch und Stuhl sind doppelt so groß wie üblich gestaltet, was ungefähr dem Größenverhältnis zwischen einem erwachsenen Mann und einem knapp dreijährigen Kind entspricht.



Freilich unterscheiden sich Kinder und Erwachsene nicht nur in der Größe, sondern auch in den Körperproportionen: Ein dreijähriges Kind hat im Verhältnis zur Körperlänge einen größeren Kopf, kürzere Beine und der Körperschwerpunkt liegt höher als beim Erwachsenen.



Dies kann mit unserer Station nicht simuliert werden; trotzdem stellst du vielleicht fest, dass im Leben eines Dreijährigen die Stühle zu hoch und die Arme immer zu kurz sind. Allerdings hast du bereits Erfahrungen eines zehn-, dreißig-, oder sechzigjährigen Lebens. Du hast eine Vorstellung, wie groß „normale“ Möbel sind. Doch bei „Ich bin drei“ kannst du nur über den Tisch schauen, wenn du dich auf den Stuhl kniest und anders als mit aufgestützten Ellenbogen kannst du nicht am Tisch sitzen.

Aus diesem Gegensatz zwischen Vorstellung und den konkreten Erfahrungen an der Station entsteht eine Irritation, die sich bei vielen Besuchern in Unbeholfenheit, aber auch Gelächter oder der Imitation trotzigem Kleinkinderverhaltens zeigt. Die Irritation kann dir aber auch neue Blickwinkel zeigen und dich zum Nachdenken bringen: Was für dich normal und selbstverständlich ist, kann aus anderer Perspektive, auch der eines Kleinkindes, unbequem, unpraktisch oder hinderlich sein.

Meeresrauschen

Außengelände

Kippe die runde Trommel leicht an.
Dadurch beginnen die Kugeln in ihrem Inneren zu rollen. Höre aufmerksam zu!
Wie ändert sich der Klang, wenn die Kugeln langsam oder schnell, quer über die Fläche
oder am Rand entlang rollen?



- Bewege die Trommel gemeinsam mit einem oder mehreren Partnern.
- Beobachte dich und deine Partner dabei.

*„...den Unterton zu belauschen der Strömung
– Des Meeres Seufzer, wenn Atem es holet –
Und der Welle Kleingang gen das Gebälke
– Des Meeres Zeitvertreib in der Schwermut.
Da spülen die Wünsche langsam hinüber
In der Allnatur meeresstiefe Schmerzen...“*

Björnstjerne Björnson
aus „Arnljot Gelline“

Schwärzer als Schwarz

110 kV-Halle

Betrachte den Kubus von außen und innen.
Lass dir Zeit.

Was würdest du sagen, wenn jemand dich fragte:
„Was ist eigentlich schwarz?“

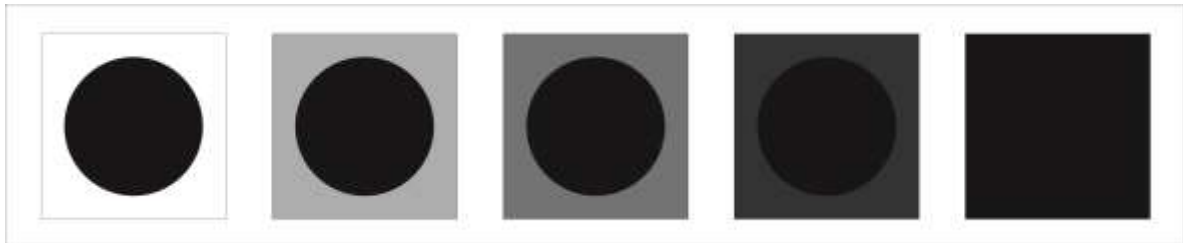


- Steck die Hände in die Hosentaschen.
- Betritt den Kubus und betrachte den inneren Würfel.
Wie viele Öffnungen kannst du erkennen?
- Wo ist es am dunkelsten?

Das Schwärzeste, was Menschen je hergestellt haben, ist eine an der Rice University in Houston entwickelte Oberfläche. Sie ist mit senkrecht stehenden Kohlenstoff-Nano-Röhrchen beschichtet und reflektiert lediglich 0,045% des einfallenden Lichtes (zum Vergleich: Asphalt reflektiert etwa 15 %, Kohle 4-5 % des einfallenden Lichtes.)

„Schwarz ist keine Farbe!“ Dieser Satz ist dir vielleicht schon im Kunstunterricht begegnet. Dennoch ist Schwarz in jedem Farbkasten und jeder Farbtabelle vertreten; mit exotischen Namen von „Alizarinschwarz“ bis „Wildtulpenschwarz“.

Auch die Station, vor der du nun stehst, wurde mit schwarzer Farbe gestrichen. Innen wie außen wurde ein und dieselbe Farbe verwendet, doch sieht nicht alles gleich aus: Außen ist der Kubus schwarz, innen ist er schwärzer. Betrachtet du nun den inneren Würfel, siehst du wiederum noch schwärzere Löcher. Wie viele Öffnungen sich eigentlich in dem Kubus befinden, ist für die Besucher schwer zu erkennen, da der Kontrast zwischen Umgebung und Öffnung immer geringer wird, je weiter sie sich in den Kubus begeben. Du kannst demnach Schwarz immer nur in einer noch etwas helleren Umgebung als solches erkennen; wenn kein Licht mehr da ist, ist „alles schwarz“ und du siehst gar nichts.



Unser Auge nimmt Licht als optischen Reiz wahr. Wenn kein Licht ins Auge dringt, fehlt dieser Reiz, und wir sehen schwarz (Physiologisch gesehen ist Schwarz das Fehlen eines Lichtreizes).

Ein Ding erscheint uns also dann als schwarz, wenn kein Licht von ihm ausgeht.

In der Physik gibt es den von Gustav Kirchhoff geprägten Begriff des „schwarzer Körpers“, der alles Licht absorbiert und kein Licht reflektiert (zurückwirft). Für technische Anwendungen, beispielsweise zur Bestimmung von Laserstrahl-Leistungen, wird das „ideale Schwarz“ durch einen Hohlraumstrahler realisiert. Dabei handelt es sich um einen schwarzen, meist zylinder- oder kugelförmigen Hohlraum mit einem kleinen Loch. Ähnlich wie bei unserer Imaginata-Station wird das durch die Öffnung eindringende Licht in dem Hohlraum geschluckt (genauer gesagt: es wird an den Innenwänden mehrfach reflektiert) und kann nicht mehr nach außen dringen: die Öffnung erscheint praktisch völlig schwarz.

Black Box

110 kV-Halle

Ein Orientierungsspiel im Dunkeln:

Nimm dir die Zeit zum mehrmaligen Durchschreiten des dunklen Weges.

Versuche nach jedem Durchgang den Grundriss der Black Box mit Hilfe der Hölzchen zu rekonstruieren!



- Was schätzt du, wie groß ist der Raum?
- Gehe mehrmals durch die Box, du kannst auch am hinteren Eingang beginnen.
- Was schätzt du, wie lange benötigst du für die Durchquerung der Box?

Achtung! Auflösung auf der nächsten Seite!

Der Begriff „Black Box“ stammt ursprünglich aus der Militärtechnik und bezeichnete ein erbeutetes unbekanntes Feindgerät. Mittlerweile wird das Wort für komplexe Systeme verwendet, bei denen lediglich das Verhalten, nicht jedoch der innere Aufbau betrachtet wird.

Black Box, Tastatour und Lichtlose Küche sind Stationen, bei denen wir uns „Bilder machen“, ohne etwas zu sehen.

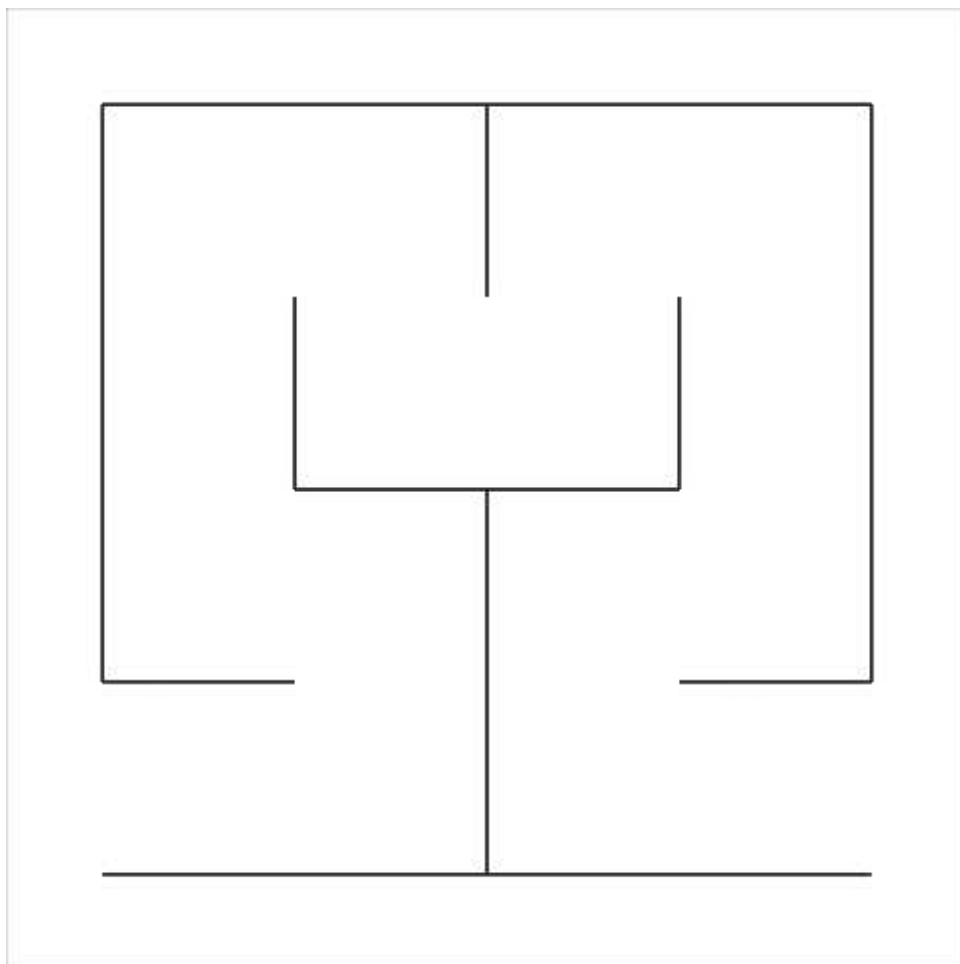
Wenn du dich zum ersten Mal durch die Black Box tastest, erscheint es dir vielleicht schwierig, wenn nicht gar unmöglich, den Grundriss aufzuzeichnen. Einfacher geht es oft mit Partnern, die zudem verschiedene Ideen zur Lösen der Aufgabe einbringen.

So kann es hilfreich sein, wenn ihr anhand von Schrittlängen die äußere Länge und Breite der Box abschätzt, und diese mit den inneren Maßen und Winkeln vergleicht.

Wenn ihr den Gang in beide Richtungen abschreitet, euch dabei entgegenkommt und gleichzeitig euren Weg beschreibt, fällt euch vielleicht auf, dass ihr an den gleichen Stellen – aber in entgegengesetzte Richtung – abbiegt: Der Grundriss ist symmetrisch.

Auf alle Fälle solltet ihr mehrmals durch die Box gehen – jedes Mal wird die „innere Landkarte“ ein wenig klarer. Eure so entwickelten Vorstellungen könnt ihr mit den Holzstäbchen sichtbar machen und nach jedem Durchgang vergleichen, ändern oder ergänzen.

So habt ihr schließlich die Aufgabe gelöst: Aus euren Erfahrungen und Vorstellungen habt ihr ein gemeinsames Bild, den Grundriss der Black Box, geschaffen.



Tastatour

110 kV-Halle

Ein dunkler Gang wartet mit mancherlei überraschenden Hindernissen auf.
Begib dich tastend auf Tour!



- Was erwartest du in dem Gang?
- Was siehst, hörst und fühlst du?
- Was stellst du dir vor, während du die Tastatour durchquerst?

„Wir finden durch das Tasten nicht nur den fremden Körper, sondern auch den eigenen Leib, und dieses Doppelempfinden ist es, was den Charakter des Tastens ausmacht.“

Menyhért Palágyi

Die Tastatour gehört unbestritten zu den Publikumsmagneten der Imaginata. Schülergruppen fragen oft schon zu Beginn der Führung, ob sie denn heute auch „in den dunklen Gang“ dürften. Offensichtlich lässt die Faszination auch nach mehrmaligem „Durchtasten“ nicht nach. Die Begeisterung einer Schülergruppe ging sogar soweit, dass sie um ein Bandmaß bat und die Tastatour vermaß. Hier nun Ergebnisse:

Der Gang durch die Tastatour ist 31 m lang.

Der Gang ist zwischen 0,8 und 2,0 m breit.

Es gibt 13 Treppenstufen und 5 Zacken.

Lichtlose Küche

Deckt gemeinsam den Tisch – mit richtigen Tellern und Tassen, zerbrechlichen Gläsern und scharfen Messern...



- Was schätzt du, wie groß ist der Raum?
Wie sind die Möbel angeordnet?
- Was stellst du dir vor, während du den Tisch deckst?
- Worüber unterhaltet ihr Euch beim Tischdecken?
- Vergleiche deine Vorstellungen mit der nun beleuchteten Küche!

Das erste Dunkelrestaurant war die 1999 in der Schweiz eröffnete „blinde Kuh“. Die Gäste werden von blinden und sehbehinderten Menschen betreut und sind beim Essen ausschließlich auf ihren Geruchs- Geschmacks-, Tast- und Hörsinn angewiesen.

Tisch decken, Kaffee kochen, frühstücken. Alltägliche Tätigkeiten, die uns selten vor große Herausforderungen stellen. Selbst wenn es stockdunkel ist und der Strom ausfällt, finden sich die meisten Leute in ihrer heimischen Küche „blind“ zurecht. Zwar werden unsere Bewegungen langsamer und vorsichtiger: wir sind „Augentiere“ und unsere Orientierung im Raum erfolgt überwiegend über den Sehsinn. Dennoch kennen wir uns aus, denn wir haben unsere vertraute Umgebung im Kopf. Wir haben eine Vorstellung, wie unsere Küche aussieht und diese Vorstellung ersetzt teilweise unseren fehlenden Sehsinn.

Ganz anders ist es in der Lichtlosen Küche: In einer unbekannten Umgebung, ohne etwas sehen zu können, fühlen sich die meisten Besucher sehr unbeholfen, unsicher, manchmal sogar ängstlich.

Wenn du selbst in der lichtlosen Küche bist, musst du dir ausschließlich durch Tast- und Hörsinn ein Bild des Raumes verschaffen. Dir eigentlich vertraute Dinge wie Möbel, Tassen, Teller oder Besteck musst du vorsichtig ertasten und mit deinen Vorstellungen vergleichen. Du musst dich mit deinen Freunden verständigen, zusammenarbeiten und Zusammenstöße vermeiden. Doch gerade durch das Gespräch mit anderen schwindet das Unbehagen und die Sache beginnt Spaß zu machen.

Wenn ihr am Schluss den Tisch gedeckt habt, habt ihr eine Vorstellung vom Raum, seiner Größe, der Anordnung der Möbel.

Ihr habt euch „ein Bild gemacht“, ohne etwas zu sehen.

Licht-Labyrinth

110 kV-Halle

Ein 7 Meter langer Weg wird durch mehrere Lichtschranken versperrt. du musst einen Weg finden, ohne dabei einen Alarm auszulösen.

Übung: Zur leichteren Erkennung sind entlang der Lichtschranken Gummischnüre gespannt.

Ernstfall: Nach dem Entfernen der Schnüre bist du allein auf deine Vorstellungskraft gestellt. Kannst du den Weg finden?



- Welche Stelle empfindest du besonders schwierig?
- Wie viele Versuche benötigst du, um das Labyrinth fehlerfrei zu passieren?
- Nach wie vielen „Übungsläufen“ traust du dir einen Versuch ohne gespannte Schnüre zu?
- Beobachte andere Besucher bei dem Experiment!

Der amerikanische Psychologe Karl Lashley (1890-1958) versuchte, den Ort des Gedächtnisses zu lokalisieren. Dazu ließ er Ratten durch Labyrinth laufen und entfernte ihnen anschließend Teile der Großhirnrinde. Seine vielen Experimente lieferten keine klaren Ergebnisse, so dass er schließlich (wohl etwas resigniert) resümierte, Gedächtnis sei überhaupt nicht möglich.

Weitere Stationen:

Holzknoten

110 kV-Halle

Die einzelnen Holzstäbe lassen sich zu einem Knoten verbinden.
Findest du verschiedene Möglichkeiten, den Knoten zu bauen?

Magnetische Kugelrollbahn

110 kV-Halle

Holzrinnen haften magnetisch an einer Metallwand. Wer baut die raffinierteste, schnellste oder langsamste Kugelrollbahn?

Kreuz.wort.weise

Boxengasse

Versucht aus den vorhandenen Buchstaben möglichst viele Wörter zu bilden.
Ihr könnt sowohl miteinander als auch gegeneinander spielen.

Klangtor

Außengelände

Tritt ein und lausche!

Wo kommt der Klang her,
wo fließt er durch,
wo verschwindet er wieder?

Was könnte der Klang sein?

Sinneswandel

Unsere Sinne eröffnen uns die Welt – gleichzeitig begrenzen sie aber auch unsere Wahrnehmung: Was wir nicht sehen, hören, riechen, schmecken oder fühlen, ist für uns nicht real. Unsere Imagination kann über das hinausgehen, was wir wahrnehmen, sie erschafft eine eigene Wirklichkeit und greift dabei doch immer wieder auf die Sinneserfahrungen zurück. Wahrnehmung und Vorstellungskraft stehen im Wechselspiel und sind oft gar nicht genau voneinander zu trennen. Liebgewonnene Vorstellungen lassen uns „blind werden“, bei ungewöhnlichen Ereignissen „trauen wir unseren Augen nicht“.

Die Sinneswandel-Stationen fordern Wahrnehmung und Vorstellungskraft gleichermaßen und helfen, uns unserer Sinne, deren Fähigkeiten, Zweckmäßigkeiten, Limitationen und Irrungen bewusst zu werden.

Farben? Blind!

Boxengasse

Der Raum wird durch das Licht einer Natriumdampf-Lampe beleuchtet.
Kannst du die Farben der Bilder an den Wänden erkennen?
Was passiert, wenn du die Handlampe einschaltest?



- Welche Farbe hat deine Kleidung?
- Welche Farbe haben die Bilder?
- Wie sehen diese Farben im weißen Licht aus?
- Welche Farbe hat das Licht der Deckenlampe?

„Rays are not coloured.“

Sir Isaac Newton (1642-1827)

Wenn du mit deinen Freunden in den Farbenblind-Raum betrittst, kannst du sie ja mal fragen, was für Sachen du anhast. Sie werden vermutlich Mühe haben, die Farbe deiner Kleidung zu beschreiben, es sein denn, sie haben schon vorher darauf geachtet. Es fällt schwer, in diesem Licht Farben zu erkennen. Wenn Besucher gefragt werden, mit welchen Farben die Bilder gemalt sind, sind sich die meisten lediglich bei Gelb und Schwarz richtig sicher, mit etwas Zögern werden noch Grau oder Rot genannt. Umso größer die Verblüffung, wenn die Bilder dann mit der Handlampe beleuchtet werden: Jetzt erscheint eine ganze Palette verschiedener Farbtöne. „Warum sehen die Farben so unterschiedlich aus?“ Zur Beantwortung der naheliegenden Frage ist es hilfreich, zunächst zu fragen: „Was sehen wir?“ und „Wie sehen wir?“

Mit unseren Augen nehmen wir optische Reize wahr, d.h. das Licht, das von Lichtquellen oder beleuchteten Gegenständen ausgeht. Licht kann man als für Mensch und Tier sichtbare elektromagnetische Wellen beschreiben (Im Kapitel „Linsen und Spiegel“ ist dir mit dem „Lichtstrahl“ ein weiteres Modell begegnet). Das für den Menschen sichtbare Lichtspektrum hat eine Wellenlänge zwischen 380 und 780 nm. Je nach Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung werden im Auge verschiedene Farbempfindungen hervorgerufen; genauer ist dies bei der Station „Farbige Schatten“ beschrieben. Einen Überblick zum Zusammenhang zwischen Farbwahrnehmung und Wellenlänge gibt folgende Tabelle:

Farbe	Violett	Blau	Grün	Gelb	Orange	Rot
Wellenlänge (nm)	380–420	420–490	490–575	575–585	585–650	650–750

Sonnenlicht ist elektromagnetische Strahlung verschiedener Wellenlängen und wird von uns als „normales weißes Licht“ wahrgenommen. Fällt dieses Licht auf einen Gegenstand, so werden – abhängig von der Wellenlänge – Teile der Strahlung entweder absorbiert (d.h. „verschluckt“) oder reflektiert (zurückgeworfen). Die reflektierten Anteile des Lichtes lassen uns den Gegenstand farbig erscheinen: Ein Ziegelstein reflektiert nur langwelliges Licht und erscheint uns daher rot; der Blattfarbstoff Chlorophyll absorbiert sowohl langwelliges als auch kurzwelliges Licht; reflektiert aber die Strahlung im Bereich zwischen 500 und 600 nm und sieht daher für uns grün aus. Wenn du dir die Blätter allerdings in der roten Abenddämmerung ansiehst, sehen sie überhaupt nicht mehr Grün aus. Im Abendlicht überwiegen die langwelligeren roten und orangefarbenen Anteile, so dass die Blätter kaum mehr grünes Licht reflektieren.

Der Farbenblind-Raum wird von einer Natriumdampflampe beleuchtet, die ausschließlich Licht einer Wellenlänge von 589 nm emittiert, das uns gelb erscheint. Und tatsächlich kannst du die gelbe Farbe auf den Bildern ohne Probleme sehen. Doch auch die weiße Farbe sieht in diesem Licht gelb aus (schau einfach mal mit der Handlampe nach). Weiße Pigmente reflektieren alles einfallende Licht, wenn allerdings nur gelbes Licht drauf scheint, wird eben auch nur gelbes Licht zurückgeworfen, so dass du keinen Unterschied zur gelben Farbe erkennen kannst. Ebenso erscheint dir die blaue Farbe schwarz, weil die blauen Farbstoffe sämtliches gelbes Licht absorbieren und somit – wie bei schwarzen Pigmenten – überhaupt kein sichtbares Licht reflektiert wird.

Farbige Schatten

110-kV-Halle

Stelle dich vor die farbigen Lampen.
Wie ändern sich deine Schatten, wenn du dich bewegst?



- Wie viele Lampen siehst du?
- Wie viele Schatten siehst du?
- Welche Farben kannst du sehen?

*„Man nehme zu Nachtzeit
zwei brennende Kerzen und
stelle sie gegeneinander auf
eine weiße Fläche; man halte
einen dünnen Stab zwischen
beiden aufrecht, so daß zwei
Schatten entstehen; man
nehme ein farbiges Glas und
halte es vor das eine Licht,
also daß die weiße Fläche
gefärbt erscheine, und in
demselben Augenblick wird
der von dem nunmehr
färbenden Lichte geworfene,
und von dem farblosen Lichte
beleuchtete Schatten die
geforderte Farbe anzeigen.“*

Johann Wolfgang von Goethe
(1749-1832)
„Zur Farbenlehre“

Wie sehen wir eigentlich Farben?

Die Station „Farbige Schatten“ kann dir helfen, eine Antwort auf diese Frage zu finden. Drei farbige Lampen beleuchten eine Leinwand. Wenn du einzelne Lampen abdeckst, kannst du erkennen, dass sie rotes, grünes bzw. blaues Licht ausstrahlen, das sich auf der Leinwand zu weißen Licht vereint. Diese Art der Farbmischung nennt man additive Farbmischung und sie zeigt uns, wie unser Auge Farben wahrnimmt. In der Netzhaut unserer Augen befinden sich Sinneszellen, die Lichtreize in elektrische Nervenimpulse wandeln. Wir haben zwei Arten von Sinneszellen: Während die Stäbchen das Sehen bei wenig Licht ermöglichen (skotopisches Sehen), sind die Zapfen die Fotorezeptoren für das Tagsehen (photopisches Sehen). Im menschlichen Auge befinden sich drei verschiedene Arten von Zapfen, die jeweils auf unterschiedliche Wellenlängen reagieren:

Zapfentyp	Wahrgenommener Bereich des Farbspektrums
S-Zapfen	Violett...Blau
M-Zapfen	Blau...Orange
L-Zapfen	Gelbgrün...Rot

Die verschiedenen Zapfen ermöglichen es uns, unterschiedliche Farben wahrzunehmen, denn je nach Farbe des einfallenden Lichts werden die einzelnen Sinneszellen unterschiedlich stark angeregt (Bei wenig Licht können wir lediglich Hell-Dunkel-Kontraste wahrnehmen, da wir eben nur eine Art von Stäbchen haben.).

Durch die rote, grüne und blaue Lampe wird der größte Teil des sichtbaren Lichtspektrums abgedeckt, und in den farbigen Schatten entstehen alle möglichen Kombinationen der drei Farben. Fällt beispielsweise Licht einer Wellenlänge von 700 nm in unser Auge, werden die L-Zapfen angeregt und wir sehen rot. Bei Licht einer Wellenlänge von 580 nm werden sowohl die M- als auch die L-Zapfen angeregt, wodurch ein gelber Farbeindruck entsteht. Werden alle Zapfentypen angeregt, sehen wir weiß.

Wenn du genau auf die Leinwand schaut, kannst du erkennen, welche Farben durch die Kombinationen der drei unterschiedlichen Lampen entstehen:

Rote Lampe	Grüne Lampe	Blaue Lampe	Farbe
●	●	●	weiß
●			rot
	●		grün
		●	dunkelblau
●	●		gelb
●		●	magenta
	●	●	cyanblau
			schwarz

Die „Dreifarbentheorie“ wurde in der Mitte des 19. Jh. u.a. von dem Physiker und Physiologen Hermann von Helmholtz (1821–1894) entwickelt. Ihre praktische Anwendung bis heute aktuell: Auf jedem Fernseh- oder Computerbildschirm leuchten lediglich winzige Punkte roten, grünen oder blauen Lichts, die erst in ihrer Kombination ein vielfarbiges Bild ergeben.

Schwarzlicht-Kabinett

110-kV-Halle

Was siehst du im „Schwarzlicht“?



- Betrachte die Dokumente im Schaukasten. Wie sehen sie wohl bei Tageslicht aus?
- Wie sieht deine Kleidung im Schwarzlicht aus?

Schwarzlichtpartys beziehen einen großen Teil ihres Reizes aus der Verwendung fluoreszierender Materialien. So ist dort Gin-Tonic ein beliebtes Getränk, weil das im *tonic water* enthaltene Chinin im Schwarzlicht blau leuchtet. Von Studentenfeiern des MIT wurde berichtet, dass sich die Teilnehmer mit der Cremefüllung der Kekssorte „Twinkies“ einschmieren, was zu einem fluoreszierenden Effekt auf der Haut führen soll.

Licht ist die sichtbare elektromagnetische Strahlung. Diese Aussage legt nahe, dass es auch „unsichtbare“ elektromagnetische Strahlung gibt, und tatsächlich stellt das sichtbare Licht nur einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums dar, das Röntgen- und Wärmestrahlung ebenso umfasst wie Mikro- und Radiowellen. Auch das „Schwarzlicht“ ist für unsere Augen nicht sichtbar, es ist ultraviolette Strahlung mit einer Wellenlänge von 315 bis 380 nm (Der Name „ultraviolett“ leitet sich aus der Nähe zu dem für uns sichtbaren violetten Licht (380–420 nm) ab). Da die kürzerwellige Strahlung bereits von der Linse unseres Auges absorbiert wird, gelangt sie gar nicht erst zur Netzhaut und ist daher für uns nicht wahrnehmbar. Dennoch sehen wir im Schaukasten leuchtende Farben, und wenn du ein weißes T-Shirt trägst, leuchtet es hellblau, wenn du dich vor die Lampe stellst.

Die Ursache dafür ist allerdings nicht in unserem Auge, sondern in den leuchtenden Materialien zu suchen. Sie enthalten Fluoreszenzfarbstoffe, die durch das ultraviolette Licht angeregt werden, Licht einer größeren Wellenlänge abzustrahlen. Wenn dieses längerwellige Licht nun in dem für uns sichtbaren Bereich zwischen 380 und 780 nm liegt, sieht es für uns aus, als würden die Materialien selbst leuchten.

Fluoreszenzfarbstoffe haben vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Im Schaukasten siehst du, wie Dokumente durch den Einsatz von fluoreszierendem Material fälschungssicher gemacht werden, indem sie bestimmte Sicherheitsmerkmale erst im UV-Licht offenbaren. Auch für verschiedene medizinische Diagnoseverfahren und molekularbiologische Methoden wie die DNA-Sequenzierung werden Fluoreszenzmarker verwendet. Sogar bei dir zu Hause kannst du fluoreszierende Farbstoffe finden: Als „optische Aufheller“ sorgen sie im Waschmittel für den „weißer-als-weiß“-Effekt, indem sie schwach blau leuchten, wenn sie von UV-Licht angestrahlt werden und somit die Vergilbung von Textilien überdecken.

Lebensräder

Boxengasse

Halte das Rad so vors Gesicht, dass du auf die schwarze Rückseite schaust. Blicke dann mit nur einem Auge durch den obersten der schmalen Schlitze hindurch auf einen Spiegel. Nun bringst du das Rad zum Drehen – mal schnell, mal langsam, mal links herum, mal rechts herum.



- Was siehst du auf der Scheibe?
- Was siehst du, wenn du die Scheibe drehst und durch die Schlitze in den Spiegel schaust?
Was passiert, wenn die Scheibe langsam rotiert?
- Was siehst du, wenn du direkt auf die rotierende Scheibe schaust?

„Stroboskop“
„Phenakistiskop“
„Phanakistiskop“
„Phantaskop“
„Wunderrad“
„Lebensrad“
„Plateau-Scheibe“

Der belgische Physiker Joseph Antoine Plateau, (1801-1883) und der österreichische Mathematiker und Geodät Simon Ritter von Stampfer (1792-1864) beschrieben unabhängig voneinander das Prinzip gelochter rotierender Scheiben zur Darstellung von Bewegungsabfolgen.

Vielleicht hast du schon mal ein Daumenkino in der Hand gehabt: Wenn du das kleine Büchlein mit den einzelnen Zeichnungen schnell genug durchblätterst, scheinen sich die aufeinanderfolgenden Bilder zu einer fließenden Bewegung zu verbinden.

Das Lebensrad funktioniert ganz ähnlich: Wenn sich die Scheibe dreht und du durch die Schlitze schaust, siehst du im Spiegel einen „Animationsfilm“. Dies funktioniert allerdings nur, wenn es sich tatsächlich um einzelne, voneinander getrennte Bilder handelt: Wenn du direkt auf die rotierende Scheibe blickst, so siehst du nichts. Erst beim Blick durch die Schlitze entstehen Einzelbilder, die ab einer Geschwindigkeit von etwa 15 – 18 Bilder pro Sekunde vom visuellen Cortex, (der „Sehrinde“ im Gehirn) zu einer fortlaufenden Bewegung zusammengesetzt werden.

Das Prinzip der „bewegten Bilder“ ist Grundlage für Film und Fernsehtechnik. Für die europäischen Fernsehformate PAL und SECAM werden 25 Bilder pro Sekunde verwendet, um eine ruckelfreie Darstellung zu gewährleisten. Allerdings wird jedes Einzelbild doppelt gezeigt, so dass insgesamt 50 Bilder pro Sekunde auf dem Bildschirm gezeigt werden. Dadurch erscheint das Bild nicht nur ruckel-, sondern auch flimmerfrei.

Wundertrommel

Boxengasse

Lege einen der Bilderstreifen in die Trommel. Versetze die Trommel dann in eine nicht zu schnelle Drehbewegung. Was kannst du beobachten, wenn du durch die Schlitze auf den Bilderstreifen blickst?

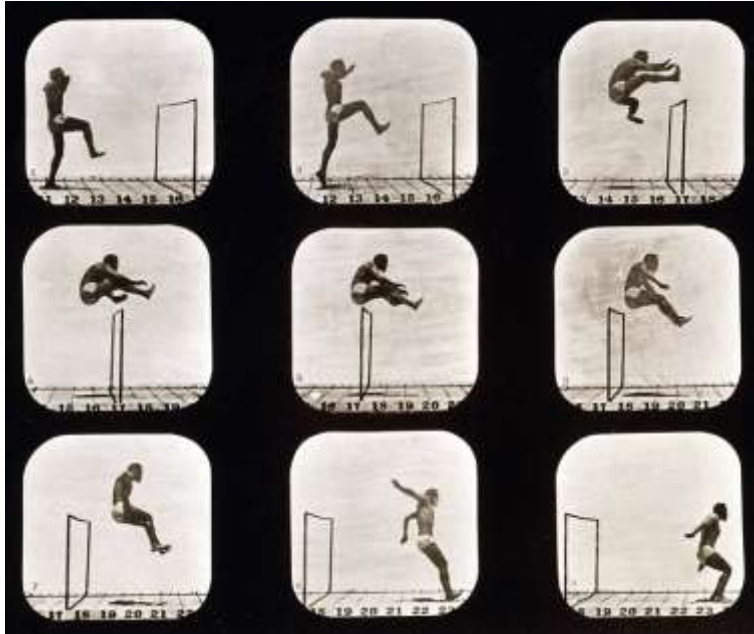


- Betrachte den Bildstreifen bei unterschiedlichen Drehbewegungen.
- Was siehst du, wenn sich die Trommel in der entgegengesetzten Richtung dreht?

Der britische Fotograf Eadweard Muybridge (1830-1904) war einer der ersten, der Fotoserien von Bewegungsabläufen aufnahm. Dadurch konnte er die seit Jahrhunderten offene Frage beantworten, ob ein galoppierendes Pferd stets mindestens einen Huf auf dem Boden hat.

Wie bei den Lebensrädern kannst du hier den „bewegte Bilder“-Effekt sehen: Ab einer Geschwindigkeit von etwa 15–18 Einzelbildern erscheint uns eine Abfolge von Einzelbildern als kontinuierliche Bewegung.

Im 19. Jahrhundert wurde eine Vielzahl verschiedener Apparate gebaut, die sich dieses Prinzip zunutze machten. Zusammen mit der Entwicklung von lichtempfindlichem Celluloidfilm und Projektionskameras führte dies schließlich zur Entstehung des Kinos.



Serienfotographie von Eadweard Muybridge

Pulfrich–Pendel

Boxengasse

**Versetze beide Pendel nacheinander in Schwingung.
Beobachte ihre Bewegung aus ca. 2,5 m Abstand.
Setz eine Brille mit einseitig getöntem Glas auf und betrachte die Pendel erneut.**

- Beobachte das Pendel mit und ohne Brille.
Versuche die Bewegungen des Pendels zu beschreiben?
- Was siehst du, wenn du das Pendel mit nur einem Auge betrachtest?

Der Physiker und Optiker Carl Pulfrich (1858 – 1927) war auf dem linken Auge blind und daher nicht in der Lage, räumlich zu sehen. Dennoch – oder deshalb – beschäftigte er sich intensiv mit den wissenschaftlichen Grundlagen des räumlichen Sehens, der „Stereoskopie“.

Wir sehen mit den Augen – und mit dem Gehirn. Die Augen nehmen optische Reize wahr, und das Gehirn macht daraus ein Bild.

Das Auge lässt sich in einigen Punkten mit einer optischen Kamera vergleichen. Bei den Stationen „Große Kamera“ oder „Reproduktionskamera“ kannst du sehen, wie eine Linse ein zweidimensionales Bild des Raumes auf eine Glasfläche projiziert. Auch im Auge befindet sich eine Linse (im Gegensatz zu den starren Glaslinsen mit veränderlicher Brennweite). Als Projektionsfläche dient die Netzhaut, die die Lichtreize in Nervenimpulse umwandelt. Unser Gehirn muss nun aus diesen Informationen, die ja lediglich auf einer zweidimensionalen Projektion beruhen, ein räumliches, also dreidimensionales Bild des Raumes erzeugen.

Wenn du mit beiden Augen abwechselnd blinzelst, kannst du erkennen, dass sich die wahrgenommenen Bilder beider Augen unterscheiden – je näher das betrachtete Objekt, umso größer ist der Unterschied. Indem das Gehirn die Sinneswahrnehmungen beider Augen verarbeitet und miteinander vergleicht, gewinnt es Informationen über die Entfernung verschiedener Objekte und kann so ein Bild des Raumes „konstruieren“ (im wahrsten Sinne des Wortes). Zum räumlichen Sehen sind also zwei Augen sehr hilfreich (du kannst ja mal versuchen, mit nur einem Auge Entfernungen zu schätzen.)

Doch wie entsteht die Illusion, das Pendel würde kreisen, wenn man mit einem Auge durch das abgedunkelte Glas schaut? Wenn Licht auf die Netzhaut des Auges fällt, wird dort in den Zellen ein elektrischer Impuls ausgelöst. Je nach Lichtintensität reagieren diese Fotorezeptorzellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit: Je mehr Licht, umso schneller wird der optische Reiz wahrgenommen. Wenn nun ein Auge durch das getönte Glas schaut, werden die von ihm ausgehenden Nervenimpulse im Gehirn etwas später verarbeitet, so dass die Sinneswahrnehmungen beider Augen zeitversetzt zusammengesetzt werden. Während dieser kurzen Zeitdifferenz (es handelt sich lediglich um wenige Millisekunden) hat sich das Pendel weiterbewegt. Aus diesen von den beiden Augen zu verschiedenen Zeiten wahrgenommen Reizen konstruiert das Gehirn eine räumliche Tiefe, die es so gar nicht gibt: Das Pendel sieht aus, als würde es im Raum kreisen.

Drehscheiben

Boxengasse

Versetze die Holzscheiben in eine langsame Drehbewegung und betrachte sie aus etwa 2 m Abstand.



- Welche Muster siehst du auf der Scheibe?
- Wie sieht das Muster aus, wenn die Scheibe sich dreht?

*„Wenn unsere
Vorstellung von der
Wirklichkeit sich ändert,
ändert sich dann auch
die Wirklichkeit?“*

Michael Ende

Es gibt eine Vielzahl sogenannter „optischer Täuschungen“, die uns irritieren, weil sie uns Dinge sehen lassen, die ganz offensichtlich „so nicht sein können“ und allen bisherigen Erfahrungen widersprechen. Solche Bilder sind mehr als nette Spielereien, denn sie zeigen uns, wie wir sehen. Ganz gleich, ob wir uns „getäuscht fühlen“ oder meinen, „völlig normal“ zu sehen: Die zugrundeliegenden Prozesse und Mechanismen sind stets dieselben.

Sehen ist die Aufnahme und Verarbeitung von optischen Reizen und beginnt im Auge, wo die Lichtreize in Nervenimpulse gewandelt werden, welche über den Sehnerv ins Gehirn gelangen. Hier entsteht nicht einfach ein „Abbild“, sondern in verschiedenen Bereichen des visuellen Cortex‘ (der Bereich der Großhirnrinde, der für die Verarbeitung optischer Reize zuständig ist) werden Teilinformationen (beispielsweise über Helligkeit, Kontrast oder Bewegung) einzeln analysiert, verglichen, bewertet und schließlich wieder zu einem Bild verbunden. Überdies findet ständig ein Vergleich mit bereits vorhandenen Bildern und Erinnerungen statt.

Unser Gehirn verfügt über zahlreiche Routinen, die die Verarbeitung und Bewertung beschleunigen und erleichtern. Bereits im 19. Jh. hat der Physiologe und Physiker Hermann von Helmholtz solche „unbewussten Schlüsse“ beschrieben, die auf Wahrnehmungserfahrungen beruhen:

Licht kommt meistens von oben

Gegenstände werden nicht von unten gesehen

Solche und ähnliche Mechanismen ermöglichen es uns, rasch und mit relativ wenigen Informationen ein inneres Bild der äußeren Welt zu konstruieren. Es sind die gleichen Mechanismen, die durch unsere Experimentierstationen irritiert und an ihre Grenzen gebracht werden. „Optische Täuschungen“ sind also keine Täuschungen im eigentlichen Sinne und haben auch nichts mit Optik, also physikalischen Prinzipien zu tun, sondern sind ausgewählte Extrembeispiele, die uns die Stärken und Schwächen unserer visuellen Wahrnehmung verdeutlichen können.

Ob man nun von „optischen Täuschungen“ oder von „visuellen Wahrnehmungsfehlern“ spricht: Irritierend sind sie allemal.

Drehscheibe ´Spirale´

Boxengasse

Versetze die Scheibe in eine langsame Drehbewegung.
Konzentriere deinen Blick etwa eine Minute auf das Zentrum der Spirale.
Blicke dann rasch auf einen unbewegten Gegenstand, z.B. auf die eigene Handfläche.
Was beobachtest du dort?
Was geschieht, wenn sich die Spirale in entgegengesetzter Richtung dreht?



- Was siehst du, wenn du aus einem fahrenden Zug schaust?

Eine der frühesten bekannten optischen Täuschungen wurde bereits vom griechischen Philosophen Aristoteles (384-322 v. Chr.) beschrieben: Die sogenannte „Wasserfall-Illusion“ entsteht, wenn man etwa eine Minute auf einen Wasserfall und anschließend auf das Ufer schaut: es bewegt sich scheinbar nach oben.

Wie bei der Station „Drehscheiben“ beschrieben, verfügt unser Gehirn über Wahrnehmungserfahrungen, die uns helfen, das, was wir sehen, schneller und besser zu verarbeiten und zu bewerten. Eine dieser Routinen befähigt uns, die Bewegung von Objekten „zu berechnen“ und somit unsere Umgebung als vollständiges, zusammenhängendes Bild wahrzunehmen, sogar wenn wir uns selbst bewegen. Tauben beispielsweise können dies nicht und nicken daher beim Laufen mit dem Kopf, um ihre eigene Vorwärtsbewegung mit einer Rückwärtsbewegung des Kopfes auszugleichen. Wenn du nun eine Weile auf die drehende Scheibe schaust, „rechnet“ dein Gehirn die Bewegung heraus. Dieser Mechanismus läuft noch kurzzeitig weiter, selbst wenn du schon auf eine unbewegte Fläche siehst: Diese scheint plötzlich in die entgegengesetzte Richtung zu rotieren.

Haus der Riesenzwerge

Außengelände

Zwei Personen stellen sich in jeweils eine Ecke des Raumes.
Die anderen schauen von außen in das Haus – wer von den beiden ist denn nun größer?



- Betrachte die Form des Raumes. Welche Winkel und Flächen kannst du sehen?
- Welche der beiden Personen steht näher bei dir? Welche sieht größer aus?

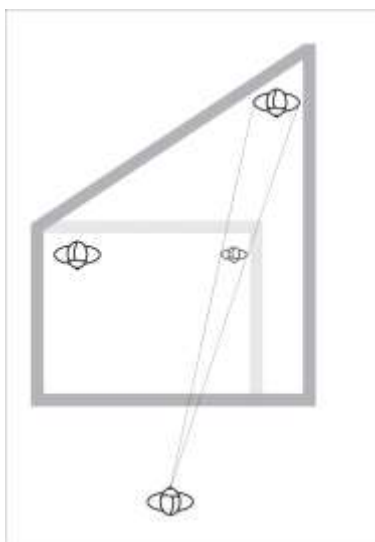
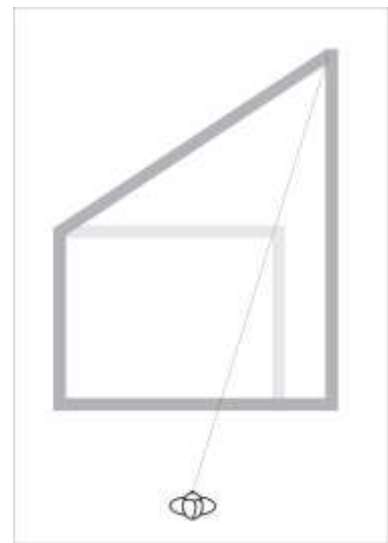
Die Konstruktion dieses Raumes geht auf den amerikanischen Augenarzt Adelbert Ames (1880 – 1955) zurück, der dabei vermutlich eine Idee Hermann Helmholtz' aufgriff.

Ganz praktische Anwendung findet diese visuelle Illusion in der Filmindustrie; so wurden in der Trilogie „Der Herr der Ringe“ die Szenen mit Hobbits und Menschen in trapezförmig verzerrten Kulissen gedreht, um Größenunterschiede zwischen den einzelnen Charakteren vorzutäuschen.

Das Haus der Riesenzwerg ist eine Station, an der man am Besten in einer Gruppe experimentiert. Wenn ihr euch vor die offene Seite des kleinen „Häuschens“ stellt und den vor euch liegenden Raum betrachtet, seht ihr, dass der Boden des Raumes schräg geneigt ist, die Seitenwände nicht im rechten Winkel zueinander stehen und fast alle Flächen trapezförmig sind. Wenn sich nun zwei Personen in die hinteren Ecken des Raumes stellen, verändert sich scheinbar deren Körpergröße: In der linken Ecke wird man zum Riesen, in der rechten zum Zwerg.

Die Ursachen hierfür sind zum einen die Wahrnehmung im Auge und zum anderen die Verarbeitung der wahrgenommenen Information durch das Gehirn. Wenn Licht in unser Auge fällt, entsteht lediglich ein zweidimensionales Abbild auf der Netzhaut. Räumliches Sehen erfordert den Vergleich der Informationen aus beiden Augen.

Bei der Verarbeitung dieser Informationen spielen unsere Wahrnehmungserfahrungen eine wesentliche Rolle: Die meisten geschlossenen Räume, Fenster und Türen, die wir bislang gesehen haben, sind rechtwinklig. Unser Gehirn interpretiert die wahrgenommene (zweidimensionale) Information und leitet daraus die wahrscheinlichste räumliche Anordnung ab – eben einen rechtwinkligen Raum.



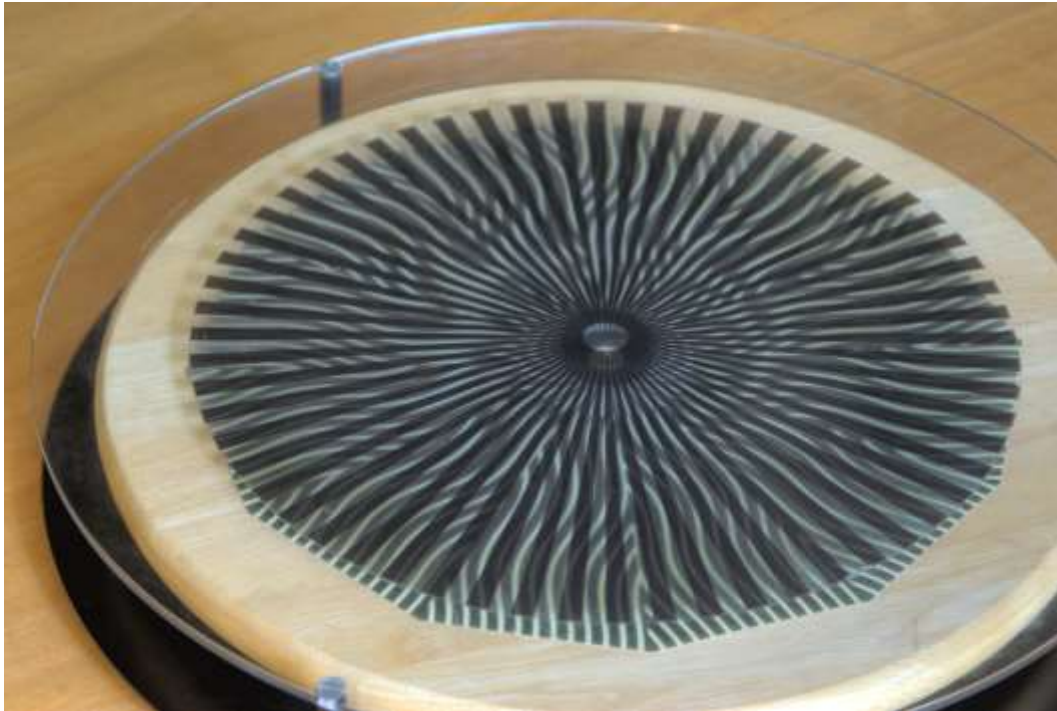
Stehen nun zwei Personen im Raum, so passt unser Gehirn deren Bild an die Interpretation eines rechtwinkligen Raumes an, selbst um den Preis, dass die wahrgenommene Körpergröße offensichtlich so nicht stimmen kann.

Diese Station veranschaulicht sehr deutlich, wie unser Gehirn Bilder anhand bisher gemachter Wahrnehmungserfahrungen interpretiert, und wie seine Wahrnehmungserfahrungen unter Umständen der gegenwärtigen Wirklichkeit widersprechen können. Wahrnehmung ist keine direktes Abbild der Wirklichkeit, sondern eine „Konstruktion“.

Moiré Effekt

Boxengasse

Zwei kontrastreiche Muster werden überlagert.
Was siehst du, wenn du die untere Scheibe langsam drehst?



- Dreh die Scheibe langsam nach rechts.
Was für ein Muster siehst du? Wie bewegt es sich?
- Was passiert, wenn du die Scheibe in die andere Richtung drehst?

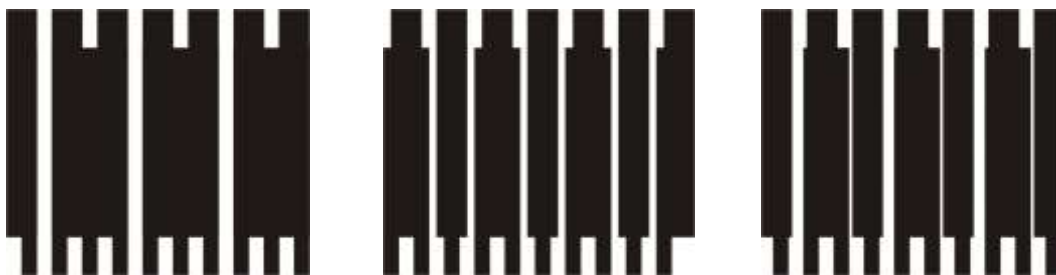
Kaufleute prüften anhand der Muster, die durch das Übereinanderlegen feiner Stoffe und Seiden (französisch „moiré“) entstehen, deren Webqualität.

Zwei Zaunfelder, die hintereinander stehen, mehrere Stofflagen übereinander: Wenn sich periodische Muster überlagern, kannst du den sogenannten Moirée-Effekt beobachten, ein größeres, aber dennoch regelmäßiges Muster, das an den Kreuzungen kontrastreicher Kanten entsteht. Aus zwei periodischen Mustern entsteht ein drittes; diesen Vorgang mag dir folgendes Beispiel erläutern:

Stell dir vor, du schaust durch einen Lattenzaun auf eine gestreifte Wand (der Einfachheit halber wollen wir annehmen, dass der Abstand zwischen den Streifen genau so groß ist wie der Abstand zwischen den Latten und die Streifen doppelt so breit sind wie die Latten):



In den Zwischenräumen des Zauns kannst du nun schwarze und weiße Streifen der Wand sehen; die Muster überlagern sich und ergeben je nach Blickrichtung verschiedene neue periodische Muster:



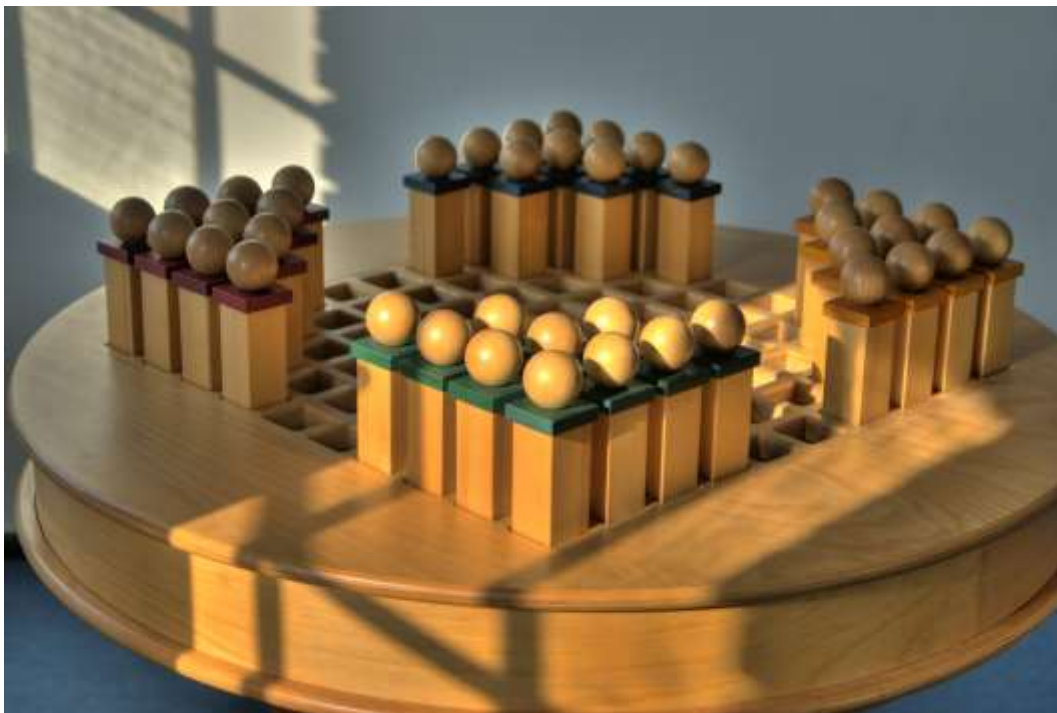
Überdies kommt hier auch wieder unser Gehirn mit ins Spiel: unser visuelles System ist darauf trainiert, Linien zu erkennen oder Linien aus einer Anordnung von Punkten zu konstruieren; kein Wunder, dass wir manchmal Muster sehen, wo gar keine sind.

Hörbar

110-kV

Die Holzkörper sind paarweise mit verschiedenen Materialien gefüllt, fünf Paare für jede Farbe.

Jedes Paar gibt es noch mal bei einer anderen Farbe– hör genau hin und finde es heraus!



- Such dir Holzkörper einer Farbe und finde die fünf Paare
Womit könnten die Holzkörper gefüllt sein?
- Such das Geräusch nun bei den Holzkörpern einer anderen Farbe.
Versuche ein Geräusch so beschreiben, dass es auch dein Partner findet!

Die Holzkörper sind aus Fichte gefertigt. Im Instrumentenbau wird dieses weiche und leichte Holz bevorzugt für die „Decken“ von Violinen und Gitarren verwendet, wo es den Schall vom Steg aufnimmt und als Resonanzkörper dient.

Wie beim Bildermemory gilt es bei der „Hörbar“, Paare zu finden; allerdings sollst du sie hier anhand des Geräusches identifizieren. Das laute Klappern der Holzperlen hörst du vermutlich sofort, bei anderen Holzkörpern muss man schon genau horchen, um festzustellen, ob da überhaupt etwas anderes als Luft drin ist.

Bei der Hörbar musst du dich ganz auf dein Gehör verlassen; dem Sinnesorgan für „bewegte Luft“. Was wir als Schall, Geräusch, Klang, Ton oder Knall hören: All dies sind Dichteänderungen der Luft. Bei regelmäßigen Dichteänderungen hören wir einen klaren Ton, dessen Höhe von der Frequenz, also der Anzahl der Schwingungen pro Sekunde abhängt.

Frequenz (Hz=1 /s)	Ton
20	Tiefster wahrnehmbarer Ton
440	„Kammerton“ a
<20000	Höchster wahrnehmbarer Ton

Ein Geräusch ist aus Schwingungen vieler verschiedener Frequenzen zusammengesetzt, die von unseren Ohren einzeln wahrgenommen und unterschieden werden können. Im härtesten Knochen unseres Körpers, dem Felsenbein, befindet sich das Innenohr mit der schneckenförmigen Cochlea. Hier wandeln winzig feine Haarsinneszellen den Schall in Nervenimpulse; für jede einzelne Frequenz gibt es spezifische Sinneszellen. Die Informationen zu Höhe, Intensität und Dauer der einzelnen Frequenzen werden in verschiedenen Teilen unseres Gehirns analysiert, verglichen und schließlich wie der zusammengesetzt: – aus komplexen Frequenzmustern entstehen so für uns Geräusche, Töne und Klänge.

Dauerwelle

110-kV

Versetz die Trommel in Drehung.

Zupf an einem Gummiseil und betrachte es.

Was beobachtest du, wenn sich die Trommel langsamer oder schneller dreht?



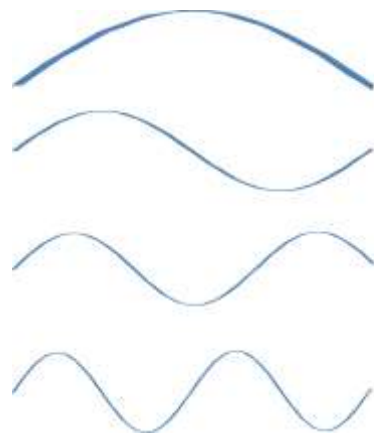
- Zupf eine Saite an. Was kannst du sehen? Was kannst du hören?
- Was siehst du, wenn sich die Trommel dreht?
- Was passiert, wenn sich die Trommel langsamer dreht?
- Wie unterscheiden sich die Saiten voneinander?

Der Stroboskop-Effekt hat eine Vielzahl technischer Anwendungen. So wird bei hochwertigen Plattenspielern die Drehgeschwindigkeit des Plattentellers mit Hilfe des Stroboskop-Effekts justiert. Ebenso können damit Drehzahlen rotierender Maschinen oder Fehler an rotierenden Teilen ermittelt werden.

Wenn du eine schwingende Saite betrachtest, siehst du normalerweise nicht viel. Ganz anders, wenn du die Saite vor dem Hintergrund eines schnell wechselnden Schwarz-Weiß-Musters siehst: Wenn du die Trommel der Dauerwelle in Bewegung setzt, scheint die Saite plötzlich in einer Wellenform stillzustehen.

Die schwarzen Gummiseile, die als Saiten dienen, sind vor den schwarzen Flächen der Trommel fast unsichtbar und können nur vor den dünnen weißen Streifen im Hintergrund gesehen werden. Wenn die Trommel rotiert, siehst du also eigentlich eine Abfolge von Einzelbildern, die zu einer fortlaufenden Bewegung zusammengesetzt werden (nach dem gleichen Prinzip funktionieren die Stationen „Lebensräder“ und „Wundertrommel“). Zupfst du nun die Saite vor der rotierenden Trommel an, so ist bei bestimmten Drehgeschwindigkeiten eine stehende Welle zu erkennen. Je schneller sich die Trommel dreht, umso größer ist die Wellenlänge; hingegen sind bei langsam rotierender Trommel viele Wellen mit kleiner Wellenlänge zu erkennen.

Eine schwingende Saite, sei es bei einer Gitarre, einer Violine oder hier bei der Dauerwelle, bewegt sich so schnell (100 ... 10000 mal pro Sekunde), dass wir ihre Bewegung mit bloßem Auge nicht verfolgen können. Zudem setzt sich diese Bewegung aus verschiedenen Einzelschwingungen zusammen, die sich überlagern. Die Tonhöhe des Grundtons hängt dabei von der Wellenlänge der einfachen Schwingung ab: Je länger die Welle, desto kleiner die Frequenz und desto tiefer der Ton. Die Obertöne (also doppelte, dreifache...Schwingung) ergeben in ihrer Summe die charakteristische Klangfarbe eines Instrumentes.



Wenn nun die Trommel so schnell rotiert, dass die Frequenz der weißen Streifen mit den Schwingungsfrequenz der Saite übereinstimmt (genau gesagt, mit deren ganzzahligen Vielfachen), siehst du die Saite vor dem weißen Streifen in immer genau der gleichen Position, d.h. das Bild „steht“.

Dieser Stroboskop-Effekt – also der scheinbar verlangsamte Ablauf von periodischen Prozessen – tritt immer dann auf, wenn ein periodisches Ereignis (z.B. die schwingende Saite oder ein sich drehendes Wagenrad im Film) in regelmäßig aufeinander folgenden Abständen beleuchtet wird. Wenn die Drehgeschwindigkeit der Trommel allerdings aufgrund der Reibung abnimmt, sind die Frequenz der weißen Streifen und die Schwingungsfrequenz nicht mehr synchron, so dass das Bild wandert und schließlich verschwimmt.

„Haste Töne“– Monochord

110-kV

Fünf Saiten sind auf den gleichen Ton gestimmt. Wie ändert sich der Ton, wenn die Saitenlänge in ganzzahligen Verhältnissen geteilt wird?

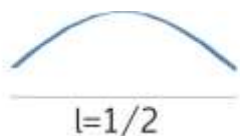
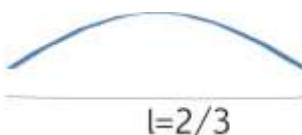
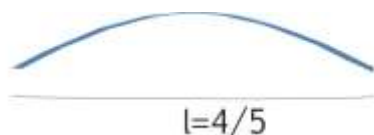


- Wie klingen die ungeteilten Saiten?
- Teile eine Saite mit einem Steg. Verändert sich der Ton?
- Teile die Saiten in ganzzahligen Verhältnissen. Nimm dazu die Leisten zu Hilfe. Was hörst du?

Der griechische Philosoph und Mathematiker Pythagoras vom Samos (ca. 570 bis 510 v.Chr.) gilt als der Begründer der mathematischen Betrachtung von Tönen und Musik. Er soll auch die Begriffe „Philosoph“ und „Kosmos“ erfunden haben. Allerdings hat er selbst keinerlei Aufzeichnungen hinterlassen.

Die Idee, mit schwingenden Saiten Klänge zu erzeugen, findet sich in vielen menschlichen Kulturen und hat eine Vielzahl verschiedener Musikinstrumente hervorgebracht. Auch bei den Stationen „Dauerwelle“ und „Monochord“ handelt es sich um Saitenschwinger, doch während du bei der „Dauerwelle“ die tiefen Töne der dicken Seile kaum wahrnehmen kannst, sind sie bei den fünf Saiten des Monochordes klar und laut zu hören. Zupfst du die ungeteilten Saiten an, so stellst du fest, dass alle gleich klingen (wenn nicht, solltest du unsere Mitarbeiter bitten, das Monochord zu stimmen). Wenn du nun eine Saite an einer beliebigen Stelle mit dem Holzsteg teilst, so wird der Ton höher; wie du durch den Vergleich mit einer ungeteilten Saite feststellen kannst. Allerdings kann es sein, dass du den gemeinsamen Klang beider Töne als nicht besonders angenehm, sondern eher unschön empfindest.

Dies ändert sich, wenn du die Saite in ganzzahligen Verhältnissen teilst, wobei dir die Holzleisten dienlich sind. Derart geteilte Saiten harmonieren miteinander, sie klingen für unser Ohr angenehm; und tatsächlich benutzt die abendländische Musik fast ausschließlich Tonreihen, die durch die ganzzahlige Saiten- und Schwingungsverhältnisse entstehen:

Tonintervall			
1:1	Grundton	die ganze Saite schwingt	
1:2	Oktave	1/2 der Saitenlänge schwingt	
2:3	Quinte	2/3 der Saitenlänge schwingen	
3:4	Quarte	3/4 der Saitenlänge schwingen	
4:5	Terz (groß)	4/5 der Saitenlänge schwingen	

„Haste Töne“– Gewichtsmonochord

110-kV

Eine Saite wird durch ein Gewicht gespannt. Wie ändert sich die Tonhöhe, wenn das Gewicht größer oder kleiner wird?



- Zupf die Saite. Welchen Ton hörst du? Versuch, ihn nachzusummen.
- Leg ein Gewicht auf die Halterung. Wie ändert sich der Ton?

Wenn sich beim Stimmen von Saiteninstrumenten eine Saite nicht mehr klangrein machen lässt, ist dies oft ein Anzeichen für Materialermüdung. Die Spannung lässt nach, der Ton wird immer tiefer - höchste Zeit, die Saite zu wechseln, ehe sie reißt!

An der Station „Monochord“ kannst u du hören, wie die Tonhöhe einer schwingenden Saite von deren Länge abhängt.

Wie nun die Tonhöhe von der Saitenspannung abhängt, kannst du am Gewichtsmonochord herausfinden. Wenn du den Anfangston summsst, ehe du ein Gewicht auflegst, kannst du die Tonunterschiede besser wahrnehmen.

Je mehr Gewichte du auflegst, umso höher wird der Ton. Die Tonhöhe ist demnach nicht nur von der Saitenlänge (und Saitendicke), sondern auch von der Saitenspannung abhängig.

Dieses Prinzip macht man sich beim Stimmen von Saiteninstrumenten zu nutze. Bei den meisten dieser Instrumente sind die Enden der Saiten um drehbare Holzpflocke oder Metallstifte gewickelt. Mit diesen „Wirbeln“ wird die Spannung der Saiten und somit die Tonhöhe verändert.

„Haste Töne“– Orgel

110-kV

An diesem Orgelmodell ist alles zu erkennen, was zu einer richtigen Orgel gehört: Schöpfbalg, Magazinbalg, Windlade und Tasten für die verschiedenen Pfeifen.

Welche Rolle spielen die Maße der Pfeifen (Mensur) für die Tonhöhe?



- Pump den Balg mit dem Hebel.
- Mit den Holzknöpfen kannst du die einzelnen Pfeifen bedienen. Welche Unterschiede zwischen den Pfeifen hörst und siehst du?

Bevor sich elektrische Gebläse durchsetzten, wurden neben einem Orgelspieler ein „Kalkant“ benötigt, der den „Balg trat“ und so für den nötigen „Wind“ sorgte. Am Spieltisch der Orgel befand sich oft ein sogenannter „Kalkantenruf“, der ein kleines Glöckchen erklingen ließ als Aufforderung für den Kalkanten, mit der Arbeit zu beginnen.

Töne können nicht nur mit Saiten erzeugt werden. Flöte, Fagott, Akkordeon oder Tuba gehören zu den „Aerophonen“, das sind Instrumente, bei denen eine Luftsäule zum Schwingen gebracht wird. Auch die Pfeifen einer Orgel sind „Luftschwinger“, und wie Pfeifenform und Tonhöhe zusammenhängen, kannst du an dem Orgelmodell herausfinden.

Bei genauerer Betrachtung siehst du viele Teile, die auch an einer „echten“ Orgel zu finden sind. Am auffälligsten sind die Holzpfeifen, die nebeneinander auf der „Windlade“ angeordnet sind. Die Pfeifen werden durch die Holzknöpfe bedient – bei einer großen Orgel durch Tasten – die die Luftzufuhr zu den Pfeifen öffnen. Der „Wind“ wird durch die beiden Blasebälge erzeugt: Mit dem langen Hebel rechts betätigst du den kleinen unteren Balg (den sogenannte Schöpfbalg) und füllst so den großen oberen Balg, den Magazinbalg, der für einen gleichmäßigen Luftdruck sorgt.

Schau und hör dir nun die Pfeifen genauer an: Wenn die Windlade gefüllt ist und du die entsprechenden Knopf drückst, strömt die Luft auf die scharfe Kante der Pfeifenöffnung (das Labium) und bringt die Luftsäule im Pfeifenrohr zur Schwingung. Die große Pfeife erzeugt den tiefsten Ton (auch beim Monochord klingt die ungeteilte Saite am tiefsten). Wenn du die Abstände zwischen Labium und Pfeifenoberkante vergleichst, stellst du fest, dass die Länge der schwingenden Luftsäule bei der großen Pfeife genau doppelt so groß ist wie bei den beiden kleinsten Pfeifen. Doch nur eine der Pfeifen klingt genau eine Oktave höher: Reine Intervalle erhält man nur, wenn sowohl sich Pfeifenlänge als auch Pfeifenquerschnitt im gleichen Verhältnis ändern; der Orgelbauer bezeichnet dieses Verhältnis als Weitenmensur. Die vier Pfeifen rechts vom tiefen Grundton haben alle die gleiche Mensur, so dass du die schon vom Monochord bekannten Intervalle Terz, Quarte, Quinte und Oktave hören kannst. Die beiden großen Pfeifen rechts haben die gleiche Länge, aber andere Mensuren als der Grundton und klingen nicht nur hinsichtlich der Tonhöhe, sondern auch der Klangfarbe anders.

Mit dem Knopf ganz links bedienst du die variable Pfeife am hinteren Teil der Orgel. Solche Pfeifen sind an einer normalen Orgel eher unüblich, wurden jedoch gern als Soundeffekt in Slapstick-Filmen verwendet (gewöhnlich an der Stelle mit der Torte...). Mit dem Schieber kannst du die Pfeifenlänge verändern und so die Töne der anderen Pfeifen suchen oder nach einiger Übung sogar kleine Melodien spielen.

Klangmikroskop

110 kV-Halle

Zieh einen Handschuh an.

Umfasse eine Aluminiumstange mit Daumen und Zeigefinger und streiche langsam von innen nach außen. Variiere dabei Druck und Geschwindigkeit.



- Wo gelingt es dir am besten, Töne zu erzeugen?
- Wie unterscheiden sich die Töne der verschiedenen Stangen voneinander?
- Horch entlang der oberen Stange. Wo klingt der Ton am lautesten?
- Berühre eine klingende Stange ganz sanft mit der Fingerkuppe. Was spürst du? Was spürst du, denn nur deinen Finger auf die runde Fläche einer klingenden Stange legst?

Diese Station wurde von dem Dresdner Musiker Jan Heinke gebaut, der mit seinen ebenfalls von ihm gebauten Stahlcelli und Stahlharfen einen ganz eigenen, mit „klassischen“ Instrumenten kaum vergleichbaren Klang erzeugt.

Ob Geige, Ukulele oder Waldzither: Bei den meisten Saiteninstrumente sind die Saiten auf einen Korpus gespannt, der als Resonanzkörper dient und die von den schwingenden Saiten erzeugten Töne weiterleitet und verstärkt. Auch beim Klangmikroskop kann man einen ähnlichen Aufbau erkennen: Am Aluminiumprofil wird der Ton erzeugt, durch die Edelstahlbleche wird er verstärkt.

Wenn du jedoch versuchst, dem Instrument Töne zu entlocken, stellst du fest, dass sich das „Klangmikroskop“ grundlegend von Saiteninstrumenten unterscheidet: Diese werden üblicherweise gezupft (Gitarre), angeschlagen (Klavier) oder quer zur Saitenrichtung gestrichen (Geige). All dies führt dazu, dass die Saite quer zu ihrer Längsachse in Schwingung gerät (wie du bei der Station „Dauerwelle“ sehen kannst); in der Physik heißen solche Schwingungen „Transversalwellen“.

Beim „Klangmikroskop“ streichst du hingegen in Längsrichtung über das Profil. Da der Gummihandschuh sehr klebrig ist, bleibt er immer wieder an der Oberfläche hängen, um kurz darauf ein Stück weiter zu rutschen, bis er wieder kleben bleibt. Mit dem richtigen Druck, der richtigen Geschwindigkeit und etwas Übung gelingt es dir, die Abfolge von Klebenbleiben und Weiterrutschen so schnell und regelmäßig zu gestalten, dass das Aluminiumprofil zum Schwingen angeregt wird. Diese Schwingung findet in Längsrichtung statt, der Physiker spricht hier von Longitudinalwellen. Du kannst es sogar hören, wenn du dein Ohr direkt an das Stangenende hältst: Hier ist der Ton am lautesten.

Es gibt kaum Musikinstrumente, die Longitudinalwellen zur Tonerzeugung nutzen. Ein Beispiel ist die vom amerikanischen Physiker Benjamin Franklin (1706–1790) entwickelte Glasharmonika, die trotz ihrer früheren Popularität heute weitgehend in Vergessenheit geraten ist.

Hör-Lampe/Hörspiegel-Ohren

110 kV-Halle

Nimm die Hörspiegelohren an den Holzgriffen in die Hand. Halte dir die Kugeln an beide Ohren und lauf durch den Raum!
Halt dein Ohr an die kugelförmigen Lampen.
Was kannst du hören?



- Stell dich in den Raum. Was hörst du?
- Was hörst du, wenn du das Ohr an die Kugelöffnungen hältst?
- Klingen alle Kugeln gleich?
- Was hörst du, wenn du deine gewölbte Hand über das Ohr hältst?

Das „Rauschen“ in kugelförmigen Hohlkörpern wird „Helmholtz-Resonanz“ genannt, nach Hermann von Helmholtz (1821 – 1894), einem der berühmtesten und vielseitigsten Wissenschaftler seiner Zeit. Da Physik zu seiner Jugendzeit als „brotlose Kunst“ galt, studierte Helmholtz zunächst Medizin, bis sein Interesse an den Verbindungen zwischen der physikalischen Natur der Dinge und ihrer Wahrnehmung durch die Sinnesorgane ihn schließlich doch zum Professor für Physik werden ließ.

Sicher hast du schon einmal dein Ohr an eine Muschel gehalten und „das Meer rauschen hören“. Nicht nur reine Muschel, auch eine Tasse, eine Blumenvase oder sogar deine gewölbte Hand, erzeugen, wenn sie über das Ohr gestülpt werden, ein mehr oder weniger vernehmliches Geräusch. Sehr eindrücklich ist dies bei kugelförmigen Körpern mit kleinen Öffnungen, wie den Hörlampen oder den Hörspiegelohren. Hier kannst du – vor allem bei den großen Kugeln – ein deutliches Rauschen hören. Um herauszufinden, woher dieses Geräusch eigentlich kommt, solltest du erst einmal mit offenen Ohren lauschen. Du wirst feststellen, dass es eigentlich nie ganz still ist (in der großen Halle schon gar nicht). Meist nehmen wir leise und gleichmäßige Umgebungsgeräusche zwar nicht mit gezielter Aufmerksamkeit, aber doch als selbstverständlichen Hintergrund wahr. Wenn sie fehlen, beispielsweise in „schalltoten Räumen“ fühlen wir uns schnell unwohl.

Ein gleichmäßiges leises Rauschen, das aus Schallwellen verschiedenster Wellenlängen besteht, wird von uns ausgeblendet, da keine Wellenlänge besonders hervortritt. In gewohnter Umgebung, etwa zu Hause im Wohnzimmer, kann sogar das regelmäßige Ticken einer Uhr in diesem Geräuschhintergrund „verschwinden“.

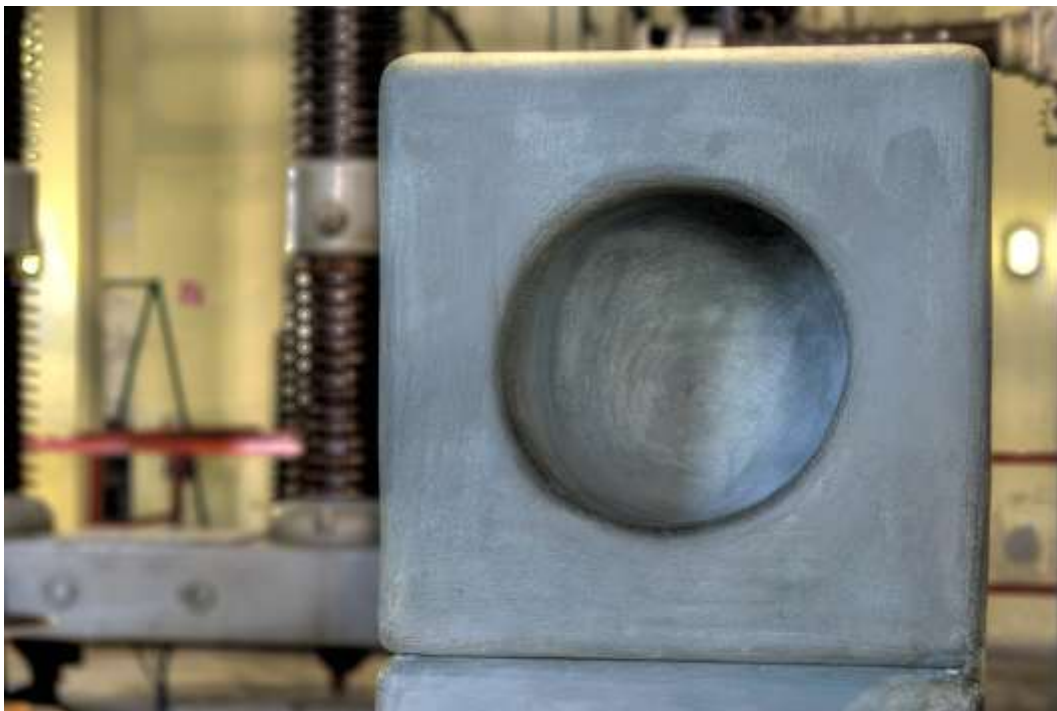
Wenn Schallwellen jedoch in Hohlkörper wie eine Muschel oder die kugelförmigen Lampenschirme gelangen, wirken diese für eine bestimmte Wellenlänge als Resonanzkörper. Durch wiederholte Schallreflexion wird diese eine Wellenlänge gegenüber allen anderen verstärkt und ist so für uns als deutlicher Klang hörbar. Welche Wellenlänge dies ist, hängt vom Durchmesser des Hohlraums und der Größe des Schallochs ab. Jeder Hohlkörper hat seine ganz besondere, durch Form und Größe vorgegebene Eigenfrequenz; doch vereinfacht kann man sagen: Je größer der Resonanzkörper, umso größer die Wellenlänge und umso tiefer der Klang.

Dies kannst du bei den Hörlampen überprüfen: Bei genauem Hinhören stellst du fest, dass die große Kugel tiefer klingt als die kleine.

Summsteine

110 kV-Halle

Steck deinen Kopf in eine der Ausbuchtungen des Summsteins und summe dabei verschiedene Töne vor dich hin: laute, leise, hohe, tiefe, klare oder schräge Töne! Ein Partner kann während dieser Experimente seine Hände leicht auf deine Schultern legen.



- Was hörst du, wenn du in der Öffnung summst?
Was fühlst du?
- Probiere verschiedene Tonhöhen. Klingen alle gleich?
- Was spürt dein Partner, wenn er die Hände auf deine Schultern legt?

Dieses Experiment entwarf der Tischler, Künstler und Pädagoge Hugo Kükelhaus (1900-1984) für sein „Erfahrungsfeld zur Entfaltung der Sinne“. Dazu inspiriert hatten ihn steinzeitliche Kultstätten auf der Insel Malta, über deren Wirkung er wie folgt schreibt: *„Die innere Massage durch die Schwingungen, die im Kopf erzeugt und über ihn wieder aufgenommen werden, stellen eine ungewohnt intensive Verbindung des ganzen Leibes von innen her dar.“*

Während du bei den Hörlampen nur dein Ohr dran hältst, steckst du bei den Summsteinen mitten drin im Resonanzkörper. Das Loch im Stein wirkt als Resonanzkörper für Schall bestimmter Wellenlängen. Hier werden allerdings nicht nur – wie bei den Hörlampen – Teile des Hintergrundgeräusches verstärkt, sondern bestimmte Frequenzen deiner eigenen Stimme. Welche das sind, probierst du am besten selbst aus. Wenn du verschiedene hohe und tiefe Töne sumbst, gelingt es dir vielleicht, das von Hugo Kükelhaus folgendermaßen beschriebene Phänomen zu erfahren: *„Mit der spürbaren Vibration im Schädel, die beim Summen unter gleichzeitig durch die Nase geschöpftem Atem eintritt, versorgt sich das Gehirn mit elektrischer Energie, die die lebendige Wirkung der gesprochenen Sprache ausmacht.“*

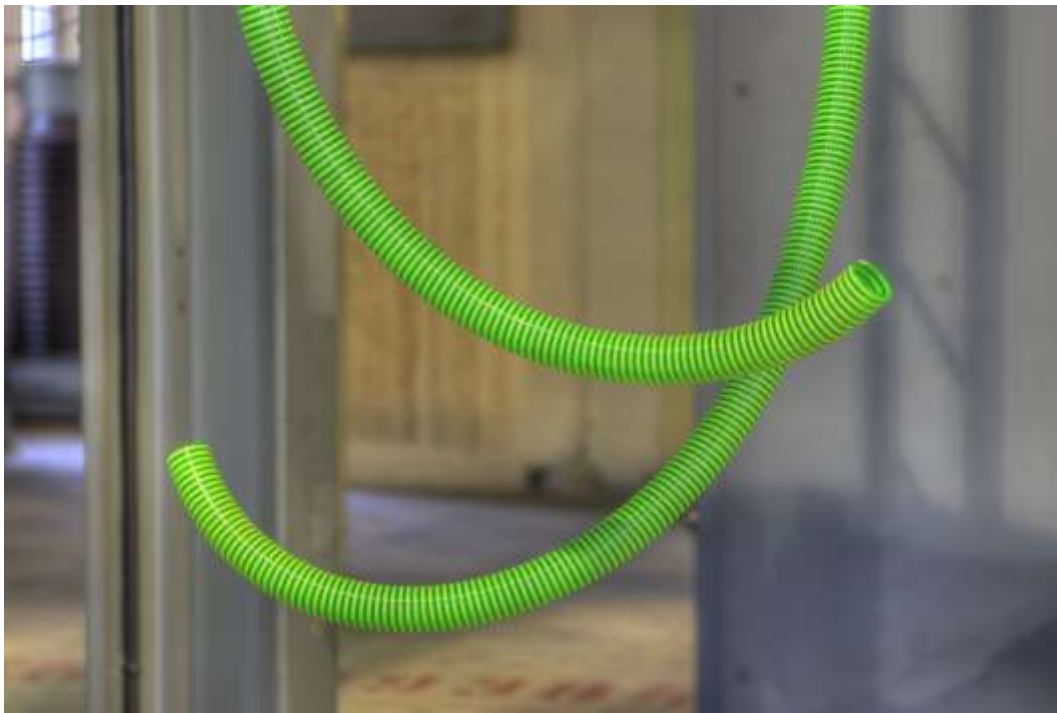
(alle Zitate aus: Hugo Kükelhaus, Rudolf zur Lippe; Entfaltung der Sinne Ein „Erfahrungsfeld“ zur Bewegung und Besinnung, Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt am Main, 1982)

Stereo-Sound

110 kV-Halle

Halte den Schlauch mit beiden Enden an die Ohren! Was kannst du hören, wenn du selbst sprichst oder singst?

Bitte einen Partner, leicht auf den Schlauch zu klopfen oder an ihm zu kratzen.



- Was hörst du, wenn du den Schlauch an ein Ohr oder an beide Ohren hältst?
- Kannst du hören, ob dein Partner links oder rechts an den Schlauch klopft?
- In welchem Abstand von der Mitte muss dein Partner mindestens an den Schlauch klopfen, damit du einen Unterschied hörst?

Der Mensch besitzt wie alle Säugetiere Muskeln zum Bewegen der Ohrmuscheln, die Fähigkeit, mit den Ohren zu wackeln, ist bei ihm aber nur sehr schwach ausgeprägt. Zur Ortung von Schallquellen bewegen Menschen daher den ganzen Kopf, im Gegensatz beispielsweise zu Rehen, die ihre „Lauscher“ unabhängig und sogar entgegengesetzt zueinander ausrichten können.

Ein Ruf im Wald oder ein herannahendes Auto: Manchmal ist es nicht nur wichtig, WAS du hörst, sondern auch, WOHER das Geräusch kommt. Der Mensch verfügt über verschiedene Mechanismen, eine Schallquelle zu orten. Dies beginnt bereits bei den Ohrmuscheln, die nicht einfach nur Schalltrichter, sondern eine bei jedem Menschen individuelle Konstruktion aus Falten, Hügel und Ausbuchtungen sind. Hochfrequenter Schall wird, je nachdem aus welcher Richtung er kommt, in den „Tälern“ der Ohrmuscheln unterschiedlich reflektiert und weitergeleitet, so dass viele kleine Echos erzeugt werden, deren „Muster“ sich je nach Ort der Schallquelle unterscheiden.

Zudem ermittelt unser Gehirn die „Laufzeitdifferenz“ zwischen den Ohren, d.h. der Zeitunterschied in der Schallwahrnehmung zwischen beiden Ohren. Vielleicht du hast deinen Partner gebeten, an verschiedenen Stellen an den Schlauch zu klopfen. Nehmen wir an, du könntest einen Rechts-links-Unterschied hören, wenn dein Partner 10 cm links von der Mitte an den Schlauch geklopft hat, d.h. der Abstand der Schallquelle zu deinem linken Ohr ist 20 cm länger als der Abstand zu deinem rechten Ohr. Der Zeitunterschied zwischen dem Hörereignis am linken und am rechten Ohr beträgt lediglich $6/10000$ Sekunden; diese kurze Differenz reicht aus, damit dein Gehirn die Richtung der Schallquelle orten kann. (Du kannst dies selbst ausrechnen: Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt etwa 340 m/s, d.h. in 3 s legt der Schall etwa 1 km zurück; für 20 cm (0,2 m) benötigt er also $0,2 \text{ m} / 340 \text{ m/s} = 0,6 \text{ ms}$)

Die Fähigkeit der Schallortung ist allerdings sowohl von der Richtung als auch von der Frequenz und Intensität des Schalls abhängig. In der Horizontalen können wir Geräusche auf 1–2 Grad genau orten. Kommt ein Geräusch allerdings genau von oben, können wir es eher schlecht lokalisieren. Lediglich bei tiefen Frequenzen gelingt uns dies auf maximal 4 Grad genau.

Meister im Richtungshören sind die Eulen. Als nachtaktive Jäger sind sie darauf angewiesen, Schallquellen so genau wie möglich zu orten. Manche Arten können dies mit einer Genauigkeit von 1 Grad in alle Richtungen, da sie einen asymmetrischen Schädel haben, bei dem ein Ohr höher als das andere sitzt.

Tastbar

110 kV-Halle

Die Oberflächen dreier Würfel sind mit unterschiedlichen Materialien gestaltet. Die gleichen Materialien sind auf den Drehtischen sehen.
Kannst du ertasten, welche Oberflächen zusammen gehören?



- Wie fühlen sich die Oberflächen an?
- Um welche Materialien könnte es sich handeln?
- Versuche, die Materialien mit dem Handrücken oder dem Unterarm zu tasten.
- Kannst du deinem Partner eine Oberfläche so beschreiben, dass er sie auf dem Drehtisch wiederfindet?

Die Tastschärfe - das ist der gerade noch fühlbare Abstand zwischen zwei Nadelspitzen - ist von Person zu Person sehr verschieden. Sie liegt bei Jugendlichen und blinden Menschen bei ca. 1,5 mm. In Alter lässt sie bei Sehenden auf etwa 4 mm nach. Allerdings ist Tastschärfe trainierbar: Beispielsweise haben Instrumentalmusiker auch im hohen Alter zumeist noch „jugendliche Werte“.

Die Haut ist unser größtes Organ. Mit ihr nehmen wir haptische Reize wahr, also Information darüber, wie sich Dinge anfühlen. Während Sehen, Hören, Riechen und Schmecken auf einzelne Teile des Körpers (nämlich Auge, Ohr, Nase und Mund) begrenzt sind, ist unsere gesamte Körperoberfläche ein einziges Sinnesorgan mit unterschiedlichen Sinneszellen für Druck-, Berührungs-, Temperatur und Schmerzreize.

Allerdings sind nicht alle Bereiche der Haut gleich sensibel. Die „Meissner-Körperchen“, die als „Druckrezeptoren“ mechanische Reize wahrnehmen, finden sich lediglich auf der unbehaarten Haut, vor allem auf den Fingerbeeren, die besonders tastempfindlich sind. Wenn du mal versuchst, Oberflächen mit deinem Unterarm zu ertasten, wirst du feststellen, dass es dir wesentlich schwerer fällt, Konturen zu fühlen und zu unterscheiden. Unsere Finger hingegen sind nicht nur sehr empfindlich, sondern auch sehr beweglich sind und können somit Objekte auch aktiv ertasten, drücken oder umfassen. Nicht von ungefähr bezeichnet man daher eine besondere Feinfühligkeit in den verschiedensten Bereichen als „Fingerspitzengefühl“.

Balance Bretter

110 kV-Halle

Versuche auf dem Holzkreuz zu stehen, ohne dass ein Querbalken den Boden berührt. Schaffst du es, auf der Scheibe so zu balancieren, dass die Kugel entlang der eingefrästen Rille rollt?
Gelingt dir dies auch mit einem Partner?



- Gelingt dir das Balancieren besser mit offenen oder geschlossenen Augen?

Der erste Sinn, den ein Embryo im Mutterleib entwickelt, ist die Wahrnehmung der Schwerkraft. Bereits zwischen der sechsten und achten Schwangerschaftswoche beginnt die Entwicklung des Gleichgewichtsorgans. Die dazugehörigen Nervenbahnen gelten als „Wegbereiter“ für die Entwicklung der anderen Wahrnehmungssysteme.

Vielleicht ist dir die Redewendungen „alle fünf Sinne beieinanderhaben“ geläufig. Bereits der antike Philosoph Aristoteles (384–322 v. Chr.) beschrieb Sehen, Hören, Schmecken, Riechen und Tasten als die einzigen Formen der sinnlichen Wahrnehmung.

Um allerdings die Balance zu halten, reichen diese Sinne nicht aus. Hier kommt es vor allem darauf an, wahrzunehmen, wie sich das Brett und du bewegen oder welche Muskeln gerade angespannt sind. Diese Sinneseindrücke von Körperlage und -bewegung im Raum werden als „Propriorezeption“ – also Eigenwahrnehmung – bezeichnet. Daran sind verschiedene Sinnesorgane beteiligt. Entscheidend wichtig ist das Gleichgewichtsorgan. Es befindet sich neben dem Innenohr im Felsenbein und besteht im Wesentlichen aus drei flüssigkeitsgefüllten Bogengängen, die in jeweils eine Raumrichtung orientiert sind. Die Oberflächen der Bogengänge sind mit bewegungsempfindlichen Sinneszellen bedeckt. Bei einer Bewegung des Kopfes strömt die träge Flüssigkeit entgegen der Beschleunigungsrichtung an den Sinneszellen vorbei und löst so einen Reiz aus. Da die Bogengänge jeweils senkrecht aufeinander stehen, kann das Gehirn aus den Nervenimpulsen der einzelnen Sinneszellen Informationen über Richtung und Stärke der Bewegung gewinnen.

Dabei reagiert das Gleichgewichtsorgan nur auf Geschwindigkeits*änderungen*, gleichförmige Bewegungen werden hingegen nicht registriert. Sonst könnten wir vielleicht fühlen, wie die Erde sich dreht...

Seekrank

Boxengasse

Balanciere auf einem Bein und konzentriere Dich dabei auf die gestreifte Wand.
Nun versetzt dein Partner die Wand in seitliche Schwingungen.



- Wie lange gelingt es dir, auf einem Bein stehen?
- Was passiert, wenn du die Augen schließt?

„Die Seekrankheit ist nichts als die Wirkung der ungewöhnlich heftigen Bewegung, der man nicht Einhalt tun kann. Man hat ähnliche Erscheinungen genug auf dem Lande. Reiten und Fahren, vorzüglich rücklings, Schaukeln, Karusselldrehen und ähnliche gymnastische Übungen sind die besten Vorbereitungen zu Seereisen. Die nächsten Vorkehrungen sind, wenig essen und hart und kalt, und wenig trinken und kalt und säuerlich: also ist Wurst, Schinken und dergleichen und Limonade und Wein vielleicht die gemessenste Diät die ersten Tage zur See.“

Johann Gottfried Seume
(1763-1810)

Auf einem Bein zu stehen ist für gewöhnlich eine leichte Übung. Durch die vom Gleichgewichtsorgan gelieferten Informationen zur Bewegung deines Kopfes kannst du deine Körperhaltung immer wieder stabilisieren, indem du eventuelle Richtungsänderungen durch das Anspannen oder lockern verschiedener Muskeln ausgleichst. Wenn du beispielsweise nach hinten zu kippen drohst, spannst du automatisch die Bauchmuskeln an, bei einer Fallbewegung nach rechts streckst du den linken Arm zu Seite. Dein Sehsinn unterstützt normalerweise diese Ausgleichsbewegungen, indem er die Körperbewegungen relativ zur Umgebung wahrnimmt. Das alles funktioniert meist ohne jede bewusste Aufmerksamkeit. Ganz anders bei der Station „Seekrank“: Gar nicht so einfach, einbeinig zu balancieren, wenn sich die Wand vor dir bewegt! Deine Augen sind auf die schwankende, das ganze Gesichtsfeld einnehmende Wand gerichtet und liefern auf einmal widersprüchliche Informationen zu den Wahrnehmungen deines Gleichgewichtsorgans: Es sieht so aus, als würdest du dich relativ zum Raum hin und her bewegen. Da der Mensch ein „Augentier“ ist, d.h. unser Sehsinn über alle anderen Arten der Wahrnehmung dominiert, versucht dein Körper, diese Schwankungen (die ja tatsächlich gar nicht stattfinden) auszugleichen – bis du umfällst. Schließt du hingegen die Augen, fällt es auf einmal viel leichter, die Balance zu halten. Indem du dich nun lediglich auf deinen Gleichgewichtssinn verlässt und die irritierenden visuellen Informationen außen vorlässt, ist dein Körper zu den richtigen Ausgleichsbewegungen in der Lage, und du stehst sicher auf einem Bein.

Das Schiefe Haus von Jena

Außengelände

Gelingt es dir, Dich gerade hinzustellen? Kontrolliere Dich und die Anderen – wie steht ihr zum Fußboden?



- Stell die Holzrinne so ein, dass sie waagerecht liegt. Ob du richtig geschätzt hast, kannst du mit einer Kugel überprüfen.
- Das Pendel zeigt, sobald es aus seine Verankerung gelöst ist, senkrecht nach unten.
- Gib mit einer Kugel einen Tipp ab, über welchem Kästchen die Pendelspitze hängen wird.
- Wo muss die Kugel starten, damit sie die gesamte Kugelrollbahn durchläuft?

Nicht nur in Jena gibt es schiefe Häuser. In Ulm wirbt ein Fachwerkhaus aus dem 14. Jahrhundert mit dem Titel „Schiefstes Hotel der Welt“. Deutliche Abweichungen vom Lot haben auch die Oberhafenkantine in Hamburg, die ehemalige Walkmühle in Wernigerode oder die „Schiefen Häuser“ in Idstein und Großbottwar.

Manche Besucher fühlen sich im Schiefen Haus wie auf einem schwankenden Schiff. Eine Runde im Kreis zu laufen – das geht fast nicht ohne Wackeln und Stolpern. Zwar sieht eigentlich alles „ganz normal“ aus, aber „es fühlt sich falsch an“. Bitte deinen Partner, die Augen zu schließen und sich ganz locker hinzustellen. Für deine Augen wird er vermutlich auffallend schief dastehen. Umgekehrt wirst du dich mit geschlossenen Augen vielleicht entspannter fühlen, auch wenn alle anderen der Meinung sind, du fällst gleich um. Es ist unsere Eigenwahrnehmung, die Propriozeption, die hier irritiert wird. Die Muskeln, Sehnen und Gelenke unseres Körpers haben Rezeptoren, durch die unser Gehirn Informationen über die Lage und Bewegung des Körpers im Raum erhält. So können wir fühlen, ob unsere Muskeln angespannt oder die Beine gebeugt sind. Auch mit geschlossenen Augen „wissen wir einfach“, was unser linker Arm gerade macht, so dass wir ihn ohne Mühe zur Nasenspitze führen können, ohne dass wir dazu hinschauen müssten. Diese „Tiefensensibilität“ ist eng mit dem Gleichgewichtssinn gekoppelt, beide ermöglichen uns, komplexe Bewegungen durchzuführen oder auch einfach nur gerade zu stehen.

Im Schiefen Haus wird deutlich, wie unsere Sinne, die meist so gut zusammenwirken, dass wir uns dessen gar nicht bewusst sind, unter bestimmten Umständen in Widerstreit geraten können. Unsere angespannten Muskeln signalisieren, dass der Boden geneigt ist. Das Auge jedoch gaukelt uns vor, es wäre alles im Lot. Sogar wenn Kugelbahn, Waage oder Pendel etwas anderes zeigen.

Linsen und Spiegel

Der arabische Arzt, Philosoph und Wissenschaftler Qusta ibn Luqa al-Balabakki lebte im 9. Jh. Er sammelte und übersetzte wissenschaftliche Texte der Antike und schrieb in einem Buch zur Optik:

„Die anschaulichste Wissenschaft ist die, an der Naturwissenschaft und Geometrie beide teilhaben, denn sie nimmt von der Naturwissenschaft die Sinneswahrnehmung und von der Geometrie die Beweise mit Hilfe der Linien. Ich habe nichts gefunden, wo diese beiden Disziplinen in einer schöneren und vollkommeneren Weise vereint erscheinen als in der Wissenschaft von den Strahlen, vor allem denen, die auf Spiegeln reflektiert werden.“

Bereits sechs Jahrhunderte vor dem Beginn abendländischer Wissenschaft findet sich hier die Idee, Phänomene „mit Hilfe von Linien“, also abstrakten Bildern darzustellen und zu erklären. Indem aus dem Beobachteten eine Vorstellung gebildet wird, entstehen Modelle, die die Natur sowohl abbilden als auch verständlich machen können – nicht nur im Bereich der Optik.

Planspiegel

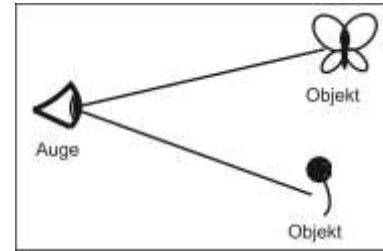
Boxengasse



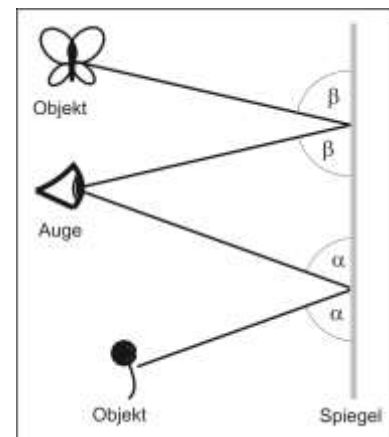
- Schau in den Spiegel.
- Betrachte deine Hand und deren Spiegelbild.

Bei der Restauration des Grünen Gewölbes in Dresden wurde auf eine alte Technik zur Spiegelherstellung zurückgegriffen, bei der ein Zinn-Amalgam benutzt wird. Aufgrund der Giftigkeit von Quecksilber ist diese Methode zwar bereits seit dem 19. Jh. nicht mehr im Einsatz; allerdings lassen sich damit Spiegel mit einem Reflexionsgrad von 60 % herstellen, die den historischen Vorgaben am besten entsprachen. Moderne Spiegel aus aluminiumbeschichteten Glas haben einen Reflexionsgrad von etwa 95 % hätten nicht in die historischen Ausstellungsräume gepasst.

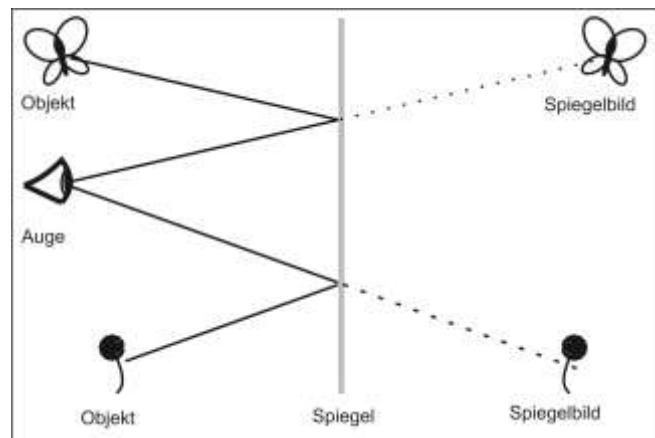
„Einen Blick in den Spiegel werfen“ – in dieser Formulierung steckt die Vorstellung, dass Sehen eine aktive Handlung ist, die vom Betrachter ausgeht. Tatsächlich hatte sich die Auffassung vom „Sehstrahl“, der von Auge ausgehend die Umgebung abtastet, bis in die wissenschaftliche Neuzeit erhalten. Heute wissen wir, dass das Auge kein Sender von Sehstrahlen ist, sondern ein Lichtdetektor. Der „Sehstrahl“ wurde durch den „Lichtstrahl“ ersetzt; eine Vorstellung, die bereits kleinen Kindern vertraut ist, wenn sie auf ihren Bildern einen gelben Fleck mit gelben Strichen malen. Das Modell vom „Lichtstrahl“ beschreibt nicht nur die Sonne, sondern alle leuchtenden oder beleuchteten Objekte als Ausgangspunkt von Strahlen, die sich geradlinig ausbreiten. Wenn sie unser Auge erreichen, sehen wir das entsprechende Objekt.



Das Modell vom Licht als Strahl ist auch gut geeignet, um Beobachtungen an Spiegeln zu beschreiben. In diesem Modell ist ein Spiegel eine Fläche, an der Lichtstrahlen reflektiert, d.h. zurückgeworfen werden. Wie ein Ball, der gegen eine Mauer prallt, wird der Lichtstrahl in dem Winkel zurückgeworfen, in dem er aufgetroffen ist.



Wenn vom Spiegel reflektierte Lichtstrahlen unser Auge erreichen, sehen wir das entsprechende Objekt – oder genauer gesagt, sein Spiegelbild. Unserem Sehsinn erscheint es, als würde sich das reflektierte Objekt hinter dem Spiegel befinden. Da sämtliche aus unserer Umgebung (und von uns) auf den Spiegel treffenden Lichtstrahlen reflektiert werden, sehen wir hinter der Spiegelfläche ein Bild unserer selbst und unserer Umgebung.



Die Orientierung der Objekte im Spiegelraum ist allerdings verändert – eben „spiegelverkehrt“. Je näher sich ein Objekt am Spiegel befindet, umso näher scheint auch sein Spiegelbild zu sein, d.h. die Orientierung zwischen vorn und hinten wird getauscht. Wenn du deine Hand hebst, erblickst du vor dem Spiegel den Handrücken, im Spiegel allerdings die Handfläche.

Folgendes Gedankenexperiment kann dir die veränderte Orientierung des Spiegelbildes erläutern: Stell dir vor, du stehst vor einem Spiegel und bewegst dich nach rechts: dein Spiegelbild wird das Gleiche tun. Wenn du nach oben springst, bewegt sich auch dein Spiegelbild nach oben. Wenn du allerdings nach vorne gehst, bewegt sich dein Spiegelbild auf dich zu, also in die entgegengesetzte Richtung: das Spiegelbild hat eine andere vorne–hinten–Orientierung. Hätte es die gleiche Orientierung wie du, so würde sich sein Spiegelbild von dir entfernen, wenn du dich ihm näherst – eine höchst irritierende Vorstellung.

Seitenrichtiger Spiegel

Boxengasse

Stell dich zwischen die Spiegel und sieh hinein.
Wie viele Spiegelbilder siehst du?
Sind alle gleich?

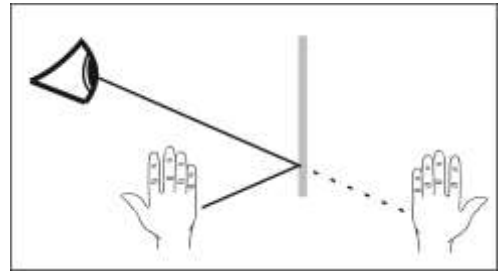


- Zähl die Spiegelbilder!
- Heb die rechte Hand. Was machen deine Spiegelbilder?
- In welchem Winkel stehen die Spiegel zueinander?
- Betrachte genau dein Gesicht!

Nicht nur der Mensch kann sich selbst im Spiegel erkennen. Der sogenannte „Spiegeltest“ ist ein Kriterium für die Existenz eines Selbstbewusstseins bei Tieren. Dazu wird die Stirn oder Brust des Tieres mit einem auffälligen Fleck markiert. Versucht das Tier, den Fleck zu entfernen, gilt dies als Hinweis, dass das Tier das Spiegelbild als sein eigenes erkennt. Neben Kleinkindern bestehen auch Menschenaffen und einige Zahnwalarten den Test.

Eigentlich ist jeder Spiegel ein seitenrichtiger Spiegel: Wenn du die rechte Hand hebst, hebt auch dein Spiegelbild die von dir aus gesehen rechte Hand.

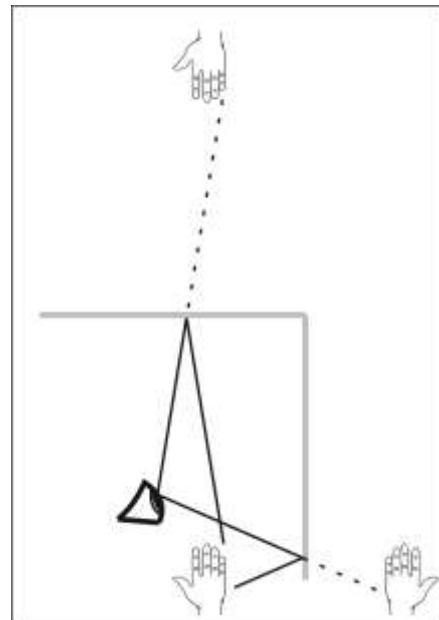
Wir haben, wie die meisten höheren Tiere, eine zweiseitige Körpersymmetrie, d.h. wir haben eine rechte und eine linke Seite, die spiegelsymmetrisch sind (dies kannst du auch an der Station „Schwebespiegel“ sehen). Wenn wir unsere rechte Hand gespiegelt sehen, sieht es für uns wie eine linke Hand aus. So wird also durch die Spiegelung aus einer rechten Hand eine linke Hand, d.h. die sogenannte Händigkeit ändert sich.



Wenn uns ein Mensch gegenüber steht, so wissen wir, dass seine rechte Hand von uns aus gesehen links ist. Diese Annahme übertragen wir wie selbstverständlich auf unser Spiegelbild (freilich nur, wenn wir es von vorn betrachten). Unsere eigene Körpersymmetrie ist also der Grund für die Vorstellung, ein Spiegel vertausche rechts und links.

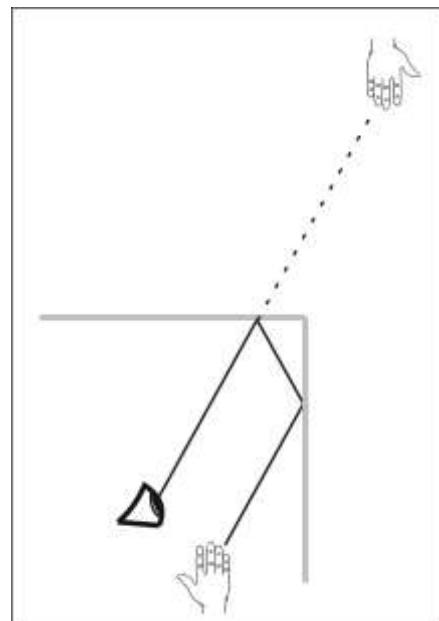
Was passiert nun, wenn du dich nicht nur in einem, sondern in zwei Spiegel betrachtest, die sich an ihren Kanten berühren?

Zunächst kannst du in jedem der Spiegel ein Spiegelbild sehen, das ebenfalls die von dir aus gesehen rechte Hand hebt.



Nahe der Kante siehst du zwei weitere Spiegelbilder, die allerdings die von dir aus gesehen linke Hand heben (in der Grafik ist der Übersicht wegen nur eine Spiegelung eingezeichnet).

Die mittleren Spiegelbilder in Kantennähe entstehen, indem das Spiegelbild des einen Spiegels im anderen gespiegelt wird. Bei einer zweifachen Spiegelung wird die vorne–hinten–Orientierung zweimal getauscht, und da die Spiegel nahezu senkrecht zueinander stehen, wird aus einer vertauschten vorne–hinten–Orientierung eine vertauschte rechts–links–Orientierung. Auch die Händigkeit ändert sich bei einer doppelten Spiegelung zweimal; eine rechte Hand, die zweimal gespiegelt wird, sieht wieder wie eine rechte Hand aus.



Wir sind geneigt, diese Spiegelbilder als seitenrichtig

anzusehen, schließlich heben sie ja *ihre* rechte Hand, genau wie wir auch. Entgegen unserem „gesunden Menschenverstand“ ist aber die rechts–links–Orientierung gerade bei diesen Spiegelbildern vertauscht: Du hebst die rechte Hand, sie die von dir aus gesehen linke.

Genaugenommen hat also der Seitenrichtige Spiegel – entgegen seinem Namen – eine getauschte rechts–links–Orientierung; nur aufgrund unserer eigenen Körpersymmetrie erscheint sie uns als richtig.

Allerdings ist die Illusion nicht perfekt. Vor allem Menschen mit sehr asymmetrischen Gesichtern empfinden ein gewisses Unbehagen gegenüber den mittleren Spiegelbildern, die durch die doppelte Spiegelung entstanden sind. Ob die Täuschung überhaupt funktionierte, wenn wir einen asymmetrischen Körperbau hätten?

Tripel-Spiegel

Boxengasse

Drei Spiegel stehen senkrecht zueinander. Kann dadurch überhaupt ein Spiegelbild entstehen?

Was beobachtest du am Mittelpunkt, wo alle drei Spiegel sich treffen?

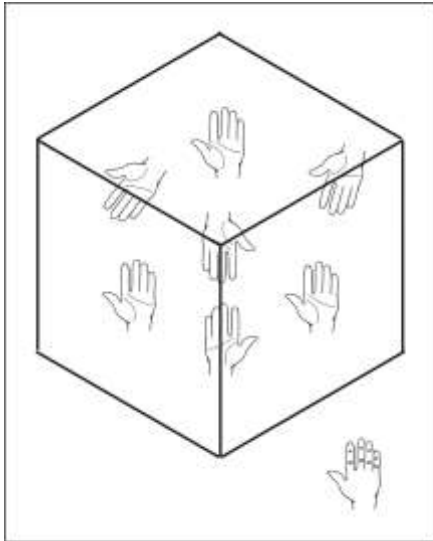


- Schau in den Spiegel.
- Wie viele Spiegelbilder kannst du sehen?
- Geh vor dem Spiegel hin und her und schau dabei in die Mitte des Spiegels:
Was siehst du?

Flächenrückstrahler wie sie z. B. an Fahrrädern zu finden sind, haben eine reflektierende Oberfläche in Form vieler kleiner Tripel-Spiegel und werden auch „Katzenaugen“ genannt. Auch die Augen echter Katzen reflektieren einfallendes Licht, allerdings liegt dies am *tapetum lucidum*, einer Schicht lichtreflektierender Zellen im Katzenauge.

Der Tripelspiegel besteht aus drei Spiegeln, die senkrecht zueinander angeordnet sind. Wenn du hinein schaust, kannst du sieben Spiegelbilder sehen. Sie sind verschieden, weil sie entweder durch einfache oder durch Mehrfachreflexionen entstehen: Jeder der drei Spiegel erzeugt ein einfaches Spiegelbild, dazu kommen drei weitere auf den drei Kanten, wo jeweils zwei Spiegel zusammen stoßen. Wenn du deine rechte Hand davorhältst, erkennst du, dass es sich hier (wie auch bei der Station „Seitenrichtiger Spiegel“) um zweifache Spiegelungen handelt.

In der Mitte, wo alle drei Spiegel zusammenstoßen, siehst du das siebente Spiegelbild. Im Gegensatz zu den anderen Bildern steht es auf dem Kopf. Deine rechte Hand sieht im Spiegel wie eine linke Hand aus, da durch die dreifache Spiegelung – eine ungerade Zahl – das Spiegelbild wiederum eine geänderte Händigkeit hat.



Noch interessanter ist vielleicht eine weitere Eigenart des Tripelspiegels: Egal wo du stehst; wenn du in die Mitte des Spiegels schaust, kannst du dein eigenes Spiegelbild sehen. Durch die dreifache Spiegelung wird der reflektierte Lichtstrahl in allen drei Raumebenen parallel zum eintreffenden Lichtstrahl ausgerichtet – wer in diesen Spiegel blickt, sieht immer nur sich selbst.

Diese „Retroreflexion“ genannte Eigenschaft macht den Tripelspiegel nicht nur zu einem Spielzeug für unsere Eitelkeit, sondern zu einem nützlichen Instrument für Vermessungen. An Schiffen, Wetterballons oder Messreflektoren für Satelliten reflektieren Tripelspiegel einen Messstrahl so, dass er nahe dem Sender aufgefangen werden kann. Russische und amerikanische Mondmissionen stellten auf der Mondoberfläche Reflektoren auf, die aus bis zu 300 Tripelspiegeln bestehen. Mit ihnen kann nicht nur die Entfernung zwischen Mond und Erde, sondern z.B. auch die Verschiebung der Kontinente genau gemessen werden.

Rotierende Spiegel

Plan-, Zweiseiten- und Dreiseitenspiegel sind rotierend gelagert.

Dreh an der Handkurbel.

Was passiert mit deinem Spiegelbild?



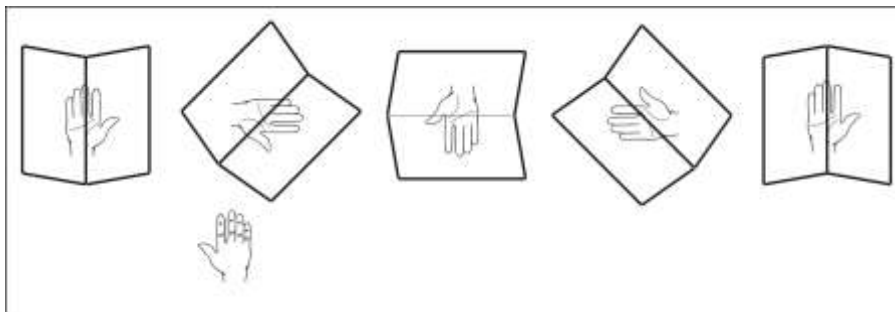
- Wie viele Spiegelbilder kannst du erkennen?
- Zähle die Umdrehungen des Spiegels und die Umdrehungen der Spiegelbilder.
- Wie muss der Zweiseitenspiegel stehen, damit dein Spiegelbild auf dem Kopf steht?

Der französische Physiker Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) entwickelte in der Mitte des 19. Jh. ein Verfahren zur Messung der Lichtgeschwindigkeit. Bei seiner „Drehspiegelmethode“ wurde das Licht zwischen einem rotierenden und einem festen Spiegel reflektiert und die Abweichung des reflektierten Strahles zum Ausgangspunkt gemessen. Foucault bestimmte die Lichtgeschwindigkeit mit 298.000 km/s, das ist recht nahe am Wert der Vakuumlichtgeschwindigkeit von 299.792.458 km/s.

Indem ein Spiegelbild in einem weiteren Spiegel gespiegelt wird, entsteht eine sogenannte Mehrfachreflexion. Wie du bei den Stationen „Seitenrichtiger Spiegel“ und „Tripelspiegel“ sehen konntest, ändert sich mit jeder Spiegelung die sogenannte „Händigkeit“: bei einer ungeraden Anzahl von Spiegelungen wird aus einer rechten Hand im Spiegel eine linke, bei einer geraden Anzahl von Spiegelungen sieht auch das Spiegelbild wie eine rechte Hand aus. Zudem stehst du im Tripelspiegel Kopf: dein Spiegelbild wird um 180° gedreht.

Was beobachtest du, wenn die Spiegelanordnungen nun ihrerseits gedreht werden? Beim Planspiegel hast du sicher es schon oft beobachtet: Wenn der Spiegel sich in der Spiegelebene dreht, bleibt das Spiegelbild unverändert, da die Orientierungen Oben/Unten und Rechts/Links erhalten werden.

Ganz anders beim Zweiseitenspiegel: Wenn du an der Kurbel drehst, rotiert dein Spiegelbild. Nimm dir Zeit und schau genau hin, um die Position des Spiegels mit der Drehung des Spiegelbildes zu vergleichen. In der Ausgangsstellung, wenn die Spiegelkante senkrecht steht, steht auch dein Spiegelbild senkrecht (allerdings sind rechts und links vertauscht). Nach einer Achteldrehung steht dein Spiegelbild quer; es hat sich um 90° gedreht. Nach einer Vierteldrehung des Spiegels steht dein Spiegelbild Kopf: durch die zweifache Spiegelung und die Position der Spiegel ist nun Oben und Unten vertauscht. Nach einer weiteren Vierteldrehung des Spiegels (insgesamt einer halben Drehung) hat sich dein Spiegelbild einmal um sich selbst gedreht.



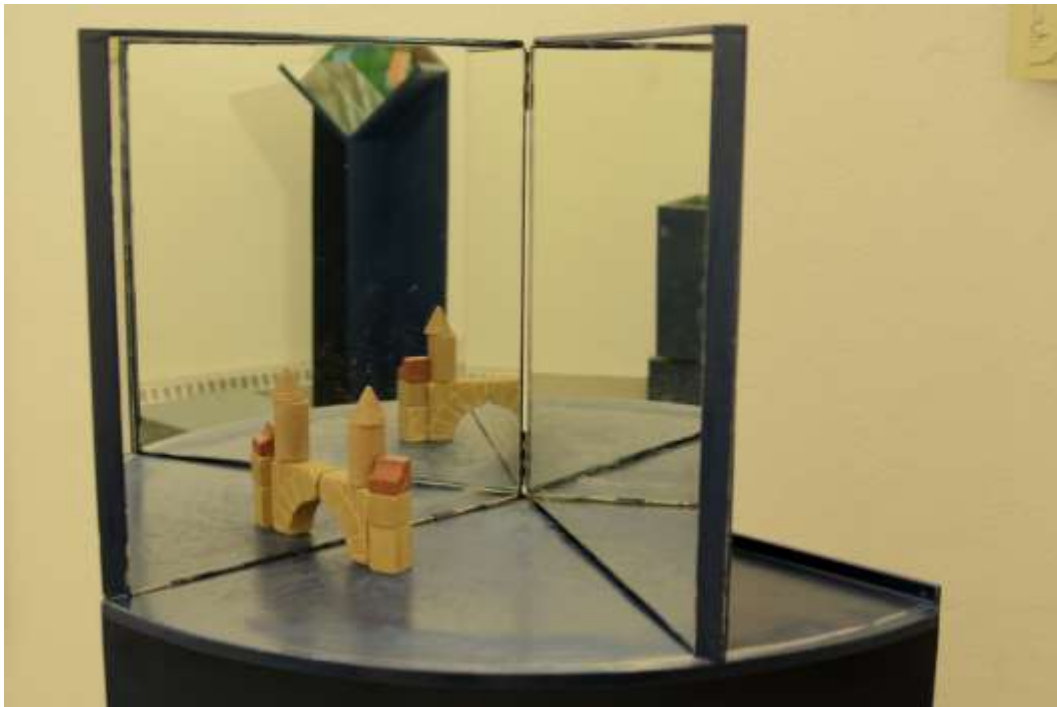
Bei einer Umdrehung des Spiegels dreht sich dein Spiegelbild zweimal (die doppelte Rotationsgeschwindigkeit des Spiegelbildes kannst du auch bei der Station „Wölbspiegel“ beobachten). Wie bei der Station „Seitenrichtiger Spiegel“ beschrieben ist, wird durch die doppelte Spiegelung zum einen die Vorne–Hinten–Orientierung und zum anderen – abhängig von der Position des Spiegels – die Rechts–Links– oder die Oben–Unten–Orientierung getauscht.

Wenn du hingegen den Dreiseitenspiegel bewegst, passiert mit dem mittleren Spiegelbild gar nichts. Wie beim Planspiegel, der ebenfalls eine ungerade Anzahl von Spiegelungen zeigt, ändert sich die Position des Spiegelbildes nicht, auch wenn der Spiegel sich dreht. Allerdings kannst du an den Kanten, wo sich zwei Spiegel berühren, die rotierenden Spiegelbilder der Zweifachspiegelung beobachten.

Spiegelbuch

Boxengasse

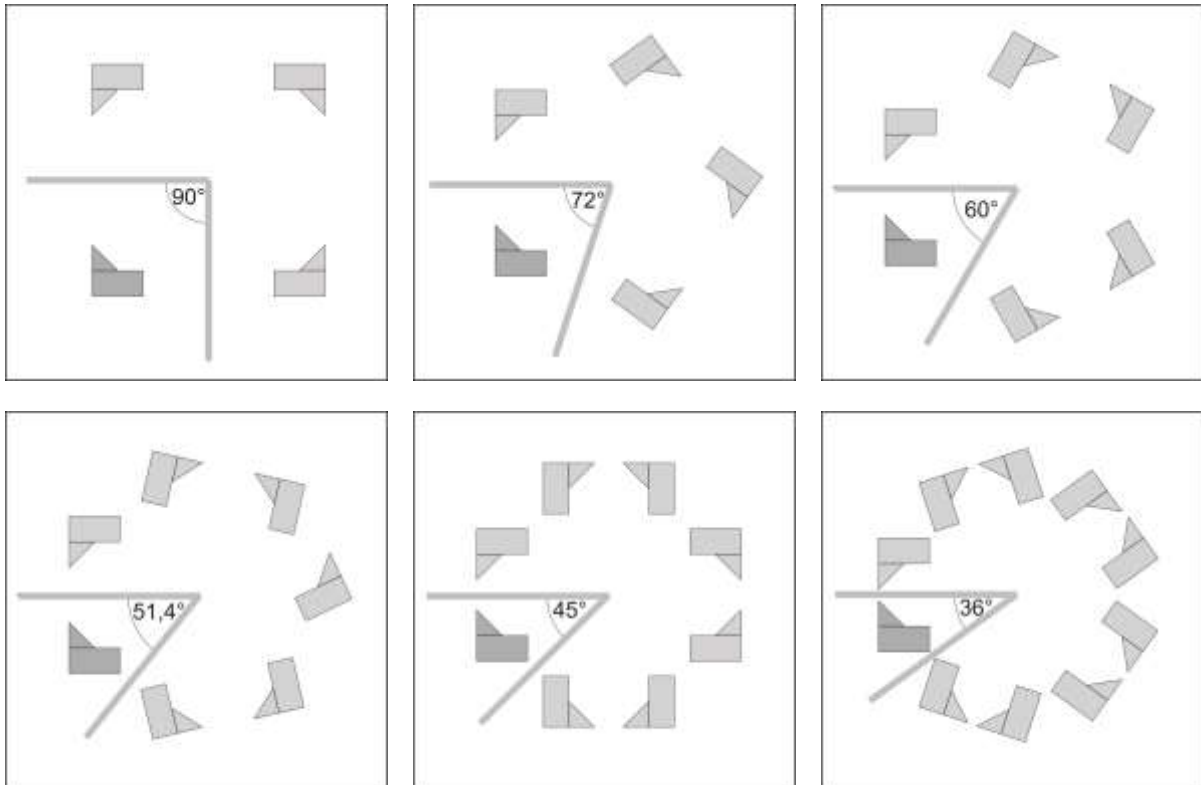
Lege die Bauklötze in das Spiegelbuch und verändere den Winkel zwischen den Spiegeln.



- Schau in das Spiegelbuch.
Bei welchem Öffnungswinkel sieht dein Gesicht „richtig“ aus?
Was passiert, wenn du das Buch langsam schließt?
- Klapp das Buch im rechten Winkel auf und lege Bausteine hinein.
Wie viele Spiegelbilder siehst du?
- Schließ das Buch langsam; bei welchen Winkeln siehst du vollständige Spiegelbilder?

Seit der Antike ist „Spiegel“ (lat. *speculum*) ein Begriff für eine Textsammlung, die zur Orientierung und „Spiegelung“ der eigenen Lebensumstände dient. Bekannt ist z.B. der „Sachsenspiegel“, in dem Eike von Repkow erstmals das Rechtswissen des Mittelalters schriftlich festhielt.

Wenn du das Spiegelbuch im rechten Winkel öffnest, siehst du drei Spiegelbilder: Jeweils ein Bild in jedem Spiegel und ein drittes auf der Kante, an der sich die zwei Spiegel berühren. Wenn du das Buch langsam schließt, so „zieht“ sich dieses mittlere Bild auseinander, bis es sich in zwei komplette Spiegelbilder geteilt hat. Mit den Bausteinen kannst du ausprobieren, bei welchen Öffnungswinkeln du komplette Spiegelbilder sehen kannst.



Je kleiner der Öffnungswinkel des Spiegelbuches wird, umso mehr Spiegelbilder kannst du sehen. Betrachtet du dir die Winkel, bei denen du vollständige Bilder siehst, so kannst du feststellen, dass ein ganzzahliges Vielfaches dieser Winkel immer genau 360° – also einen Vollkreis – ergibt.

Öffnungswinkel	Zahl der Spiegelbilder	Vollkreis
90°	4	$90^\circ \times 4 = 360^\circ$
72°	5	$72^\circ \times 5 = 360^\circ$
60°	6	$60^\circ \times 6 = 360^\circ$
$51,43^\circ$	7	$51,43^\circ \times 7 = 360^\circ$
45°	8	$45^\circ \times 8 = 360^\circ$
36°	10	$36^\circ \times 10 = 360^\circ$

Spiegeltunnel

Boxengasse

Zwei Spiegel stehen parallel zueinander. Ein kleiner Schlitz in einem der Spiegel erlaubt den Blick ins „Unendliche“.



- Halte deine Hand in den Spiegeltunnel. Wie oft kannst du sie sehen?

*"Dass es nun ein
Unendliches an sich,
getrennt von den
sinnlichen Dingen gäbe,
ist unmöglich."*

Aristoteles, Metaphysik

Bei der Station „Spiegelbuch“ konntest du sehen, dass die Zahl der Spiegelbilder umso größer wird, je kleiner der Öffnungswinkel des Buches ist. Was passiert nun, wenn der Winkel zwischen den Spiegeln 0 ist, d.h. wenn die Spiegel genau parallel stehen? Beim Spiegeltunnel handelt es sich um einen Extremfall der Mehrfachreflexion. Durch die parallele Anordnung der Spiegel werden die Lichtstrahlen immer wieder zwischen den Spiegeln reflektiert, so dass theoretisch unendlich viele Spiegelbilder zu sehen sind. Allerdings nur theoretisch: Da bei jeder Spiegelung nicht alles Licht reflektiert wird (sondern nur etwa $19/20$), wird das Bild bei zunehmender Anzahl der Spiegelungen immer dunkler.

Dass das Spiegelbild des einen Spiegels immer wieder im gegenüberliegenden reflektiert wird, kannst du sehr schön erkennen, wenn du deine Hand in den Spiegeltunnel hältst. Du siehst deine Hand abwechselnd von vorn und von hinten (oder abwechseln als rechte und linke Hand), je nachdem, ob es sich um eine gerade oder ungerade Anzahl von Reflexionen handelt.

Spiegel-Allee

Boxengasse

Stell dich zwischen beide Spiegel.

Vergleiche diese Station mit dem Spiegeltunnel – welche Gemeinsamkeiten stellst du fest und welche Unterschiede?



- Betrachte deine Spiegelbilder.
Wie oft siehst du dich von vorn, wie oft von hinten?
- Was würdest du sehen, wenn die Spiegel genau parallel stünden?

In vielen Kulturen haben Spiegel kraftvolle mythologische Bedeutungen. Bei den Kelten galt ein Spiegel als Abbild der Seele einer Person. Deshalb wurden keltische Frauen mit ihren Spiegeln begraben.

Partner-Kaleidoskop

Boxengasse

Such dir jemanden aus, den du als Gegenüber unendlich oft sehen möchtest und schau mit ihm ins Kaleidoskop!
Sind die Bilder alle gleich?



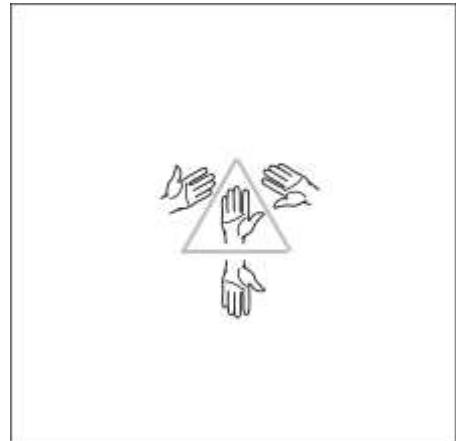
- Bitte deinen Partner, ein Auge zu schließen.
Welches Auge schließen seine Spiegelbilder?

Das Wort „Kaleidoskop“ stammt aus dem griechischen und setzt sich aus den Wortteilen *καλός (kalós)* „schön“, *εἶδος (eidos)* „Gestalt“ und *σκοπέω (skopéo)* „sehen“ zusammen.

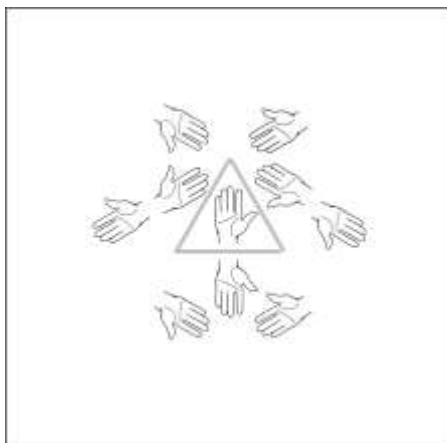
Das Kaleidoskop ist ein beliebtes Kinderspielzeug: Drei Spiegel sind als Seitenflächen eines Prismas angeordnet. Eine Grundfläche des Prismas ist geöffnet, um verschiedene Objekte zu betrachten. Seien es nun Glasperlen, ein Teil der Umgebung oder – wie beim Partnerkaleidoskop – das Gesicht deines Gegenübers, im Kaleidoskop zeigen sich vielfältige symmetrische Muster der beobachteten Dinge. Durch die parallele Anordnung der Spiegelkanten reflektieren sich die Spiegelbilder immer wieder gegenseitig, so dass du unzählige Spiegelbilder sehen kannst.

Beim seitenrichtigen Spiegel konntest du sehen, dass sich die Händigkeit bei jeder Spiegelung umkehrt. Wenn du dein Gegenüber bittest, ein Auge zu schließen oder seine Hand hineinzuhalten, kannst du anhand des asymmetrischen Bildes die einzelnen Spiegelungen nachvollziehen.

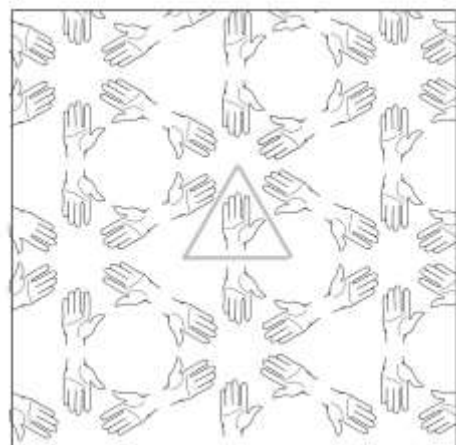
Bei den Spiegelungen erster Ordnung (Bild wird einmal gespiegelt) ändert sich die Händigkeit, d.h. aus einer rechten Hand wird eine linke.



Die Spiegelungen zweiter Ordnung stellen die ursprüngliche Händigkeit wieder her.



Jede weitere Spiegelung ändert die Händigkeit wieder, so dass du abwechseln rechte und linke Hände siehst.



Die Anordnung der Spiegelbilder wird von der Form des Kaleidoskops bestimmt. Beim Partnerkaleidoskop sind die Spiegel als gleichseitiges Dreieck angeordnet. Betrachtetest du die Spiegelbilder, so kannst du eine sechszählige Symmetrie erkennen, d.h. es stoßen immer sechs Spiegelbilder mit ihren Ecken aneinander.

Welches Muster sich beispielsweise bei einer quadratischen Anordnung der Spiegel ergibt, kannst du an der Station „Spiegelwürfel“ untersuchen.

Pyramiden-Kaleidoskop

Boxengasse

Welche Formen ergeben sich, wenn du in das Kaleidoskop blickst?
Weißt du, warum es „Pyramiden-Kaleidoskop“ heißt?



- Blick mit deinem Partner in das Kaleidoskop und tauscht dann die Seiten.
Was ändert sich an euren Spiegelbildern?

Der schottische Physiker Sir David Brewster (1781-1868) gilt als Erfinder des Kaleidoskop und ließ es sich 1817 patentieren. Es war aber wohl schon im antiken Griechenland bekannt.

Bei der Station „Partnerkaleidoskop“, die in einem vorherigen Kapitel beschrieben ist, sind alle Spiegel rechteckig und als Seitenflächen eines dreiseitigen Prismas angeordnet. Durch die parallele Anordnung der Spiegelkanten kommt es beim Blick in das Kaleidoskop zu einem „Unendlichkeitseffekt“, da das Objekt und auch alle Spiegelbilder in einer Ebene liegen.

Hingegen bilden beim Pyramidenkaleidoskop die trapezförmigen Spiegelflächen einen Pyramidenstumpf. Die Spiegelbilder liegen nicht in einer Ebene, sondern scheinen auf einer Kugelfläche angeordnet zu sein. Je nach dem von welcher Seite man in das Kaleidoskop schaut, also ob sich der Winkel der Spiegelkanten öffnet oder schließt, erscheint die Fläche konkav oder konvex – man sieht also die Kugelhülle von innen oder von außen. Das klassische Kaleidoskop mit parallelen Spiegelkanten und in einer Ebene liegenden Spiegelbildern ist der Grenzfall zwischen konkaver (bei sich öffnendem Winkel der Spiegelkanten) und konvexer (bei sich schließendem Winkel der Spiegelkanten) Spiegelbildebene.

Begehbares Kaleidoskop

Boxengasse

Drei Spiegelflächen sind zu einem Dreieck gestellt. Wer hinein tritt, muss aufpassen, sich nicht in den eigenen Spiegelbildern zu verlieren.



- Gelingt es dir, dich von allen Seiten zu betrachten, ohne dich zu bewegen?
- Hebe die rechte Hand.
Welche Spiegelbilder heben die rechte Hand, welche die linke?

Als das größte Kaleidoskop der Welt gilt der „Erdturm“ auf der World Expo 2005 in Japan.

Das Gebäude hat, wie „normale“ Kaleidoskope auch, einen dreieckigen Grundriss, allerdings bei einer Höhe von 47 Metern.

Mehr zu Kaleidoskopen erfährst du in den Texten zum „Partner-Kaleidoskop“ und zum „Pyramiden-Kaleidoskop“.

Spiegelwürfel

Boxengasse

Dieses spezielle Kaleidoskop besteht aus einem Würfel, dessen Innenseiten verspiegelt sind.

Blicke von oben hinein – welche Symmetrien kannst du erkennen?

Was passiert mit den unterschiedlichen Spiegelbildern, wenn der Würfel langsam gedreht wird?



- Wie viele Spiegelbilder kannst du sehen?
- Schau auf die Flächen, die Kanten und die Ecken des Würfels.
- Welche Spiegelbilder drehen sich, welche nicht?
- Steck deinen Kopf von oben in den sich drehenden Würfel.

Nachdem es im 19. Jahrhundert möglich war, großflächige Spiegel herzustellen, wurde 1888 in Frankreich das erste Patent für ein Spiegellabyrinth angemeldet. Gebaut wurde dieses 1889 Sultanspalast von Konstantinopel.

Auch wenn du zunächst vielleicht irritiert von der Vielzahl der Spiegelbilder bist, die der Spiegelwürfel zeigt, kannst du durch sorgfältiges Beobachten seinen Gesetzmäßigkeiten auf die Spur kommen. In dem Spiegelwürfel sind Plan-, Zweiseiten- und Dreiseitenspiegel versammelt.

Auf den Seitenflächen des Würfels siehst du einfache Spiegelungen, die ihre Position nicht ändern, auch wenn der Würfel sich dreht.

An den Würfelkanten kannst du – wie beim rotierenden Zweiseitenspiegel – eine Zweifachspiegelung sehen; diese Bilder rotieren mit der doppelten Würfeldrehgeschwindigkeit.

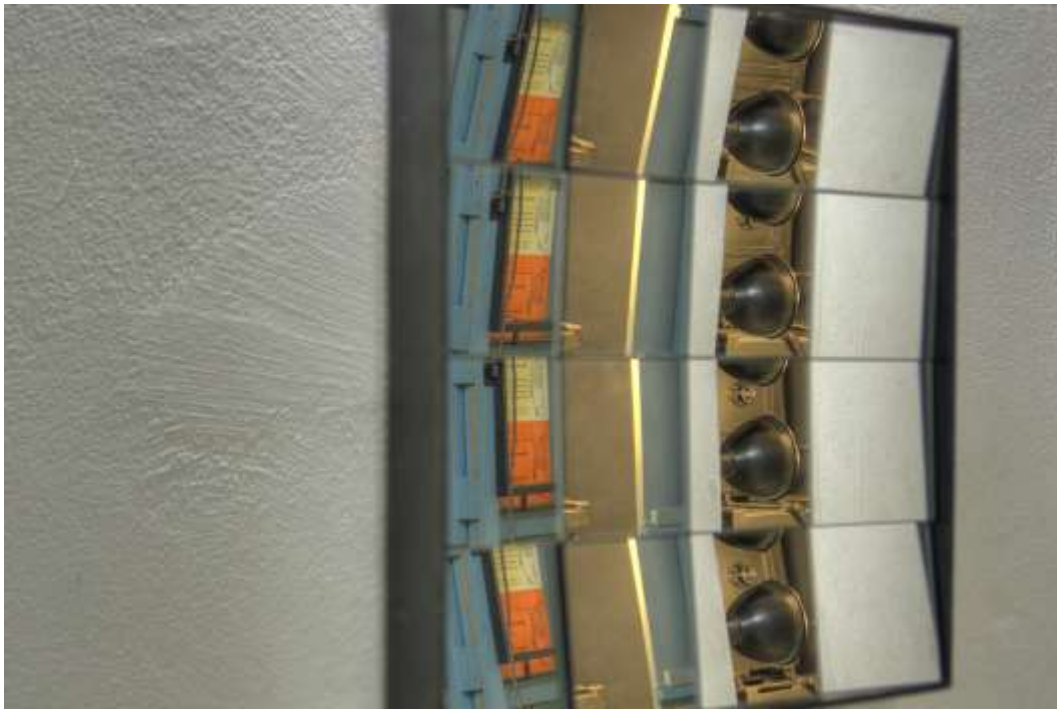
In den Würfecken wird dein Bild dreimal gespiegelt. Wie auch beim Dreiseiten- oder Tripelspiegel steht dein Bild hier immer auf dem Kopf und behält diese Position.

Wenn du den Kopf in den Würfel steckst, siehst du weitere Mehrfachreflexionen, da die Würfelseiten parallel zueinander sind und dein Bild immer wieder spiegeln. Diesen Effekt kannst du auch bei den Stationen „Spiegeltunnel“ und „Spiegelallee“ untersuchen.

Sechzehnfaches Spiegelbild

Boxengasse

Kannst du in jedem der 16 Spiegel dein eigenes Spiegelbild sehen?



- Stell dich dicht vor die Spiegelanordnung. Was siehst du in den einzelnen Spiegeln?
- Geh nun langsam rückwärts. Wie verändern sich deine Spiegelbilder?
- Gibt es einen Punkt, an dem du in jedem Spiegel das gleiche Bild erkennen kannst?

Im 19. Jh. wurde ein neues Verfahren der Spiegelherstellung eingeführt, das Spiegel für breite Bevölkerungsschichten erschwinglich machte. Statt mit Zinn-Amalgam, das aufgrund des verwendeten Quecksilbers sehr giftig ist, wurde Glas mit einem Gemisch aus Silbernitrat und Glucose verspiegelt; eine Methode, die auch heute noch für Weihnachtskugeln verwendet wird.

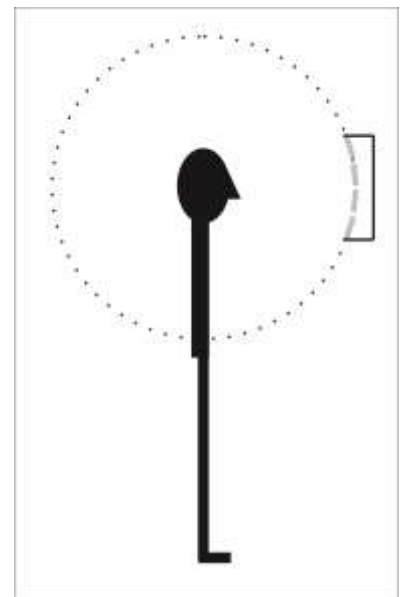
Vielleicht warst du schon einmal in einem Badezimmer, das mit Spiegelkacheln gefliest ist. Wenn der Fliesenleger ordentlich gearbeitet hat, sehen die vielen Fliesen wie ein einziger großer Spiegel aus, der nur durch die Fugen unterbrochen ist. Manchmal sind jedoch kleine Unregelmäßigkeiten zu erkennen, und einzelne Fliesen liegen leicht gekippt, so dass das Spiegelbild in mehrere einzelne Bilder „zerfällt“.

Auch beim 16-fachen Spiegelbild liegen die einzelnen Spiegel nicht in einer Ebene, sondern sind gegeneinander geneigt. Allerdings sind die Spiegelkacheln nicht willkürlich angeordnet, sondern bilden den Teil einer Kugeloberfläche.

Wenn du direkt vor dem Spiegelarrangement stehst, kannst du in allen Spiegeln noch ein einziges Spiegelbild erkennen, doch je weiter du dich entfernst, um mehr löst sich dieses Bild in einzelne Bilder auf, die immer kleiner werden, bis du schließlich nur noch in einem einzigen Spiegel ein einziges Bild entdecken kannst.



Vorher gibt es jedoch einen Abstand, an dem du in jedem einzelnen Spiegel genau ein Bild siehst. Dieser Punkt entspricht dem Mittelpunkt der Kugeloberfläche, auf der die Spiegel angeordnet sind. Wenn du von hier in die Spiegel schaust, steht jeder einzelne Spiegel genau senkrecht zu dir, so dass dein Gesicht in jedem Spiegel auf dich zurück gespiegelt wird.



Kugelspiegel

Boxengasse

Zwei Spiegel sind halbkugelförmig gewölbt.

Welchen Teil deiner Umgebung kannst du darin überblicken?

Wie ändert sich dein Spiegelbild, wenn du dich den Spiegeln näherst?



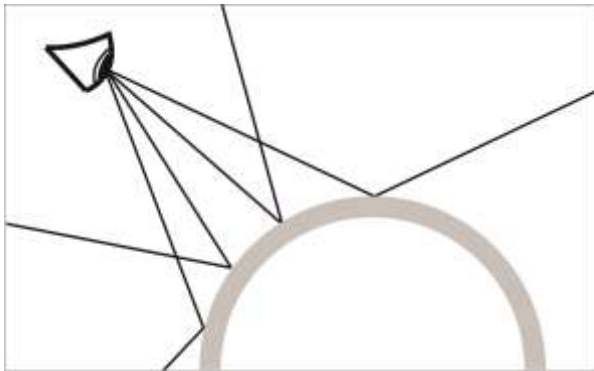
- Schau in den Spiegel. Welche Teile des Raumes kannst du im Spiegel sehen? Vergleiche das Bild mit dem eines Planspiegels.
- Betrachte dich selbst im Spiegel. Nähere dich dabei langsam der Spiegeloberfläche.

Nachdem Glasspiegel im Altertum allenfalls in Kombination mit polierten Metallplatten bekannt waren, kam im 14. Jh. eine neue Methode zur Herstellung auf: Flüssiges Glas wurde zu Kugeln aufgeblasen und im noch heißen Zustand mit Metalllegierungen beschichtet.

Bei allen bisher beschriebenen Stationen hast du dein Spiegelbild in ebenen Spiegeln betrachtet. Was passiert nun, wenn du auf eine gewölbte Spiegelfläche schaust?

Der Kugelspiegel ist ein Arrangement aus zwei verspiegelten Halbkugeln. Wenn du davor stehst und hineinblickst, dann wirkt dein Spiegelbild verzerrt: Je näher ein Körperteil dem Spiegel ist, umso größer sieht es aus (dies kannst du z.B. auch beobachten, wenn du deine Nase vor die Rückseite eines Esslöffels hältst).

Dieser, beim Beobachter wie bei Umstehenden oft für Heiterkeit sorgende Effekt sollte dich nicht davon abhalten, auch deine Umgebung im Kugelspiegel genauer zu betrachten: Such dir einzelne Punkte im Raum und prüfe, ob du sie auch im Spiegel sehen kannst. Schnell stellst du fest, dass du im Kugelspiegel den gesamten Raum überblicken kannst, außer den Teilen, die direkt hinter dir liegen. Auf der verspiegelten Kugeloberfläche werden Lichtstrahlen reflektiert, und wie beim Planspiegel gilt, dass der Lichtstrahl im gleichen Winkel reflektiert wird, in dem er eingetroffen ist. Allerdings ist die Oberfläche – im Gegensatz zum Planspiegel – gewölbt, so dass aus jeder beliebigen Ecke des Raumes immer ein reflektierter Lichtstrahl genau in dein Auge trifft – du hast den kompletten Überblick.



Bei weiterer Betrachtung stellst du noch einen Unterschied zum Planspiegel fest: Alle geraden Linien sehen gekrümmt aus, zudem stimmen die Größenverhältnisse nicht überein: Die Tür im Hintergrund sieht viel kleiner aus als eine neben dir stehende Person. Die komfortable Rundumsicht ist also nur um den Preis einer verzerrten Darstellung der Umgebung zu haben. Dennoch sind solche Spiegel nützlich. In Ladengeschäften an der Kasse oder im Straßenverkehr bei unübersichtlichen Kreuzungen: Wenn es darauf ankommt, möglichst große Bereiche mit einem Blick zu erfassen, leisten gewölbte Spiegel gute Dienste.

Wölbspiegel

Boxengasse

Drehe den Spiegel um seine Achse – was passiert mit dem Spiegelbild? Gehe ganz nahe heran und betrachte dabei dein Gesicht und deine Umgebung!

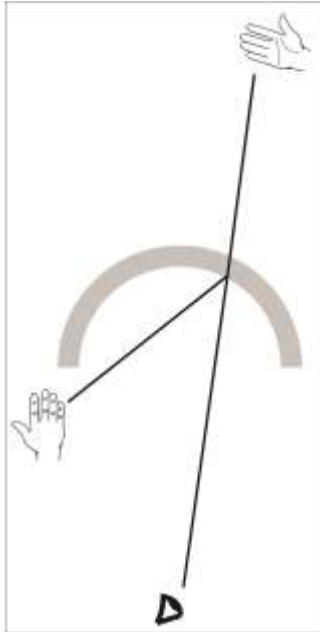


- Stell dich etwa 3 m vor den Spiegel und heb die rechte Hand.
Welche Hand hebt dein Spiegelbild?
- Dreh den Spiegel und beobachte dein Spiegelbild.
Wie oft dreht sich der Spiegel, wie oft dein Bild?
- Tritt langsam näher. Gibt es einen Punkt, an dem du dein Spiegelbild unverzerrt siehst?
- Beobachte andere Besucher, die sich dem Spiegel nähern.
- Was beobachtest du, wenn du in der Spiegelwölbung stehst?

*„Nichts bewahrt uns so
gründlich vor Illusionen
wie ein Blick in den
Spiegel.“*

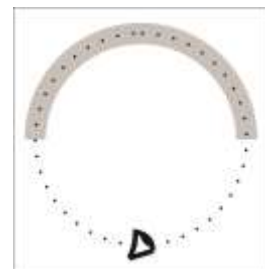
Aldous Huxley

Wie der Kugelspiegel hat auch der Wölbspiegel keine ebene, sondern eine gekrümmte Spiegelfläche; er zeigt dir ein verzerrtes Spiegelbild und einen großen Teil des Raumes. Rechts und links kannst du zusätzlich sogar die Spiegelbilder der Spiegelfläche erkennen. In diesen Bereichen siehst du eine Reflexion zweiter Ordnung; die Lichtstrahlen werden zweimal reflektiert.

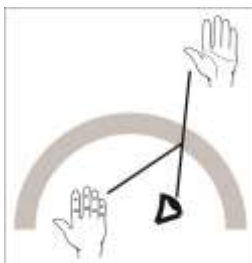


In der Mitte des Spiegels siehst du dein eigenes Spiegelbild und mit der rechten Hand kannst du feststellen, dass der Wölbspiegel die rechts-links-Orientierung vertauscht (für eine detaillierte Erklärung schau im Kapitel „Seitenrichtiger Spiegel“ nach). Das gleiche Phänomen kannst du auch beim rotierenden Zweiseitenspiegel beobachten, und ebenso wie dort rotiert auch beim Wölbspiegel das Spiegelbild mit der doppelten Spiegeldrehgeschwindigkeit. Im Gegensatz zum Zweiseitenspiegel hat der Wölbspiegel allerdings nur eine Spiegelfläche, und in der Mitte des Wölbspiegels wird der Lichtstrahl auch nur einmal reflektiert. Die Änderung der rechts-links-Orientierung erfolgt nicht, wie beim Zweiseitenspiegel, durch eine doppelte Reflexion, sondern aufgrund der gewölbten Oberfläche

Trittst du langsam dichter an den Spiegel, so findest du einen Punkt, an dem du dein Spiegelbild annähernd unverzerrt sehen kannst. Wenn du den Wölbspiegel in Gedanken zu einem Vollkreis ergänzt, so liegt dieser Punkt genau auf dem Umfang dieses Kreises.



Wenn du dich dem Spiegel weiter näherst, empfindest du vielleicht wie die meisten Besucher ein leichtes Unbehagen. Unmittelbar auf der Verbindungslinie zwischen beiden Spiegelenden (also den Durchmesser des Wölbspiegels) ist dein Spiegelbild in die Breite gezerrt, so dass es den ganzen Spiegel füllt.



Stehst du schließlich im Bogen des Wölbspiegels, hat sich die Orientierung deines Spiegelbildes geändert: Wie beim „normalen“ (Plan)Spiegel auch, bleibt die rechts-links-Orientierung im Wölbspiegel erhalten, wenn du dicht davor stehst. Allerdings wird dein Spiegelbild nach wie vor verzerrt, und zwar (im Gegensatz zum Kugelspiegel) umso weniger, je näher du am Spiegel stehst.

Begehbare Lochkamera

Außengelände

Durch eine kleine Öffnung in der Tür gelangt Licht ins Innere der Kamera. Beobachte die Projektion auf der Leinwand. Wie ändert sich das Bild, wenn die Öffnung kleiner oder eine Linse davor gehalten wird?

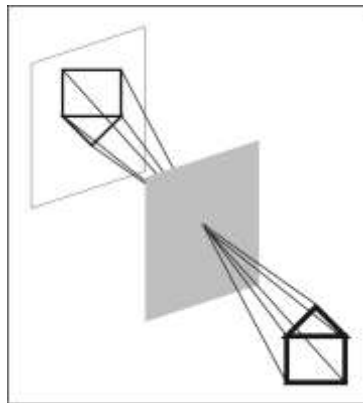
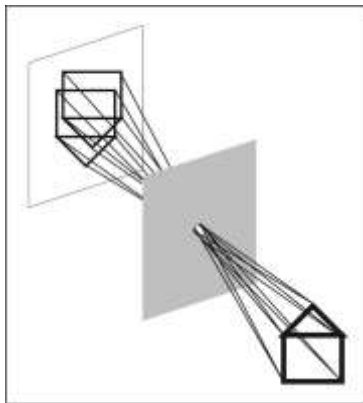


- Tritt in die Kamera und schließe die Tür. Wie lang benötigen deine Augen, um etwas zu erkennen?
- Öffne die Schiebeklappe in der Tür und schließe sie langsam.
Was kannst du sehen?
- Wie verändert sich das Bild, wenn du die verschiedenen Lochblenden verwendest?
- Öffne die Tür und schau dir das Gelände an. Schließe die Tür und betrachte das Bild auf der Leinwand. Ist es gedreht oder gespiegelt?

Das Wort „Kamera“ leitet sich von lat *camera obscura*, „dunkles Gewölbe“ ab. Das Funktionsprinzip der Lochkamera war wohl schon in der Antike bekannt und wurde im 10. Jh. durch Abu Ali al-Hasan ibn al-Haitham (965-1039/1040) eingehend beschrieben. Der in Europa „Alhazen“ genannte arabische Mathematiker verwarf dabei die bis dahin gängige Vorstellung vom „Sehstrahl“, mit der sich zwar Spiegelphänomene, aber eben nicht die Beobachtungen an der *camera obscura* erklären ließen.

Vielleicht hast du schon mal an einem Sommertag im Schatten eines Baumes gesessen und die Sonnentaler beobachtet. Die Sonnenstrahlen, die durch das nicht ganz geschlossene Blätterdach dringen, zeichnen auf den Boden helle Ovale, die alle gleich aussehen, obwohl die Lücken zwischen den Blättern ganz unregelmäßig sind.

Auch die begehbare Lochkamera offenbart ihre Geheimnisse am besten an einem sonnigem Tag: Wenn sich deine Augen an die Dunkelheit im Inneren des Raumes gewöhnt haben, kannst du die Schiebeklappe in der Tür erst öffnen und dann langsam schließen. Je kleiner die Öffnung in der Tür wird, desto deutlicher entwickelt sich aus verschwommenen Hell/Dunkel-Konturen ein detailliertes Panorama des Imaginata-Geländes mit den Saalehängen im Hintergrund. Allerdings ist dieses nicht für jeden Betrachter sofort zu erkennen, denn das Bild steht auf dem Kopf, so dass der Horizont einen Kreisbogen im unteren Teil des Bildes beschreibt und z.B. die Imaginata-Kugel auf dem Dach des Schaltgebäudes auf den Fußboden projiziert wird. Oben und unten sind also vertauscht. Wie passt dies mit der am Anfang beschriebenen Vorstellung vom „Lichtstrahl“ zusammen? Alles Licht, was wir in der Lochkamera sehen, tritt durch die Lochblende ein. Allerdings handelt es sich hierbei nicht nur um einen Lichtstrahl (dann wäre in der Tat nur ein heller Fleck zu sehen), sondern von jedem Punkt des Außengeländes gelangen Lichtstrahlen durch das Loch auf die Leinwand.



Je kleiner die Blendenöffnung ist, umso weniger Lichtstrahlen gelangen ins Innere. Dadurch wird das Bild zwar dunkler, aber auch schärfer, da von jedem Punkt im Gelände nur ein eng gebündelter Lichtstrahl auf die Leinwand strahlt und somit ein überlappungsfreies und scharfes Bild zeichnet.

Dieser Zusammenhang zwischen Blendengröße, Lichtstärke und Abbildungsschärfe ist gilt auch für Fotokameras: Je größer die Blende, desto mehr Licht gelangt in die Kamera und umso kürzer ist die Belichtungszeit. Dabei wird allerdings die Tiefenschärfe geringer, so dass das Bild unscharf wirken kann. Umgekehrt ist bei kleiner Blendenöffnung das Bild zwar scharf, jedoch manchmal unterbelichtet.

Hier in der begehbaren Kamera solltest du dir noch einmal die Orientierung des projizierten Bildes anschauen. Als Marke mag dir z.B. der Zaun zum Nachbargrundstück dienen. Er steht –blickt man aus der Kamera– links vom Eingang. Drehst du dich um und blickst auf die Leinwand, so ist er auch dort im linken Bereich abgebildet. Behältst du allerdings die Blickrichtung (und damit deine eigene Orientierung) bei, stehst also weiterhin mit dem Rücken zu Leinwand, so ist der Zaun im rechten Bereich der Leinwand abgebildet. Wenn die Lichtstrahlen die Lochblende passieren, kreuzen sie sich, so dass das komplette Bild seine Orientierung wechselt. Bei der Oben–Unten–Orientierung ist dies sofort augenfällig; der Wechsel der Rechts–Links–Orientierung ist weniger offensichtlich, aber durch genaues Beobachten nachvollziehbar.

Und was hat unsere Lochkamera mit den anfangs beschriebenen Sonnentälern zu tun? Die Lücken zwischen den Blättern sind ebenfalls kleine Lochblenden: Sie projizieren den Himmel auf den Boden; die ovalen Flecken sind Abbilder der leuchtenden Sonne.

Große Kamera

Boxengasse

Beobachte die Mattscheibe.

Was geschieht, wenn du den Knopf unterhalb der Mattscheibe langsam drückst oder ziehst?

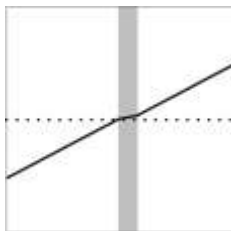
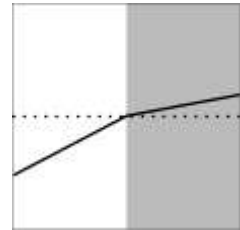


- Betrachte das Bild, während du den Hebel langsam bewegst. Welche Bereiche siehst du scharf, welche nicht?
- Ist das Bild auf der Mattscheibe gedreht oder gespiegelt?

Seit dem 13. Jh. dienten Lochkamas zu astronomischen Beobachtungen der Sonne und als Zeichenhilfe in der Malerei. Nachdem sich gegen Ende des Mittelalters die Linsenschleifkunst zunehmen verbesserte, wurden statt einfacher Lochblenden optische Linsen in Kamas verwendet; ein Prinzip, was sich bis zur heutigen Digitalfotografie erhalten hat. Lochblenden finden aber heute noch Anwendung, beispielsweise in Röntgenapparaten.

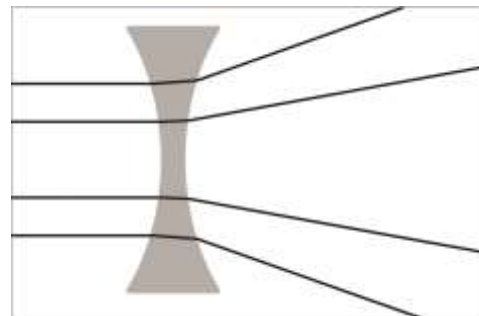
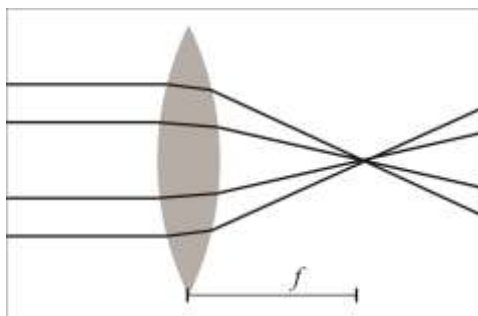
Bei den Spiegelphänomenen konntest du untersuchen, wie Lichtstrahlen an einer verspiegelten Glasfläche reflektiert werden. Bei den im Folgenden beschriebenen Stationen geht es hingegen darum, dass Licht verschiedene Materialien passiert, also durch sie hindurchgeht.

Sicher hast du schon mal beobachtet, dass ein Löffel in einem gefüllten Wasserglas merkwürdig „abgeknickt“ aussieht oder dass deine Beine in einem klaren Badesee viel kürzer erscheinen. Diese Phänomene sind auf die sogenannte Lichtbrechung zurückzuführen, d.h. die Richtung eines Lichtstrahls ändert sich, wenn er von einem Material (Luft) in ein anders (Wasser, Glas, Plexiglas...) tritt.



An einer ebenen Glasfläche, wie z.B. einer Fensterscheibe, kannst du die Lichtbrechung nicht sehen. Zwar ändert der Lichtstrahl sowohl beim Eintritt (Übergang Luft–Glas) als auch beim Austritt (Übergang Glas–Luft) seine Richtung; in der Summe jedoch heben sich beide Effekte auf. Anders ist es, wenn das Glas nicht überall gleich dick ist. Du kannst dies z.B. bei alten Fensterscheiben sehen, die aufgrund ihrer Unebenheit ein verzerrtes Bild der dahinterliegenden Dinge zeigen.

Auch bei optischen Linsen werden die Lichtstrahlen unterschiedlich stark abgelenkt. Bei einer konvexen Sammellinse werden parallel einfallende Lichtstrahlen zu einem Brennpunkt (mit dem Abstand f) hin gelenkt, eine konkave Zerstreuungslinse hingegen lässt Parallelstrahlen „auseinanderlaufen“.



Vielleicht hast du ja schon bei der begehbaren Kamera beobachtet, dass du ein sehr scharfes und lichtstarkes Bild erhältst, wenn du statt einer Lochblende die optische Linse vor die Türöffnung schiebst. Auch bei der „Großen Kamera“ gelangt das Licht durch eine große Linse, die du vorn an der Kamera sehen kannst, auf die Mattscheibe.

Bei den Linsen beider Stationen handelt es sich um Sammellinsen, d.h. sie lassen parallel einfallende Strahlen in einem Punkt zusammentreffen. Der Abstand zwischen diesem Punkt und der Linsenebene wird als „Brennweite“ bezeichnet und hängt von Krümmung und Material der Linse ab.

Bei der Begehbaren Kamera ist die Leinwand genau in der Brennweite angebracht. Die parallel einfallenden Lichtstrahlen kommen von den Gegenständen, die sich weit entfernt von der Linse befinden, so dass auch nur diese Gegenstände scharf abgebildet werden. Mit der großen Kamera hingegen kannst du auch die Dinge, die sich nahe der Kamera befinden, scharf abbilden. Dazu musst du den Abstand zwischen der Linse und der Mattscheibe verändern; je näher der Gegenstand ist, umso größer muss der Abstand zwischen der Linse und der Mattscheibe sein. Da sich die Linse aber nicht beliebig weit

herausschieben lässt, können Gegenstände, deren Abstand zur Kamera kleiner als etwa 4 m ist, auch mit dieser Kamera nicht scharf abgebildet werden.



Der Zusammenhang zwischen den Abständen von Objekt, Brennweite und Mattscheibe mit dem scharfen Bild lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}$$

f	Brennweite (Abstand zwischen Brennpunkt und Linse)
S_1	Abstand zwischen Objekt und Linse
S_2	Abstand zwischen Linse und Bild auf der Mattscheibe

Die Brennweite der Linse beträgt bei der großen Kamera 50 cm, bei der Begehbaren Kamera sind es 5 m. Je größer S_1 wird, also je weiter das Objekt von der Linse weg ist, umso mehr nähert sich S_2 (also der Bereich, in dem das Bild scharf zu sehen ist) der Brennweite f . Dies konntest du ja bei der Begehbaren Lochkamera sehr gut beobachten, wo der Abstand zwischen Leinwand und Linse genau 5 m beträgt und der Horizont am schärfsten abgebildet wird.

Historische Reproduktionskamera

Boxengasse

Reproduktionskameras werden zur Vervielfältigung ebener Vorlagen eingesetzt.
Vergleiche diese Kamera mit der großen Kamera und der Begehbaren Kamera auf dem Hof.



- Betrachte die Abbildungen auf der Mattscheibe. Sind sie gegenüber dem Original gedreht oder gespiegelt?
- Wie verändert sich das Bild, wenn sich der Keraschlitten bewegt?

Diese Reproduktionskamera stand bis 2007 in der Thüringer Landessternwarte Tautenburg. Sie diente dort zur Reproduktion von Fotoaufnahmen des Sternenhimmels. Dazu wurde statt der Mattscheibe eine Fotoplatte angebracht, auf die ein Abbild des Originalfotos projiziert wurde.

Mehr zu Thema „Kamera“ und „optische Abbildung“ erfährst du im Text zur „Großen Kamera“.

Fresnel-Linse

Boxengasse

Linsen können auch ganz flach sein! Diese vergrößert, verkleinert, verzerrt und verkopfstellt die Welt!

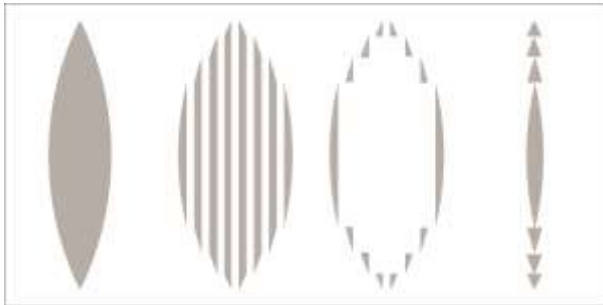
Wo müssen dein Partner und du stehen, damit ihr euch durch die Linse sehen könnt?



- Stell dich mit deinem Partner zu beiden Seiten der Linse auf.
Wo kann dein Partner dich gut sehen, wo nicht?
- Was beobachtest du, wenn sich dein Partner langsam entfernt?
- Betrachtet die Linsen, die im Fenster hängen.
Sehen sie alle gleich aus?

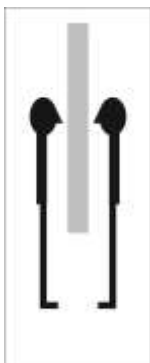
Sowohl die Franzosen Georges-Louis-Leclerc de Buffon (1707 - 1788) und Marie Jean Antoine Nicolas Caritat, Marquis de Condorcet (1743-1794) als auch der schottische Kaleidoskop-Erfinder Sir David Brewster (1781-1868) stellten bereits Überlegungen zu einer dünnen und leichten Linsenform aus konzentrischen Glasringen an. Der Physiker und Ingenieur Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), der von der französischen Regierung zum Sekretär einer eigens gegründeten Leuchtfeuerbehörde berufen wurde, kam schließlich auf die Idee, solche Linsen zur Verbesserung von Leuchtfeuroptiken einzusetzen. Der erste „Fresnelsche Apparat“ wurden allerdings erst nach Fresnels Tod 1832 in Betrieb genommen.

Das im Kapitel „Große Kamera“ beschriebene Phänomen der Lichtbrechung findet nur an den Grenzflächen zwischen Glas und Luft statt. Dies führte zu der Idee, die gekrümmte Oberfläche der Linse durch konzentrische Glasringe zu ersetzen, und damit das Innere der Linse „wegzulassen“.

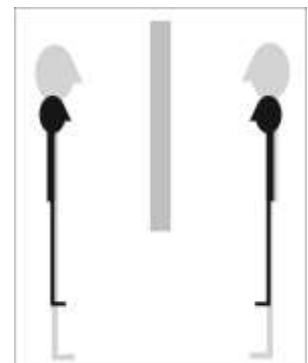


Mehrere solcher „Fresnellinsen“, die heute allerdings aus Kunststoff gefertigt werden, finden sich auch in unserem Stationenpark. Mit ihnen kannst du experimentieren wie mit einer „normalen“, gewölbten Linse auch.

Die große Fresnellinse untersuchst du am Besten gemeinsam mit einem Partner: stellt euch zu beiden Seiten der Linse auf, verändert abwechselnd eure Positionen und teilt euch eure Beobachtungen mit.



Wenn du ganz dicht am der Linse stehst, kannst du deinen Partner und auch dessen Umgebung fast wie durch eine einfache Glasscheibe sehen. Entfernst du dich jedoch von der Linse, so siehst du zwar noch deinen Partner (sofern er stehen bleibt) der Hintergrund jedoch verschwimmt.



Wenn sich nun auch dein Partner von der Linse entfernt, so sieht sein Gesicht immer größer aus, bis es schließlich nicht mehr zu erkennen ist. Frag deinen Partner, ob er dich noch sehen kann!



Erst wenn du dich noch weiter von der Linse entfernst, kannst du deinen Partner wieder sehen; jetzt steht er allerdings mitsamt dem Hintergrund auf dem Kopf.

Probiert gemeinsam, in welchen Abständen zur Linse das Bild unscharf wird bzw. auf dem Kopf steht. Der Abstand, in welchem du das Gesicht deines Partners, egal wo du stehst, immer noch erkennen kannst, ist die Brennweite. In einem Leuchtturm ist an dieser Stelle die Lampe angebracht, so dass diese, ganz gleich wo sich ein Schiff befindet, immer gut zu erkennen ist.

Prinzipien

„Die Beschaffenheit einzelner Dinge wird durch Beobachtungen und Versuche bekannt; daraus schließen wir ... auf die Natur aller Dinge.“

Diesen Satz schrieb der englische Mathematiker Roger Cotes in das Vorwort von Isaac Newtons *„Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“*, das als eines der wichtigsten physikalischen und astronomischen Bücher aller Zeiten gilt. Newton verwendete als Erster konsequent die Werkzeuge der Mathematik, um so unterschiedliche Dinge wie Pendelbewegungen, strömende Flüssigkeiten oder Planetenumlaufbahnen zu deuten. So entstanden theoretische Beschreibungen, die nicht mehr nur ein einzelnes Phänomen, sondern allgemeine Prinzipien erklären sollen.

Die Experimente des Stationenparks können helfen, diese oft sehr abstrakten Prinzipien und Begriffe mit konkreten Erfahrungen und tragfähigen Vorstellungen zu verknüpfen. Der Weg dorthin beginnt mit Beobachten, führt zu Fragen, Hypothesen und Schlussfolgerungen – und zum Verstehen.

Balancier-Besen

110 kV-Halle

Leg den Besenstiel waagrecht auf die ausgestreckten Hände, dass er links und rechts gerade noch auf den Fingern liegt. Bewege nun die Hände langsam aufeinander zu. Gelingt es dir, ohne dass der Besenstiel herunter fällt? Versuche das Experiment nun mit einem richtigen Besen.



- Was spürst du, wenn du deine Hände langsam zusammenführst?
- Was passiert, wenn du beim Start einen Finger außen und einen nahe der Mitte hältst?
- Wiederhole das Experiment ein paar Mal.

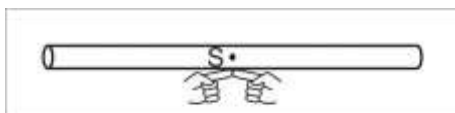
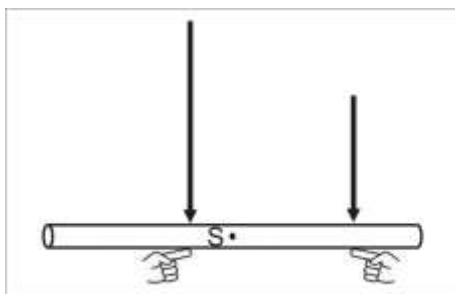
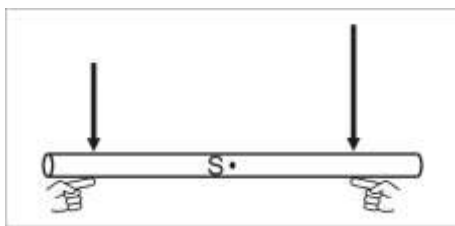
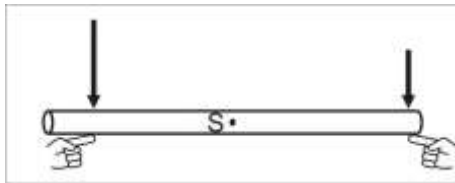
Treffen sich deine Finger immer wieder am gleichen Punkt?

In Albert Neuburgers Experimentierbuch „Heitere Wissenschaft“ aus dem Jahr 1922 wird dieser Versuch folgendermaßen beschrieben:
„Tote, leblose Gegenstände scheinen ein geradezu sehr feines Gefühl für das Gleichgewicht zu haben, stellen sie sich doch gewissermaßen selbst darauf ein.“

Für dieses einfache Experiment benötigst du nicht mehr als einen Besenstiel und deine Hände. Vorsichtig zusammengeführt, finden deine Finger schließlich recht schnell den Punkt, an dem sich der Stab sogar auf einem Finger balancieren lässt. Wenn du den Versuch mehrfach wiederholst, stellst du schließlich fest, dass es immer derselbe Punkt ist, an dem deine Finger zusammentreffen.

Diese Stelle markiert den Schwerpunkt (ein anderes Wort ist Massenmittelpunkt) des Besenstiels. Hilfreich für viele physikalische Fragestellungen ist der Gedanke, sich den Schwerpunkt als den Punkt vorzustellen, in dem sich die gesamte Masse eines Körpers konzentriert und an dem Kräfte genauso wirken, als würden sie auf den gesamten Körper einwirken. So musst du gar nicht den gesamten Besenstiel halten, damit er nicht herunterfällt. Es reicht, wenn deine Finger genau unter dem Schwerpunkt liegen, damit du der Erdanziehungskraft entgegen wirken kannst.

Wenn du nun nicht den Stab, sondern den Besen balancierst, stellst du fest, dass der Schwerpunkt nicht immer in der Mitte eines Körpers liegt, sondern vielmehr von der Masseverteilung des Körpers abhängig ist. Beim Besen liegt der Schwerpunkt wesentlich näher am „Schweren Ende“. Gerade bei unregelmäßigen Körpern ist der Schwerpunkt oft schwer zu berechnen; jedoch kann er auch hier mit unserer Methode experimentell bestimmt werden.



Achte darauf, wie sich deine Hände bewegen – sie rutschen nicht gleichmäßig, sondern immer abwechselnd ruckweise. Anfangs haben beide Finger einen unterschiedlichen Abstand zum Schwerpunkt. Der Finger, der weiter außen ist, trägt einen geringeren Gewichtsanteil. Je kleiner die Gewichtskraft, umso kleiner ist auch die Haftreibung zwischen Finger und Stab, so dass der Stab an diesem Ende zu rutschen anfängt. Indem der Finger nun nach innen rutscht, erhöht sich auf dieser Seite der Gewichtsanteil des Stabes und damit die Reibung zwischen Finger und Stab, so dass der Stab schließlich nicht mehr über den Finger rutscht. Dafür gleitet nun der Finger auf der anderen Seite nach innen, da hier die Haftreibung zwischen Finger und Stab geringer geworden ist. Dieser beidseitige Wechsel zwischen Rutschen und Haften wiederholt sich solange, bis beide Finger unter dem Schwerpunkt angekommen sind. Hier ist der Punkt erreicht, an dem die Masse gleichmäßig zu beiden Seiten verteilt ist.

Knall und Fall

110 kV-Halle

Lege den Ball hinter der kleinen Holzleiste auf das Klappbrett.
Nun hebe das Brett an und lass es wieder nach unten fallen, so dass der Ball in die Dose fällt.

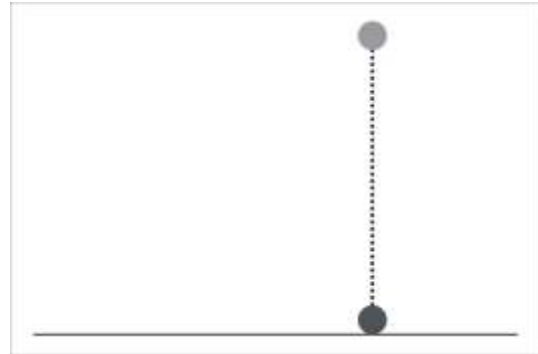
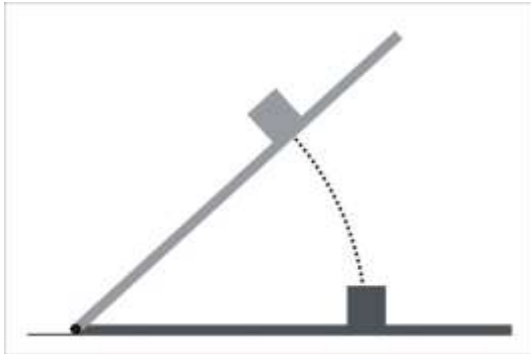


- Probiere verschiedene Starthöhen aus!
- Was fällt schneller, das Brett oder der Ball?

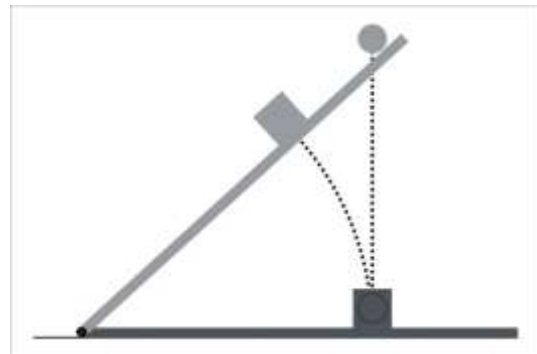
Der italienische Philosoph und Mathematiker Galileo Galilei (1564-1642) schrieb um 1636 in seinen „Discorsi“:
„Alle Körper fallen im luftleeren Raum gleich schnell.“

Manche Besucher brauchen länger, um den Ball endlich in den Becher zu befördern, anderen gelingt es recht schnell. Auch du hast sicher nach einigem Probieren die Starthöhe des Brettes gefunden, bei der der Ball schließlich in die Dose fällt und dich vielleicht gefragt, ob es eine Möglichkeit gibt, diese Höhe auch ohne Probieren zu finden? Oder anders gefragt: Wie hoch muss das Ende des Brettes gehalten werden, damit der Ball genau in die Dose fällt?

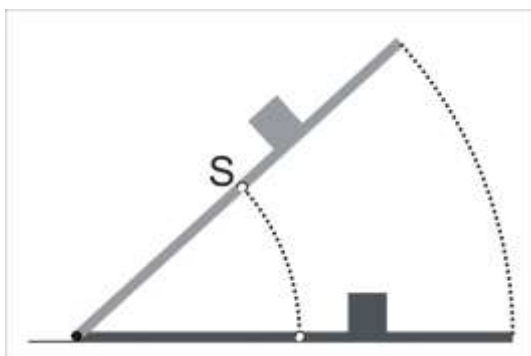
Um diese Höhe zu bestimmen, betrachten wir den Fall des Brettes und den Fall des Balles zunächst getrennt. Das Brett (und mit ihm die Dose) beschreibt, da es an einem Ende fixiert ist, beim Fallen eine Kreisbahn. Der Ball hingegen fällt senkrecht nach unten und hat eine gerade Fallstrecke, so dass – im Gegensatz zur Dose – Start- und Aufschlagpunkt genau übereinander liegen.



Kombinierst du beide Fallbahnen miteinander, kannst du erkennen, aus welcher Höhe das Brett fallen muss: Wenn sich der Startpunkt des Balles senkrecht über dem Punkt befindet, an dem die Dose aufkommt, fällt der Ball in die Dose.



Dazu muss das Brett allerdings schneller als der Ball fallen, was im Widerspruch zu der Aussage steht, dass alle Körper gleich schnell fallen, sofern der Luftwiderstand außer Acht gelassen wird. Auch wenn das Brett einen höheren Luftwiderstand als der Ball hat, kann der Unterschied der Falldauer nicht allein damit erklärt werden. Wir müssen uns vielmehr noch einmal die Fallbewegung des Brettes genauer ansehen:



Das freie Ende des Brettes legt die größte Strecke zurück und bewegt sich am schnellsten – es hat die größte Bahngeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu ändert sich die Position des festen Endes überhaupt nicht – seine Bahngeschwindigkeit ist null. Der Schwerpunkt (S) des Brettes bewegt sich hingegen tatsächlich mit der annähernd gleichen Fallgeschwindigkeit wie der Ball. Da der Schwerpunkt etwa in der

Mitte des Brettes liegt, bewegt sich das freie Brettende mit (fast) doppelter Geschwindigkeit und ist also tatsächlich schneller als der Ball.

Die Macht der Dominosteine

110 kV-Halle

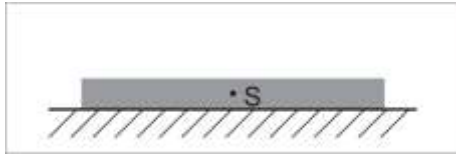
Kann der kleinste Dominostein den größten Stein zu Fall bringen?



- Was passiert, wenn du einen Stein weglässt?
- Was passiert, wenn du die Steine quer hinstellst?
- Was schätzt du, in welchem Größenverhältnis stehen die Steine zueinander?

Würde man die Dominoreihe im gleichen Größenverhältnis weiterbauen, wäre der 33. Stein bereits 1000 m hoch.

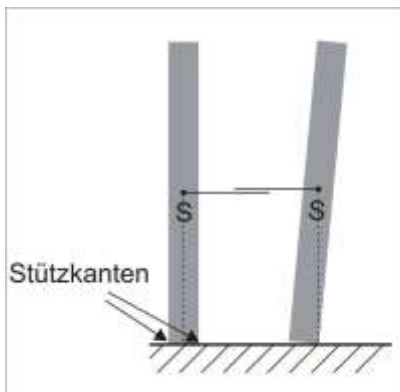
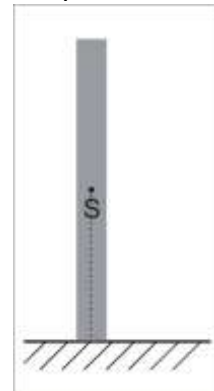
Diese Station führt bei vielen Besuchern immer wieder zu verblüfften Gesichtern und der Frage, wie es der kleine Stein nur schafft, den größten, immerhin mehr als viertausend Mal schwereren, umzuwerfen. Zur Klärung dieser Frage mag es hilfreich sein, zunächst einen einzelnen Dominostein und seine Stabilität in verschiedenen Positionen zu betrachten:



Wenn der Dominostein flach daliegt, kannst du ihn nicht noch „weiter umwerfen“, er hat die stabilste mögliche Position eingenommen.

Wie stabil die Lage des Dominosteins und generell jedes Körpers ist, lässt sich sehr gut durch die Lage des Schwerpunktes beschreiben: Ein Körper befindet sich in einem stabilen Gleichgewicht, wenn der Schwerpunkt S die tiefste mögliche Position eingenommen hat. Physikalisch gesprochen, hat seine potentielle – also seine Lageenergie – ein Minimum erreicht (Es gilt: $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ Je höher sich der Schwerpunkt eines Körpers befindet, umso höher ist seine potentielle Energie.)

Wenn der Stein (wie im Bild) hochkant steht, befindet sich sein Schwerpunkt oberhalb der stabilen Gleichgewichtslage. Sicher steht der Stein so nicht – ein kleiner Stupser mit dem Finger reicht aus, und er wackelt. Wenn der Stein sich neigt, wird seine Lage instabil, so dass er umfällt und sein Schwerpunkt am Ende wieder die tiefste – also die stabile – Position eingenommen hat.



Wenn du den Stein allerdings nur sehr vorsichtig anstößt, kann es sein, dass er zwar ein wenig schwankt, aber dennoch in seine aufrechte Position zurückkehrt. Denn solange sich das Lot des Schwerpunktes zwischen den beiden Stützkanten befindet, kippt er nicht um. Da der Schwerpunkt des Steines beim Kippen zunächst etwas nach oben geht, musst du Energie aufwenden, um den Schwerpunkt über die Stützkanten und den Stein zu Fall zu bringen.

Diese „Aktivierungsenergie“ ist von der Größe und Position des Steins abhängig. Beim kleinsten Stein reicht es, wenn du ihn vorsichtig anpustest. Indem der Stein umfällt, verringert sich nun aber auch seine Lageenergie. Sie wird beim Fallen in Bewegungsenergie gewandelt, welche wiederum den nächsten Stein aus dem Gleichgewicht bringt. Da die Steine mit zunehmender Größe auch immer stabiler stehen, wird die zum Kippen der Steine nötige Energie ebenfalls immer größer. Du kannst den kleinen Stein direkt vor den großen stellen, er wird es nicht schaffen, diesen umzuwerfen, denn seine Lage- (und damit auch die Bewegungs-) -energie ist zu klein. Tatsächlich benötigst du jeden Stein, um den großen zu Fall zu bringen. Erst indem du alle Dominosteine einzeln aufrichtest und so die Lageenergie jedes Steines vergrößerst, erhalten sie beim Fallen die notwendige Bewegungsenergie, den jeweils nächsten – und schließlich den größten – umzuwerfen.

Balance-Stäbe

110 kV-Halle

Balancier den Stab senkrecht auf einer Hand!
Was passiert, wenn du den Stab umdrehst?



- Balancier den Stab so, dass die Holzkugel unten ist. Nach ein paar Versuchen drehst den Stab um. In welcher Position lässt sich der Stab einfacher balancieren?
- Dein Partner und du nehmen zwei verschiedene Stäbe. Wer schafft es länger, den Stab zu balancieren? Was passiert, wenn ihr die Stäbe tauscht?
- Stell zwei Stäbe nebeneinander auf den Boden und lass sie gleichzeitig los. Welcher fällt schneller um.
Was passiert, wenn du einen Stab umdrehst?

Das Balancieren rotierender Teller ist fester Bestandteil jeder Zirkusvorstellung. Wenn man den Dreh einmal raus hat, ist es einfacher als es aussieht, da die Masse des drehenden Tellers den Stab stabilisiert. Probier es aus!

Ob Handfläche, Fingerspitze, Stirn oder Nase: Egal worauf du den Stab balancierst, stets wirst du versuchen, das Kippen des Stabes mit kleinen schnellen Bewegungen zu verhindern. Ohne deine Balancierkünste würde der Schwerpunkt des Stabs schnell wieder die tiefste, stabile Position einnehmen – der Stab fiel auf den Boden.

Damit dies nicht passiert, musst du die Fallbewegungen des Stabes rechtzeitig ausgleichen, indem du das untere Ende des Stabes in Fallrichtung nachführst. Durch diese Ausgleichsbewegungen wird der Schwerpunkt des Stabes über dem Auflagepunkt gehalten, wodurch der Stab tatsächlich in einer mehr oder weniger senkrechten Position verbleibt, einem dynamischen Gleichgewicht.

Je nachdem, welchen Stab du nimmst und wie du ihn balancierst, wird es dir mehr oder weniger schwer fallen, dieses dynamische Gleichgewicht zu halten. So ist es für viele Besucher fast unmöglich, den Stab zu balancieren, wenn sich die Kugel am unteren Ende des Stabes befindet, während die umgekehrte Position auch Ungeübten kaum Probleme bereitet. Wie gut es dir gelingt, einen Stab in der Balance zu halten, hängt also offensichtlich von der Position des Schwerpunktes ab, und daher sollten wir uns die Bewegungen der verschiedenen Stäbe genauer betrachten.

Stell dazu zwei Stäbe nebeneinander auf den Boden und lass sie gleichzeitig fallen:

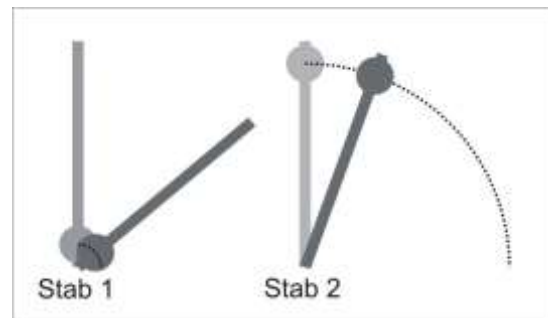
Während Stab 1 fast augenblicklich umkippt, schlägt die Kugel von Stab 2 deutlich später auf den Boden auf. Je höher der Schwerpunkt, umso langsamer kippt der Stab.

Physikalisch betrachtet handelt es sich bei der Kippbewegung um eine Rotation um den Auflagepunkt. Auch wenn die Stäbe annähernd

die gleiche Masse haben, ist sie doch bei beiden anders verteilt. Je weiter außen sie ist, umso „träger“ fällt der Stab, und tatsächlich heißt die physikalische Größe, mit der Form und Massenverteilung eines rotierenden Körpers beschrieben wird, „Trägheitsmoment“.

Je größer das Trägheitsmoment ist, umso mehr Zeit hast du, durch das Nachführen deiner Hand die Bewegungen des Stabes auszugleichen. Neben der Position der Kugel auf dem Stab kommt es also auch auf deine Reaktionszeit und Geschicklichkeit an, und da bestehen durchaus erhebliche Unterschiede zwischen den Besuchern.

Der Erhalt des dynamischen Gleichgewichts beim Balancieren ist also letztlich ein Wettstreit zwischen dem individuellen Reaktionsvermögen und der Trägheit des Stabes.



Hochseilrad

Außengelände

Auf diesem Fahrrad kannst auch du zum Hochseilartisten werden.



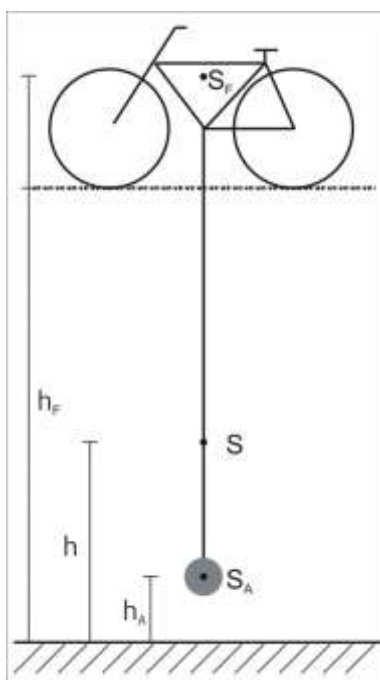
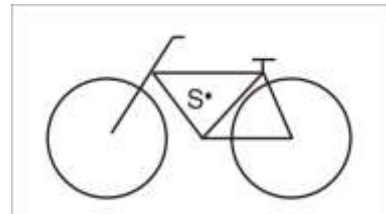
- Was schätzt du: Wie viel wiegt der Ausleger? Wie lang ist er?
- Wo befindet sich der Schwerpunkt bei einem normalen Fahrrad?
Wo befindet er sich beim Hochseilrad?

Im Winter ist das Hochseilrad leider außer Betrieb. Da sich das Stahlseil bei tiefen Temperaturen zusammenzieht, muss es entspannt werden, sobald die ersten Nachtfröste einsetzen.

„Ist das sicher?“ „Fällt man da auch nicht runter?“ sind die üblichen Fragen, die die Besucher stellen, wenn sie das erste Mal vor dem Hochseilrad stehen. Wenn die Antwort „Das hat der Technische Überwachungsverein geprüft.“ nicht befriedigt, dem kann vielleicht das Verständnis der „Physik des Hochseilrades“ so viel Vertrauen geben, dass er selber wagt, fünf Meter über dem Boden auf einem dünnen Stahlseil zu fahren.

Wie stabil die Lage eines Objektes ist, kann ein Physiker einschätzen, indem er sich die Position des Schwerpunktes anschaut. (Den Schwerpunkt eines Körpers kann man sich als den Punkt vorstellen, in dem die gesamte Masse des Körpers konzentriert ist. S. a Station „Balancier-Besen“). Ein Objekt ist immer dann stabil gelagert, wenn sein Schwerpunkt die tiefste mögliche Position erreicht hat, der Physiker spricht dann von einem „stabilen Gleichgewicht“.

Bei einem normalen Fahrrad befindet sich der Schwerpunkt im Rahmendreieck, so dass ein liegendes Fahrrad eine stabilere Position als ein stehendes hat.



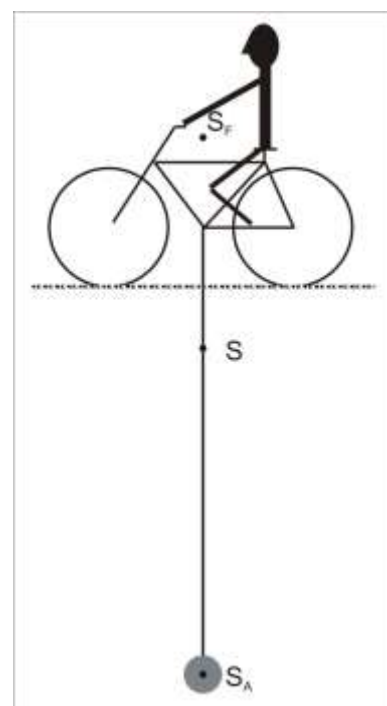
Ganz anders beim Hochseilrad: An ihm ist ein Ausleger befestigt, dessen Schwerpunkt sich etwa 3 m unterhalb des Fahrrades befindet. Der Schwerpunkt der gesamten Konstruktion ist abhängig von der Masse und Größe des Auslegers und lässt sich näherungsweise so berechnen:

$$h = \frac{m_F h_F + m_A h_A}{m_F + m_A}$$

h Höhe des Schwerpunktes
 h_F Höhe des Fahrradschwerpunktes
 h_A Höhe des Auslegerschwerpunktes
 m_F Masse des Fahrrades
 m_A Masse des Auslegers

Das Eisengewicht am Ende des Auslegers wiegt etwa 50 kg, so dass sich der Schwerpunkt weit unter dem Seil befindet und das Fahrrad immer in einer aufrechten Position gehalten wird. Wenn sich nun eine Person auf das Fahrrad setzt, verlagert sich durch deren Masse der Schwerpunkt zwar etwas nach oben, liegt jedoch noch immer unter dem Auflagepunkt, so dass sich das gesamte System in einem stabilen Gleichgewicht befindet.

Wenn dich diese Betrachtung nun soweit überzeugt hat, dass du selber auf das Fahrrad steigst, wirst du vielleicht feststellen, dass du selbst bei kleiner Geschwindigkeit viel ruhiger und gleichmäßiger als sonst radelst. Jedes Kippen, jede seitliche Auslenkung des Fahrrades würde den Schwerpunkt des Systems nach oben verlagern. Solche „labilen Zustände“ gehen aber schnell wieder in den „stabilen“ Zustand über, bei dem der Schwerpunkt unten und das Fahrrad mit dir oben sind.



Die ungehorsame Garnrolle

110 kV-Halle

Ziehst du am Seil, bewegt sich die Garnrolle.

Doch warum rollt sie mal von dir weg und mal zu dir hin?



- Wohin rollte die Garnrolle, wenn du das Seil waagerecht hältst?
- Wohin rollt die Garnrolle, wenn du das Seil fast senkrecht hältst?
- Probier verschiedene Zugwinkel aus; findest du den Winkel, an dem sich das Verhalten der Garnrolle ändert?
- Was passiert, wenn du an diesem Punkt kräftig am Seil ziehst?
- Was denkst du; ist dieser Winkel bei jeder Garnrolle gleich groß?

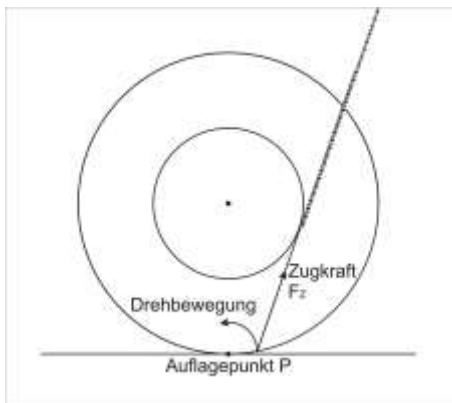
„Die kleinen Gegenstände sind ungehorsamer als die großen. Einen Stein kann man vermeiden, man kann ihm ausbiegen. Vor dem Staub aber kann man sich nicht retten. Man muß mitten hindurch.“

Maxim Gorki, Das Leben des Klim Samgin

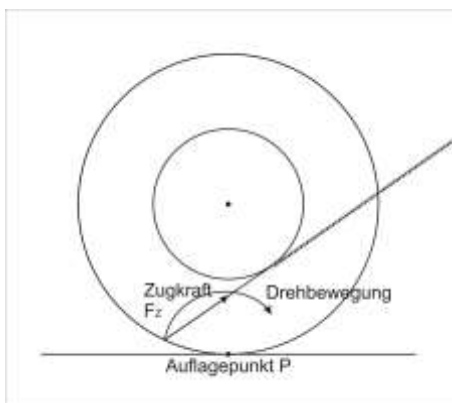
So ungehorsam ist die Garnrolle gar nicht, wenn du erst einmal die Gesetzmäßigkeit dahinter durchschaut hast. Hältst du das Seil sehr flach, d.h. in einem kleinen Winkel, so kommt die Garnrolle zu dir. Wenn du das Seil nach oben ziehst, ist der Zugwinkel groß und die Rolle rollt von dir weg. Durch Probieren findest du schnell den Zugwinkel, an dem die Rolle weder vor- noch zurückrollt, sondern rutscht, und der gleichsam die Grenze zwischen den beiden Rollbewegungen darstellt.

Um die Bewegungen der nun sehr gehorsamen Garnrolle besser zu verstehen, lohnt es sich, einen Blick auf die an der Rolle wirkenden Kräfte zu richten. Kraft ist eine der grundlegenden physikalischen Größen. Sie ist nur über ihre Wirkung erfahrbar und ist – im Gegensatz beispielsweise zur Energie – immer gerichtet. Um Kräfte zu beschreiben, benötigen wir also nicht nur die Angabe über deren „Stärke“ (der Physiker spricht vom „Betrag“), sondern auch über die Richtung (den „Vektor“), in die die Kraft wirkt.

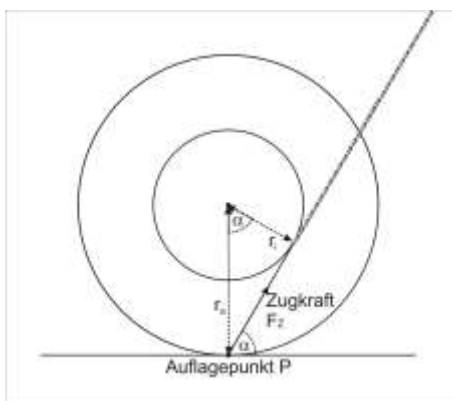
In welche Richtung die Kraft an der Garnrolle wirkt, kannst du selbst beobachten. Bitte einen Partner, das Seil in Position zu halten und stelle dich neben die Garnrolle. Nun kannst du in Gedanken das Seil bis zum Boden verlängern und so die Richtung der Kraftwirkung erkennen.



Wenn das Seil nach oben gezogen wird, wirkt die Kraft *vor* dem Auflagepunkt P auf die Garnrolle. Daraus resultiert eine Drehbewegung um den Auflagepunkt und die Garnrolle rollt nach hinten.



Wenn das Seil in einem flachen Winkel gezogen wird, greift die Zugkraft hinter dem Auflagepunkt der Garnrolle an. Die daraus resultierende Drehbewegung lässt die Garnrolle nach vorn rollen.



Wenn die Verlängerung des Seils genau auf den Auflagepunkt P zeigt, greift die Zugkraft auch exakt an diesem Auflagepunkt an. Die Rolle dreht sich nicht, sondern gerät allenfalls ins Rutschen. Wie groß dieser Winkel genau ist, hängt von dem Verhältnis des inneren zu äußeren Radius ab. So lässt sich die Geometrie der Garnrolle mit folgender Formel beschreiben:

$$\cos \alpha = \frac{r_i}{r_a}$$

α Zugwinkel
 r_i Radius der inneren Rolle
 r_a Radius der äußeren Rolle

VIP-Schaukel

Außengelände

Wie viele Personen müssen auf das kurze Ende der Wippe steigen, um das lange Ende anzuheben?

Gelingt es Euch, den Balken ins Gleichgewicht zu bringen?

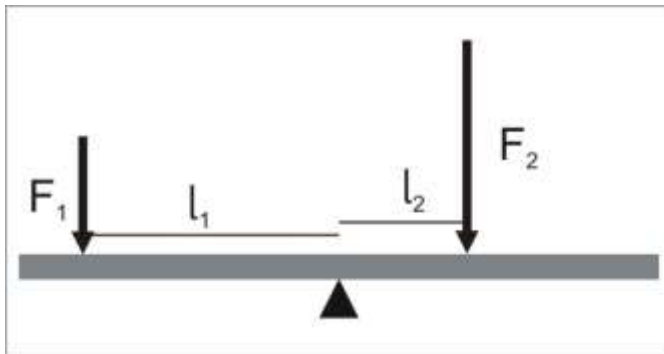


- Was schätzt du: Wie viel wiegt der Balken?
- Wie viele Personen müssen sich zusätzlich auf das kurze Ende der Wippe stellen, um eine Person auf dem langen Ende anzuheben?

„Bürger in Bewegung“ ist der Titel des geplanten Wiedervereinigungsdenkmals in Berlin. Beim Entwurf der Stuttgarter Architekten Milla und Partner und der Berliner Künstlerin Sasha Waltz handelt es sich um eine wippend gelagerte Schale, die durch eine entsprechend große Anzahl von Personen zur Seite geneigt werden kann.

Kaum ein Kinderspielplatz kommt ohne Wippe aus. Doch was tun, wenn sich kein Partner in der eigenen Gewichtsklasse findet? Entweder durch Ausprobieren oder mit sachkundiger Hilfe Älterer ist die Lösung schnell gefunden: Wer leichter ist, sitzt weiter außen, das schwerere Kind rutscht nach innen. Ganz intuitiv kommt hier eines der ältesten bekannten physikalischen Prinzipien zur Anwendung: Das „Hebelgesetz“ wurde bereits in der griechischen Antike durch den Mathematiker Archimedes von Syrakus (287–212 v. Chr.) mathematisch beschrieben; es zeigt den Zusammenhang zwischen der Länge der Hebelarme und den dort wirkenden Kräften:

„Ein Hebel ist im Gleichgewicht, wenn die Summe aller an ihm anliegenden Drehmomente – also den Produkten aus Kraft und Abstand zum Drehpunkt – gleich Null ist.“



$$M_1 = M_2$$

$$F_1 l_1 = F_2 l_2$$

M Drehmoment

F Kraft

l Länge des Hebelarms

Der praktische Versuch an den VIP-Schaukeln zeigt allerdings, dass die alleinige Kenntnis des Gesetzes häufig nicht genügt, auch nur die gleichschenklige Wippe ins Gleichgewicht zu bringen. Ebenso wichtig ist ein koordiniertes Vorgehen der Gruppe, die schließlich feststellt, dass oft die Bewegung einer einzelnen Person reicht, um alle anderen auszubalancieren.

Noch schwieriger wird an der schief gelagerten Balkenschaukel: Auch hier reicht die schematische Anwendung des Hebelgesetzes nicht aus. Es ist nämlich, wie viele andere physikalische Gesetze auch, für „Idealbedingungen“ formuliert, also z.B. unter der Annahme, dass der Balken reibungsfrei gelagert ist und keine eigene Masse besitzt. Weder das eine noch das andere trifft auf die VIP-Schaukel zu und so verschätzen sich die meisten Besucher auch regelmäßig in der Anzahl der Personen, die man zum Ausbalancieren der Wippe benötigt. Der Balken ist im Verhältnis 2:1 geteilt, dennoch reichen zwei Leute auf dem kurzen Ende nicht aus, auch nur das lange Ende anzuheben, geschweige denn eine zusätzliche Person. Denn neben der Anzahl und der Verteilung der Personen muss auch die Masse des Holzbalkens in Betracht gezogen werden. Das Experiment zeigt, dass je nach Körpergewicht drei bis sechs Personen nötig sind, um die halbe Tonne Holz auszubalancieren.

Kugelwettlauf

110 kV-Halle

Anfangs- und Zielpunkt beider Kugeln sind gleich.

Eine der beiden Kugeln rollt auf der schiefen Ebene ab; die andere nimmt einen längeren Weg.

Welche kommt eher ins Ziel?



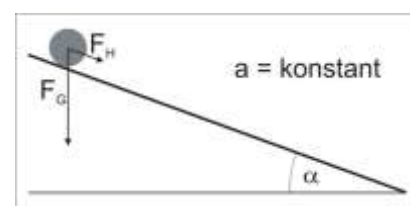
- Welche Kugel ist eher da, welche schneller?
- Was würde passieren, wenn man sehr kleine oder sehr große Kugel rollen lässt?

Murmeln sind keine neue Erfindung. Die ältesten Murnelfunde sind etwa 5000 Jahre alt und stammen aus Ägypten. Die erste Glasmurmeln wurde allerdings erst Mitte des 19. Jahrhunderts im Thüringischen Lauscha hergestellt.

Jeder, der mal mit Marmelbahnen gespielt hat weiß, dass auf langen Bahnen die Kugeln auch länger rollen. Der Kugelwettlauf allerdings widerlegt diese Alltagserfahrung: Hier benötigt die Kugel auf der langen Bahn weniger Zeit als auf der kurzen. Nach einigem Experimentieren haben die meisten Besucher hierfür jedoch schnell eine Erklärung parat: „Auf der durchhängenden Bahn bekommt die Kugel gleich am Anfang mehr Schwung, dadurch ist sie schneller.“

Auch wenn diese Begründung einfach und plausibel ist, lohnt es sich, ein bisschen genauer hinzuschauen und sich Gedanken um solche Begriffe wie „Schwung“ oder „schnell“ zu machen. Wenn du dir z. B. die „Einschlagspuren“ im Auffangbehälter genauer ansiehst, kannst du an deren Tiefe erkennen, dass tatsächlich die Kugel auf der geraden Bahn am Schluss schneller ist, d.h. eine höhere Geschwindigkeit hat. Die Kugel auf der gebogenen Bahn ist am Ende langsamer, aber dennoch eher da. Die oben aufgeführte Erklärung muss also noch etwas verfeinert werden, indem du beispielsweise den Unterschied zwischen der momentanen und der Durchschnittsgeschwindigkeit betrachtest.

Auf der geraden Bahn rollt die Kugel langsam los und wird im Verlauf immer schneller, bis sie am Ende ihre höchste Geschwindigkeit erreicht hat. Der Physiker würde sagen: Da die Bahn einen festen Neigungswinkel hat, ist die Hangabtriebskraft konstant. Die Kugel wird durch die Hangabtriebskraft gleichmäßig beschleunigt, wodurch die Geschwindigkeit kontinuierlich steigt. Mathematisch betrachtet sieht das ganze so aus.

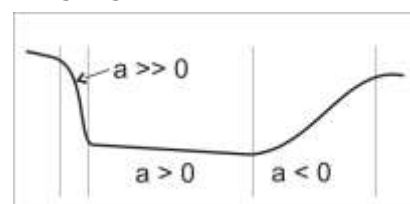


$v = a \cdot t$ (bei konstanter Beschleunigung)

$$a = \frac{F_H}{m} = \frac{F_G \sin \alpha}{m} = g \sin \alpha$$

v	Geschwindigkeit
a	Beschleunigung
t	Zeit
F_H	Hangabtriebskraft
F_G	Gewichtskraft
m	Masse der Kugel
g	Erdbeschleunigung
α	Neigungswinkel der Bahn

Hingegen hat die durchhängende Bahn fünf Abschnitte mit jeweils anderen Neigungswinkeln und in jedem Abschnitt erfährt die Kugel eine andere Beschleunigung. Zunächst wird die Kugel durch das große Gefälle stark beschleunigt, dadurch nimmt ihre Geschwindigkeit schnell zu. Im letzten Drittel wird die Kugel abgebremst (die Beschleunigung ist negativ), so dass sich ihre Geschwindigkeit wieder verringert.



Genau genommen führen beide Kugeln zwei Bewegungen gleichzeitig aus: Zum einen bewegt sie sich vorwärts (der Physiker spricht von Translation), zum anderen dreht sie sich um sich selbst (Rotation). Die Kugel auf der gebogenen Bahn bekommt durch beide Bewegungen genügend Bewegungsenergie, um wieder bergauf zu rollen. Allerdings ändert sich in jedem Abschnitt die Bewegungsrichtung der Kugel. Bei jeder Richtungsänderung verringert sich die Bewegungsenergie der Kugel, so dass sie am Ende tatsächlich langsamer – aber immer noch eher als die Kugel auf der geraden Bahn – ins Ziel kommt.

Zweifach-Rollbahn

110 kV-Halle

Die gerade Rollbahn ist kürzer als die gebogene.
Doch welche Kugel kommt eher ins Ziel?



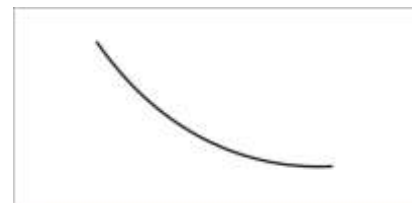
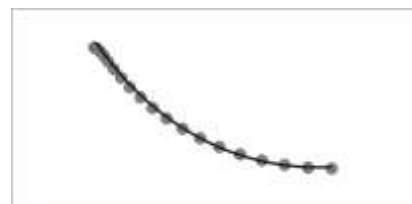
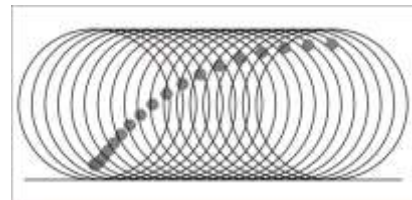
- Welche Kugel ist eher da, welche schneller?

Die Beschäftigung mit Kugelbahnen ist nicht nur ein netter physikalischer Zeitvertreib. Konstrukteure von Achterbahnen oder Rodelbahnen kommen ohne solides Wissen über Rollkurven und deren mathematische Beschreibung nicht aus.

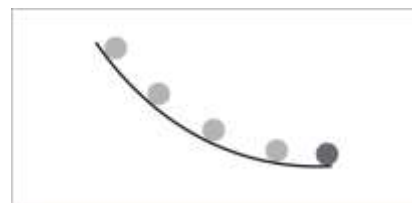
Ähnlich wie bei der Station „Kugelwettlauf“ kann man auch an der Zweifachrollbahn sehen, dass die Beschleunigung einer rollenden Kugel von der Neigung der Bahn abhängt. Auch hier ist die Kugel auf der gebogenen – also längeren Bahn deutlich eher am Ziel, da sie am Anfang stärker beschleunigt wird. Doch wie schnell können Kugeln auf einer Rollbahn überhaupt werden? Gibt es so etwas wie die „schnellste Rollbahn“?

Bereits der Schweizer Mathematiker und Arzt Johann Bernoulli (1667–1741) beschäftigte sich mit der Suche nach der sogenannten „Brachistochrone“ und entwickelte eine elegante mathematische Lösung, mit der er den Grundstein für ein neues mathematisches Teilgebiet, die Variationsrechnung, legte.

Wer nicht rechnen möchte, kann sich die Form der Brachistochrone aber auch geometrisch konstruieren. Sie entspricht einer Zykloide, also der Kurve, die durch die Überlagerung einer Vorwärts- mit einer Drehbewegung entsteht. Als Beispiel mag dir der Hinterradreflektor eines vorbeifahrenden Fahrrads dienen, dessen Bewegung sich aus der Vorwärtsbewegung des gesamten Fahrrads und der Drehbewegung des Hinterrades zusammensetzt und je nach Position des Reflektors mehr oder weniger bogenförmig aussieht. Wenn du die einzelnen Positionen des Reflektors miteinander verbindest, erhältst du eine der Brachistochronen ähnliche Rollkurve.



Solche Kurven bieten nicht nur die Möglichkeit, schnelle Murmelbahnen zu konstruieren; die Brachistochrone hat noch eine weitere bemerkenswerte Eigenschaft. Sie ist gleichzeitig auch eine „Tautochrone“, d. h. eine Bahn auf der die Laufzeit der Kugel unabhängig vom Startpunkt ist. Auf so einer Bahn ist es egal, wo die Kugel startet, denn sie benötigt immer genau die gleiche Zeit bis zum Ende. Dies kannst du ausprobieren, indem du entweder die Zeit bei verschiedenen Starthöhen nimmst oder die zwei Kugeln zeitgleich an verschiedenen Positionen starten lässt; sie kommen (fast) zeitgleich ins Ziel.



Dosenwettlauf

110 kV-Halle

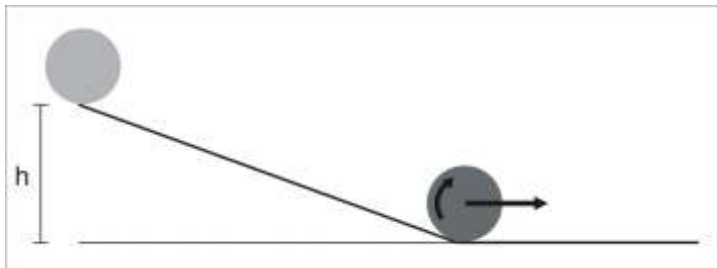
Die Dosen sind mit unterschiedlichen Materialien gefüllt. Welche rollt am schnellsten, am langsamsten, am weitesten?



- Welche Dose ist als erste am Knick der Bahn?
- Rollen alle Dosen bis zum Ende der Bahn?
- Welche ist als erste dort?

Mit Eiern kannst du zu Hause ein ganz ähnliches Experiment machen. Lass ein rohes und ein gekochtes Ei vorsichtig über den Tisch rollen. Welches Ei rollt schneller, welches weiter? Lass nun die Eier über schiefe Ebene rollen...

Bei den Kugelbahnen konntest du sehen, welchen Einfluss die Form einer Bahn auf die Rollgeschwindigkeit der Kugel hat. Beim Dosenwettlauf werden die Dosen alle auf der gleichen schiefen Ebene beschleunigt, unterscheiden sich aber dennoch deutlich in ihrem Rollverhalten. Die wassergefüllte Dose beschleunigt am meisten, verliert auf der gerader jedoch auch schnell wieder ihre Geschwindigkeit. Die leere Dose ist zwar anfangs etwas langsamer als die wassergefüllte, hält aber ihre Geschwindigkeit. Die Dose mit Glycerin schafft es nicht mal bis ans Ende der Bahn, ebenso wie die Dose mit den Holzkugeln. Bei der Dose mit Gelwachs kommt es zudem auf die Startposition an.



Alle Dosen führen zwei Bewegungen aus: zum einen bewegen sie sich entlang der Rollbahn (Translation), zum anderen drehen sie sich um sich selbst (Rotation). Die Energie für diese Bewegungen erhalten sie

durch dich, indem du sie auf das obere Ende der Rollbahn legst. Dadurch wird ihr Schwerpunkt nach oben verlagert und ihre potentielle Energie steigt.

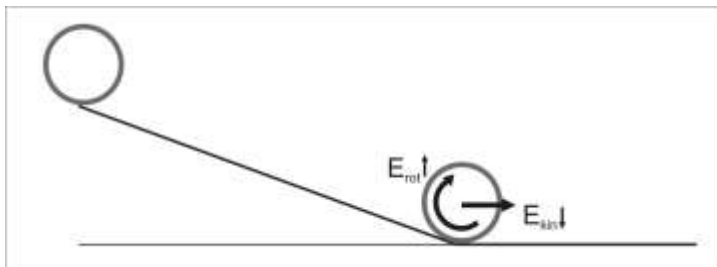
$$E_{pot} = m * g * h$$

m Masse des Körpers
 h Höhe

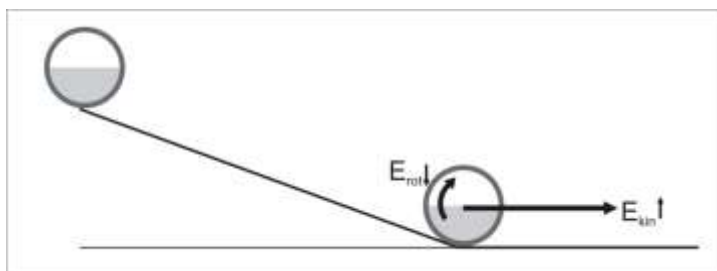
Diese potentielle Energie wird beim Beschleunigen der Dose in Bewegungsenergie gewandelt, entsprechend der zwei Bewegungen der Dose setzt sich diese Energie aus der Translations- und der Rotationsenergie zusammen.

$$E_{bew} = E_{kin} + E_{rot} = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$$

v Geschwindigkeit
 ω Winkelgeschwindigkeit
 J Trägheitsmoment



Bei der luftgefüllten Dose wird die ganze Dose in Drehung versetzt, so dass ein großer Anteil der potentiellen Energie in Rotationsenergie gewandelt wird.



Bei den flüssigkeitsgefüllten Dosen hingegen „fließt“ das Wasser, ohne selbst in Drehung versetzt zu werden, so dass ein großer Teil der potentiellen Energie in Translationsenergie gewandelt wird: Die Dosen rollen schneller. Allerdings reiben die Teilchen der Flüssigkeit

aneinander und verringern so die Bewegungsenergie, daher verlieren die Dosen schnell an Geschwindigkeit; je zäher die Flüssigkeit, umso mehr werden sie durch die Reibung gebremst. Bei der Dose mit Gelwachs ist der Doseninhalt fest mit der Dose verbunden, daher muss viel Energie dafür aufgewendet werden, die Dose in Drehung zu versetzen. Der Widerstand, der überwunden werden muss, um einen Körper in Drehung zu versetzen wird „Trägheitsmoment“ genannt und ist bei der gelgefüllten Dose aufgrund der Masse und der Verteilung des Doseninhaltes am größten. Da hier jedoch keine Reibung innerhalb des Doseninhaltes auftritt, verringert sich die Bewegungsenergie kaum und die Dose rollt „einmal in Schwung gekommen“ am weitesten.

Mara-Ton

110 kV-Halle

Der Ring wird auf der Schale in Rotation versetzt. Wie lange mag er sich wohl drehen?

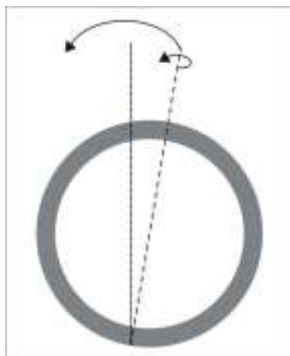
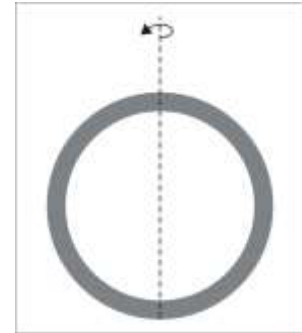


- Wie bewegt sich der Ring?
Welche verschiedenen Bewegungen kannst du beobachten?
- Was hörst du?
- Was schätzt du, wie schwer ist der Ring?

Der in der Schweiz geborene Mathematiker Leonard Euler (1707-1783) veröffentlichte in seinem Leben mehrere Hundert Publikationen zu verschiedenen mathematischen, physikalischen, sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Themen. Eine seiner vielen wegweisenden Arbeiten ist die mathematische Beschreibung rotierender Körper. Diese „Eulerschen Kreiselgleichungen“ wurden ebenso nach ihm benannt wie die „Euler-Gleichungen“ (ein mathematisches Modell zur Beschreibung strömender Flüssigkeiten), die „Euler-Winkel“, die „Euler-Charakteristik“, die „Eulersche Formel“ oder die „Eulersche Zahl“.

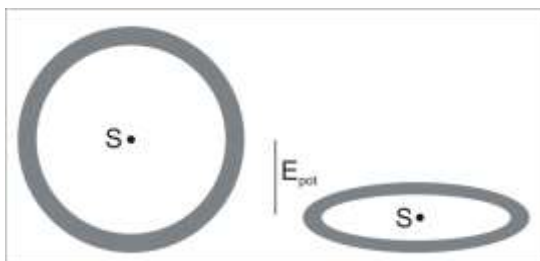
Das Mara-Ton zieht die Zuschauer meist unwiderstehlich in seinen Bann. Auch die eigentlich eher ungeduldigen oder eiligen Besucher verweilen und warten darauf, dass der Ring endlich zur Ruhe kommt; der allerdings wird stattdessen immer schneller und lauter. Je nachdem, wie geschickt der Ring angedreht wird, kann das schon mal eine Weile dauern, Zeit genug also, sich den Ring und seine Bewegungen genau zu betrachten.

Der Ring hat aufgrund seiner runden eine besondere Eigenschaft: Wenn er genau senkrecht steht und sich dreht, fallen Rotationsachse und Symmetrieachse zusammen und der Schwerpunkt liegt genau über dem Auflagepunkt. Unter solchen Bedingungen ist eine Rotationsbewegung recht stabil, wie du beispielsweise bei verschiedenen Kreiselarten sehen kannst.



Der Ring kann sich allerdings – wie jeder andere Körper auch – der Schwerkraft nicht entziehen. Er fängt an „zu eiern“, das heißt die Rotationsachse steht nicht mehr senkrecht, sondern beginnt selbst, sich zu drehen. Diese Bewegung wird Präzession genannt und tritt beispielsweise auch bei der Drehachse der Erde auf, hier dauert ein Umlauf der Erdachse, das „Platonische Jahr“, etwa 25780 Jahre.

Indem der Ring sich dreht, reibt er auf der Edelstahlplatte. Diese Reibung zwischen den Metallen nicht sehr groß (sonst käme der Ring viel eher zum Stillstand) reicht aber aus, um die Rotation des Ringes immer so weit zu verlangsamen, so dass er sich schließlich „auf die Seite legt“.



Die damit verbundene Abnahme der potentiellen Energie kannst du sehen und hören, denn diese wird in die kinetische Energie der Präzessionsbewegung gewandelt. So ist die zunehmende Geschwindigkeit der Präzession als immer schnelleres „Wackeln“

des Ringes sichtbar und als lautstarkes Aufschlagen des Ringes auf der Edelstahlplatte hörbar. Die Rotationsbewegung hat hingegen fast aufgehört; der Ring dreht sich kaum noch um seine eigene Achse.

Dass der Ring so lang in Bewegung bleibt, hängt also weniger mit seiner Drehgeschwindigkeit am Anfang als vielmehr mit seiner großen Masse zusammen. Du kannst das leicht mit einer Münze überprüfen: Auch wenn du sie noch so schnell andrehst, wird sie doch kaum fünf Minuten lang die Besucher fesseln.

Sandfiguren–Pendel

110 kV–Halle

Ein langes, schweres Pendel wird angestoßen.
Verweile ruhig einige Zeit und betrachte das Entstehen der Muster.

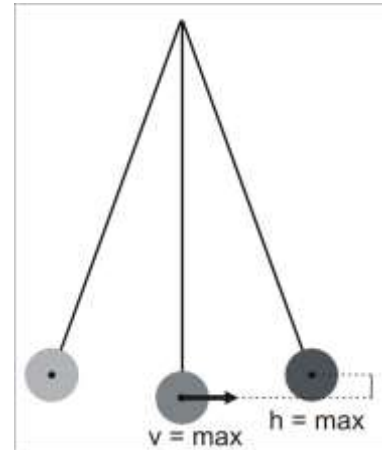


- Beobachte die Bewegungen des Pendels. Wie ändern sie sich mit der Zeit?
- Wie lange braucht das Pendel, bis es ganz zur Ruhe gekommen ist.
- Welche Grundform kannst du in den Sandmustern erkennen?

1851 zeigte der französische Physiker Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) mit Hilfe eines 67 m langen Fadenpendels, dass die Erde sich dreht. 1997 wiederholte die Imaginata das Experiment mit einem 105 m langen Pendel im damals entkernten Jenaer „Uniturm“ und bekam einen Eintrag in das Guinness World Record Buch. Heute zieht das Pendelgewicht im Stationenpark seine Spuren in den Sand.

Das Sandfigurenpendel lädt dich ein, seine Bewegungen beobachten, abzuwarten, ruhig zu werden und darüber nachzudenken.

Je nachdem, wie du das Pendel gestartet hast, wird es sich eher auf einer geraden oder einer kreisförmigen Bahn bewegen; du kannst das sehr gut an den Spuren im Sand erkennen. Um die Physik des Pendels besser zu verstehen, solltest du versuchen, das Pendel möglichst gerade schwingen zu lassen und deinen Blick auf Position und Geschwindigkeit des Pendelgewichtes zu richten. So kannst du sehen, dass sich Richtung und Geschwindigkeit der Pendelbewegung periodisch ändern. Am tiefsten Punkt seiner Bahn bewegt es sich am schnellsten, am höchsten Punkt kehrt es seine Bewegungsrichtung um.



Hilfreich für das Verständnis ist eine Betrachtung, wie sie schon bei den Stationen „Kugelwettlauf“ oder „Mara-Ton“ dargestellt wurde: Die Ursache der Bewegungsänderung ist der Wandel der Energieform „potentielle“ (Lage-) in „kinetische“ (Bewegungs-) Energie. Anders als bei diesen Stationen findet aber der Energiewandel nicht nur in eine Richtung statt, sondern beide Energieformen wechseln periodisch.

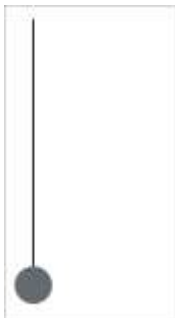


Am äußeren Ende des Pendelweges hat das Pendelgewicht seine maximale Höhe erreicht und damit seine größte potentielle Energie.

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h = \max$$

m	Masse des Körpers
h	Höhe

Da das Pendel dort seine Bewegungsrichtung ändert, sind seine Geschwindigkeit und daher auch seine kinetische Energie in diesem Moment gleich null.



Am tiefsten Punkt seiner Bahn hat das Pendel aufgrund seiner Geschwindigkeit die größte kinetische Energie.

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} = \max$$

m	Masse des Körpers
v	Geschwindigkeit

Die potentielle Energie ist null, da das Pendel seine tiefste mögliche Position erreicht hat.

Unter idealen Bedingungen, das heißt ohne Reibung, würde bei jeder Pendelschwingung alle potentielle in kinetische Energie gewandelt und umgedreht, so dass die Summe der beiden Energieformen immer konstant wäre und das Pendel bis in alle Zeiten schwingen würde.

$$E_{pot} + E_{kin} = konst$$

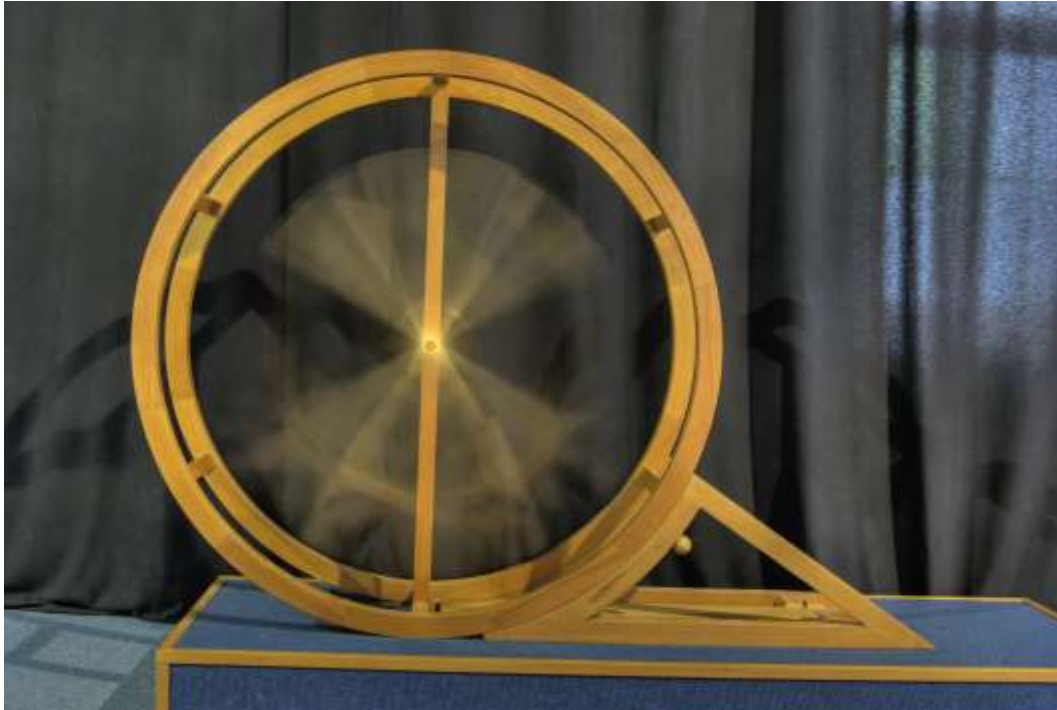
Diese Formel stellt einen Spezialfall des Energieerhaltungssatzes dar, eines der fundamentalen Prinzipien der Naturwissenschaft. Er besagt, Energie eine Erhaltungsgröße ist, also in einem geschlossenen System die Summe aller Energieformen immer gleich ist.

Unter den realen Bedingungen des Stationenparks gibt es neben der kinetischen und potentiellen Energie auch noch die Reibung, und so verringert sich die Energie des Pendels, bis es am Ende immer feinere Muster in den Sand gezeichnet und ihn damit – kaum messbar – angewärmt hat.

Chaos–Pendel

110 kV–Halle

Gleichmäßig und vorhersagbar schwingt ein einfaches Pendel hin und her.
Doch was passiert, wenn du an ihm einen zweiten Pendelarm anbringst?



- Was vermutest du; werden sich die beiden Doppelpendel gleich bewegen?
- Halte den langen Pendelarm fest und stoße den kleinen an.
Lass nun dem langen Pendelarm los. Was beobachtest du?

Aufgrund seiner astronomischen Berechnungen stellte der französische Physiker und Mathematiker Jules Henri Poincaré (1854 – 1912) die grundlegende Frage, ob alle physikalischen Phänomene stets vorhersagbar sind. In seinem Bestseller „Wissenschaft und Methode“ gab er 1912 folgende Antwort:
„Es kann vorkommen, dass kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große im Ergebnis zur Folge haben (...) Vorhersage wird unmöglich und wir haben ein zufälliges Phänomen.“

Pendel sind ein Symbol der Regelmäßigkeit. Wenn du die Schwingungsdauer eines Pendels kennst, weißt du genau, wie lang es für eine, hundert oder tausend Schwingungen brauchen wird (so galten Pendeluhren über 300 Jahre lang als die genauesten Zeitmesser). Völlig anders ist die Situation, wenn du zwei Pendel aneinander hängst. Deren Bewegungen sind alles andere als gleichmäßig, sondern unstet und nicht vorhersagbar; sie bewegen sich „chaotisch“.

Das Chaospendel ist eine mittlerweile klassisch gewordene Veranschaulichung von „komplexen“ oder „chaotischen“ Systeme, die völlig regellos erscheinen, auch wenn sie an sich einfachen physikalischen Gesetzmäßigkeiten unterliegen.

Mit einem der Doppelpendel kannst du den Unterschied zwischen „vorhersagbarem“ und „chaotischem“ Verhalten demonstrieren: Wenn du den zunächst den großen Pendelarm festhältst und nur den kleinen schwingen lässt, bewegt dieser sich regelmäßig wie jedes andere einfache Pendel auch.



Wenn du nun den großen Pendelarm loslässt, beginnt dieser ebenfalls zu schwingen, da der kleine Pendelarm einen Teil seiner Bewegungsenergie auf den großen überträgt. Diese Energieübertragung geht jedoch nicht nur in eine Richtung, sondern beide Pendel übertragen sich immer wieder gegenseitig einen Teil ihrer Bewegungsenergie.

Ein Merkmal solcher „gekoppelten Systeme“ ist, dass sie sehr empfindlich auf unterschiedliche Ausgangsbedingungen reagieren. Du kannst das recht deutlich beim Vergleich der beiden Doppelpendel sehen. Selbst wenn sich die beiden anfangs noch synchron bewegen; nach ein paar Schwingungen verhalten sich beide völlig anders und kehren nicht mehr zu einer gemeinsamen Bewegung zurück. Die beiden Doppelpendel sind zwar recht ähnlich, aber eben nicht identisch, und so können minimale Unterschiede beispielsweise der Länge, Masse oder Lagerung der Pendel eine große Wirkung zeigen.

Chaotisches Verhalten ist keine Seltenheit. Das wohl prominenteste Beispiel für ein System, bei dem sichere Prognosen nur für einen kurzen Zeitraum möglich sind, ist das Wetter. Auch Börsenkurse, Verkehrsstaus, die Entwicklung von Räuber–Beute–Populationen oder die Stabilität unseres Sonnensystems lassen sich wie das Chaospendel zwar durch mathematische Gleichungen beschreiben, jedoch nicht langfristig vorhersagen.

Klick-Klack

110 kV-Halle

Lenke eine oder mehrere Kugeln aus und lass diese gegen die anderen prallen.



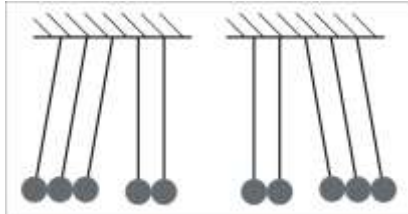
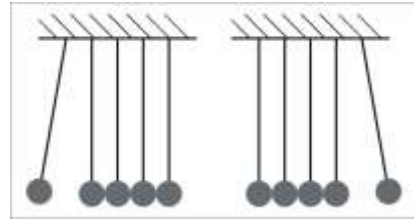
- Was passiert, wenn du eine Kugel gegen die anderen prallen lässt?
- Bewegt sich die Kugel in der Mitte?
- Was passiert, wenn du 2, 3 oder 4 Kugeln auslenkst?
- Wie lange dauert es, bis die Kugeln zum Stillstand gekommen sind?
- Lenke erst zwei Kugeln auf der einen Seite und dann eine Kugel auf der anderen Seite aus.

„Eine in der Hand ruhende Büchsenkugel ist das harmloseste Ding von der Welt; durch ihre Schwere kann sie keine große Wirkung ausüben, während sie, abgeschossen und mit einer großen Geschwindigkeit begabt, gewaltsam alle Schranken durchbricht.“

Hermann von Helmholtz,
„Über die Erhaltung der Kraft“

In Kleinformat werden die fünf pendelnden Kugeln seit den sechziger Jahren als dekorativer Schreibtischschmuck angeboten. Ob dem Schreibtischbesitzer dadurch tatsächlich Entspannung und kreative Ideen zuteilwerden, sei dahin gestellt; jedenfalls verdeutlichen „Newton-Wiege“, „Newtonpendel“, „Kugelstoß-Pendel“ oder eben „Klick-Klack“ wichtige physikalische Prinzipien.

Nimm zunächst eine Kugel und lass sie gegen die anderen stoßen. Es pendeln nicht etwa alle Kugeln (wie du möglicherweise erwartet hattest), sondern nur eine Kugel am anderen Ende der Reihe.



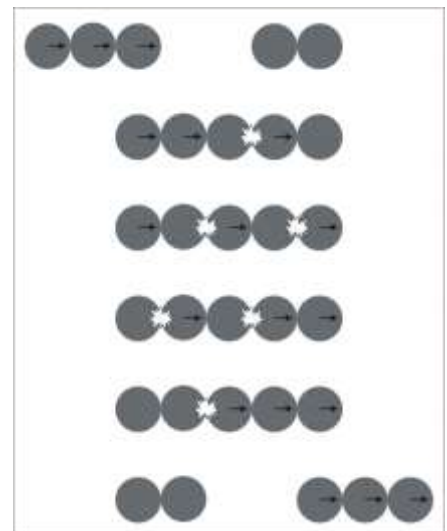
Auch wenn mehr als eine Kugel auf die anderen stößt, ist stets die Zahl der pendelnden Kugeln auf beiden Seiten gleich (Im Bild ist dies für drei ausgelenkte Kugeln dargestellt).

Vielleicht hast du schon mal beim Billardspielen beobachtet, dass bei einem sauber ausgeführten zentralen Stoß die weiße Kugel liegen bleibt, während die farbige Kugel davon rollt. Die weiße Kugel hat ihre Bewegungsenergie und ihren Impuls an die farbige Kugel übertragen; der Physiker spricht in so einem Fall von einem elastischen Zusammenstoß. Du kannst dir den Impuls als „Wucht“ eines bewegten Körpers vorstellen; die umso größer ist, je schwerer und schneller ist. Der Impuls hängt also von der Geschwindigkeit und der Masse der Kugel ab; je größer beides ist, umso größer ist auch der Impuls (ein anderer Begriff ist „Bewegungsgröße“).

$$p = m \cdot v$$

p	Impuls
m	Masse
v	Geschwindigkeit

Bei jedem Stoß findet eine Impulsübertragung zwischen zwei Kugeln statt. Da beim Klick-Klack die Kugeln so dicht aneinander hängen, dass sich fast berühren, wird der Impuls von Kugel zu Kugel bis hin zur letzten übertragen, die dann weggestoßen wird. Es handelt sich somit um eine Reihe von vier einzelnen Stößen, die allerdings so schnell aufeinander folgen, dass du sie als einen Stoß durch die Kugelreihe hindurch wahrnimmst. Dies funktioniert freilich nur, weil alle Kugeln annähernd die gleiche Masse haben und in einer Reihe hängen. Unter diesen Bedingungen „tauschen“ die zusammenstoßenden Kugeln ihre Geschwindigkeit, das heißt die angestoßene Kugel „übernimmt“ die Geschwindigkeit der ersten Kugel, die selbst stehen bleibt. Dies ist besonders eindrücklich zu sehen, wenn du mehr als eine Kugel auslenkst. Dabei übertragen zuerst die „inneren“ Kugeln ihren Impuls, werden dabei zu ruhenden Kugeln, um unmittelbar danach wieder von ihren äußeren Nachbarn gestoßen zu werden.



Der Impuls ist ebenso wie die Energie eine Erhaltungsgröße, das heißt unter idealen reibungsfreien Bedingungen (also weder auf dem Billardtisch noch im Stationenpark) bliebe der Gesamtimpuls aller Kugeln und damit deren Geschwindigkeit immer gleich groß. Dass dem in der Realität nicht so ist, liegt an der allgegenwärtigen Reibung und daran, dass sich die Kugeln bei jedem Stoß etwas verformen und nicht ganz zentral zusammenprallen.

Drehstuhl

110 kV-Halle

Setz dich auf den Stuhl und dreh dich.

Breite deine Arme aus oder zieh sie an den Körper.

Zur Verstärkung des Effektes kannst du die Gewichte in die Hand nehmen.

Ganz ähnlich funktioniert die Pirouettenmaschine auf dem Außengelände!



- Was passiert, wenn du auf dem drehenden Stuhl die Arme anziehst?
- Was passiert, wenn du die Arme ausstreckst?
- Bitte deinen Partner, sich auf den Stuhl zu setzen und die Gewichte in die Hand zu nehmen.

Dreh den Stuhl an.

Wiederholt den Versuch; diesmal hat dein Partner die Arme ausgebreitet.

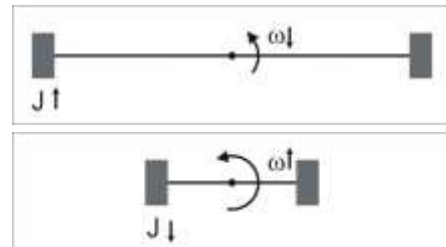
Dieses Experiment geht auf den Göttinger Physikprofessor Robert Wichard Pohl (1884-1976) zurück. Um physikalisches Grundwissen nicht nur theoretisch zu vermitteln sondern erfahrbar zu machen, entwickelte er zahlreiche Vorführ-experimente, die auch heute noch fester Bestandteil universitärer Praktika und Vorlesungen sind.

Dieses Experiment kannst du eigentlich mit jedem Bürostuhl machen. Wenn du dich darauf drehst und die Arme ausbreitest, verlangsamt sich die Drehung. Dass das nicht nur etwas mit der Reibung zu tun hat, erkennst du daran, dass sich die Drehgeschwindigkeit wieder vergrößert, sobald du die Arme an den Körper ziehst. Die Drehgeschwindigkeit hängt also offensichtlich davon ab, wie die rotierende Masse (in den Fall: du) um das Drehzentrum verteilt ist. Die physikalische Größe, die Masse, Form und Masseverteilung bei rotierenden Körpern beschreibt, heißt „Trägheitsmoment“ und ist dir bereits bei den Stationen „Balance-Stäbe“ und „Dosenwettlauf“ begegnet. Wie sehr dieser Name passt, wird deutlich, wenn du deinen auf dem Stuhl sitzenden Partner andrehst: Hat er die Arme ausgebreitet, brauchst du wesentlich mehr Kraft, um den „trägen“ Stuhl in Drehung zu versetzen. Einmal in Drehung versetzt, kann dein Partner aber seine Drehgeschwindigkeit erheblich steigern, indem er nun die Arme an den Körper zieht (und durch Ausbreiten der Arme wieder verringern, um Übelkeit vorzubeugen.)

Da sich die Masse deines Partners auf dem Stuhl nicht ändert, ist sein Trägheitsmoment ausschließlich von der Masseverteilung (also im Wesentlichen von der Position der Arme und Hanteln) abhängig. Nach einigen Versuchen findet ihr schnell eine Regel:

Je größer das Trägheitsmoment ist umso kleiner ist die Drehgeschwindigkeit.

Je kleiner das Trägheitsmoment ist umso größer ist die Drehgeschwindigkeit.



Dies ist eine anschauliche Form des „Drehimpulserhaltungssatzes“, der besagt, dass der Drehimpuls eines rotierenden Körpers immer gleich bleibt, solange kein äußerer Einfluss auf ihn wirkt. Der Drehimpuls, den du dir als „Schwung“ einer Drehbewegung vorstellen kannst, ist abhängig vom Trägheitsmoment und der Winkel- („Dreh“)geschwindigkeit des Körpers. In mathematischer Form sieht der Drehimpulserhaltungssatz so aus:

$L = J * \varpi = konst.$	L	Drehimpuls
	J	Trägheitsmoment
	ϖ	Winkelgeschwindigkeit

Der Drehimpuls ist also wie die Energie (s. „Sandfigurenpendel“) oder der Impuls (s. „Klick-Klack“) eine Erhaltungsgröße, das heißt das Produkt aus Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit ist immer gleich.

Das sich hinter dieser abstrakten Formulierung ganz konkrete Anwendungen verbergen, können dir – neben dem Drehstuhl – folgende Beispiele verdeutlichen: Wenn ein Eiskunstläufer eine Pirouette drehen möchte, holt er zunächst mit weit ausgebreiteten Armen Schwung, d.h. er versetzt sich in eine anfänglich noch langsame Drehung. Indem er die Arme an den Körper zieht, verringert er sein Trägheitsmoment und vergrößert so seine Drehgeschwindigkeit.

Auch beim Salto erhöht der Akrobat seine Drehgeschwindigkeit, indem er durch die angezogenen Beine sein Trägheitsmoment verkleinert; hierbei verläuft die Drehachse nicht senkrecht, sondern waagrecht durch den Körper.

Und auch eine Katze landet (eine entsprechende Fallhöhe vorausgesetzt) meist auf den Pfoten, indem sie sich ganz ohne theoretische Kenntnis und allein durch geschickte Bewegungen den Drehimpulserhaltungssatz zu Nutze macht.

Pirouetten-Maschine

Außengelände

Wie können Eisläufer so schnelle Pirouetten drehen? Auf der Pirouetten-Maschine könnt ihr gemeinsam versuchen, die Drehbewegung schneller oder langsamer werden zu lassen. Ganz ähnlich funktioniert der Drehstuhl im Stationenpark!



- Stellt euch auf die Scheibe und versetzt sie in Drehung.
Was passiert, wenn ihr euch nach hinten lehnt?
- Was passiert, wenn jemand auf die (langsam!) drehende Scheibe steigt?
- Was passiert, wenn jemand abspringt?

Diese Station wurde 1997 von Schülerinnen und Schülern Ernst-Haeckel-Gymnasiums erdacht und gebaut.

An der Pirouetten-Maschine können gleich mehrere Besucher das Prinzip der Drehimpulserhaltung erfahren.

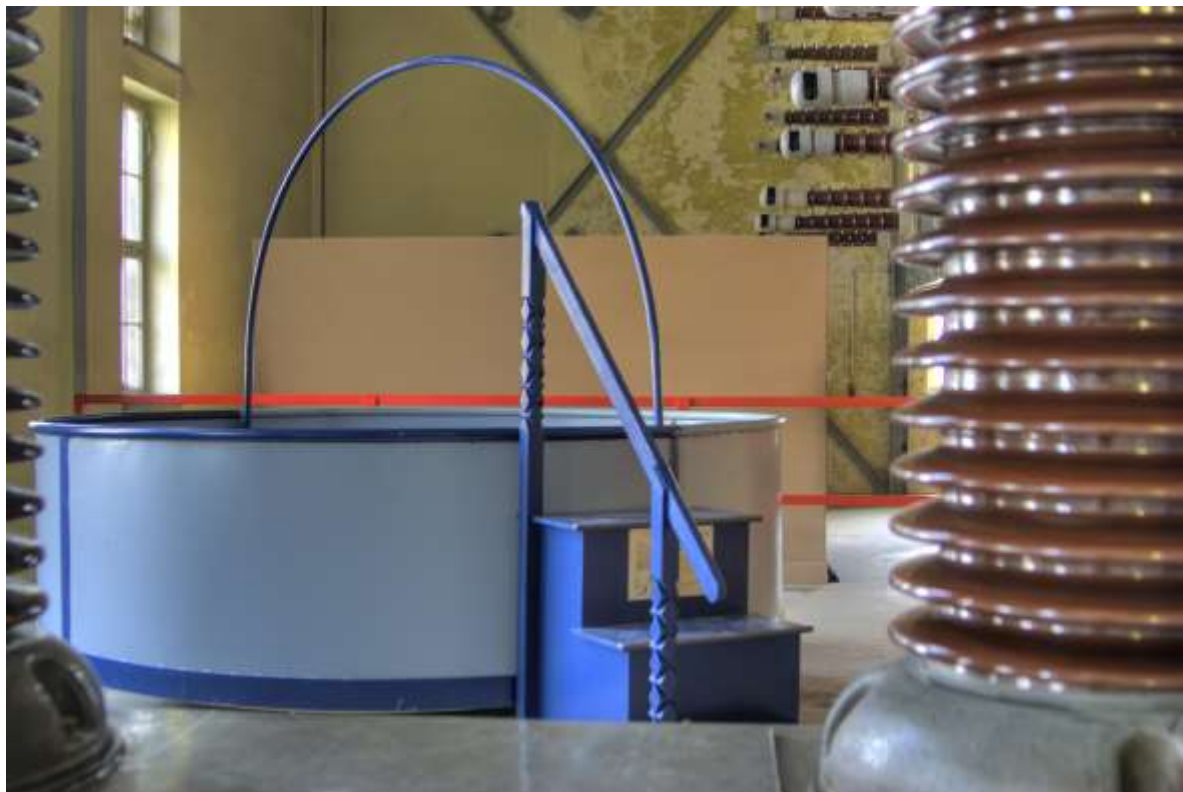
Dessen theoretische Beschreibung findest du bei der Station „Drehstuhl“.

Coriolis' Karussell

110 kV-Halle

Setzt euch zu zweit und genau gegenüber ins Karussell. Nehmt einen Ball und werft ihn euch zu.

Lasst das Karussell von zwei Personen andrehen und versucht erneut, euch den Ball zuzuwerfen.



- Wohin fliegt der Ball, wenn die Scheibe sich dreht?
- Wohin fliegt der Ball, wenn sich die Scheibe in die andere Richtung dreht?
- Welche Flugbahn würde ein Beobachter sehen, der von oben auf das Karussell schaut?

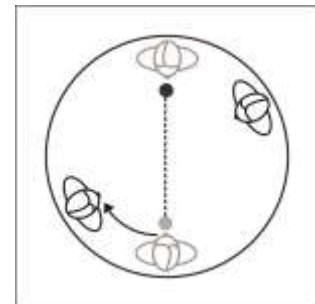
Der französische Mathematiker und Physiker Gustave Gaspard de Coriolis (1792-1843) führte viele seiner Experimente mit Billardkugeln durch und veröffentlichte 1835 ein Buch über die Mathematik des Billardspiels.

Woran merkt man, dass die Erde sich dreht? Der Wechsel von Tag und Nacht ließe sich bei schlichter Betrachtung genauso gut durch eine Bewegung der Sonne um die Erde erklären und die Begriffe „Sonnenaufgang“ und „Sonnenuntergang“ legen dies sogar nahe.

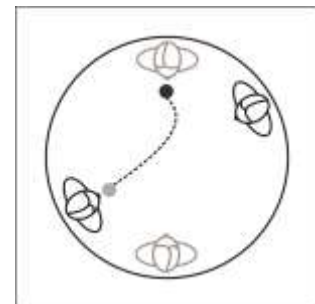
Woran merkst du, dass das Karussell sich dreht? Stell dir vor, du sitzt drin und es wäre rundherum abgeschlossen. Du könntest also weder sehen noch fühlen, ob du in Ruhe oder in gleichmäßiger Bewegung bist, da dein Auge keinen Orientierungspunkt außerhalb des Karussells hätte und dein Gleichgewichtsorgan lediglich Geschwindigkeitsänderungen wahrnehmen kann.

Und doch kannst du mit deinem Partner herausfinden, ob das Karussell in Bewegung ist, nämlich indem ihr euch gegenseitig Bälle zuwerft. Ruht das Karussell, landen die Bälle mit gezieltem Wurf direkt bei deinem Gegenüber. Ganz anders, wenn sich das Karussell dreht: Plötzlich wird der Ball abgelenkt und fliegt mit großem Abstand am „Ziel“ vorbei.

Würde ein außen stehender Betrachter von oben in das Karussell schauen, so sähe er eine gerade Flugbahn des Balles, während sich das Karussell mit Werfer und Fänger weiterdreht.



Für Werfer und Fänger hingegen sieht es so aus, als würde eine Kraft auf den Ball wirken, die ihn von der geraden Flugbahn ablenkt. Diese „Scheinkraft“ wurde von Gustave Gaspard de Coriolis (1792–1843), einem französischen Physiker und Mathematiker erstmals beschrieben. Er untersuchte die Bewegung von Körpern auf rotierenden Flächen: Für einen Betrachter, der sich innerhalb eines rotierenden Systems befindet, scheint auf geradlinig bewegte Körper eine ablenkende Kraft zu wirken.



Die Wirkung der „Corioliskraft“, die letztlich keine Kraft ist, sondern das Resultat zweier sich überlagernder Bewegungen, kann auf der Erde tatsächlich beobachtet werden: Die Passatzirkulation, eine erdumspannende Luftströmung, die unser Wetter entscheidend bestimmt, wurde von Coriolis dadurch erklärt, dass sich die Erdoberfläche am Äquator schneller dreht als an den Polen. Mit Pendeln bzw. fallenden Kugeln haben Jean Bernard Léon Foucault (1819–1861) im Pariser Pantheon und Johann Friedrich Benzenberg (1777–1846) im Hamburger Michel die Erdrotation nachgewiesen.** Als sich im 1. Weltkrieg die Reichweite der Geschütze auf über 100 km erhöhte, musste die Corioliskraft in die Berechnung der Flugbahnen mit einbezogen werden, da die Erde sich buchstäblich „weiterdrehte“, während die Geschosse in der Luft waren.

Wie im Karussell, kannst du also auch auf der Erde sehen, dass sie sich (mit dir) dreht, einfach indem du die Bewegung von Körpern beobachtest. Dass allerdings die Corioliskraft Einfluss auf die Drehrichtung des Wasserwirbels im Badewannenabfluss hat, gehört wohl zu den wissenschaftlichen Mythen: Mittlerweile haben zahlreiche Versuchsreihen gezeigt, dass Form und Unebenheiten der Wanne den wesentlich größeren Einfluss haben.

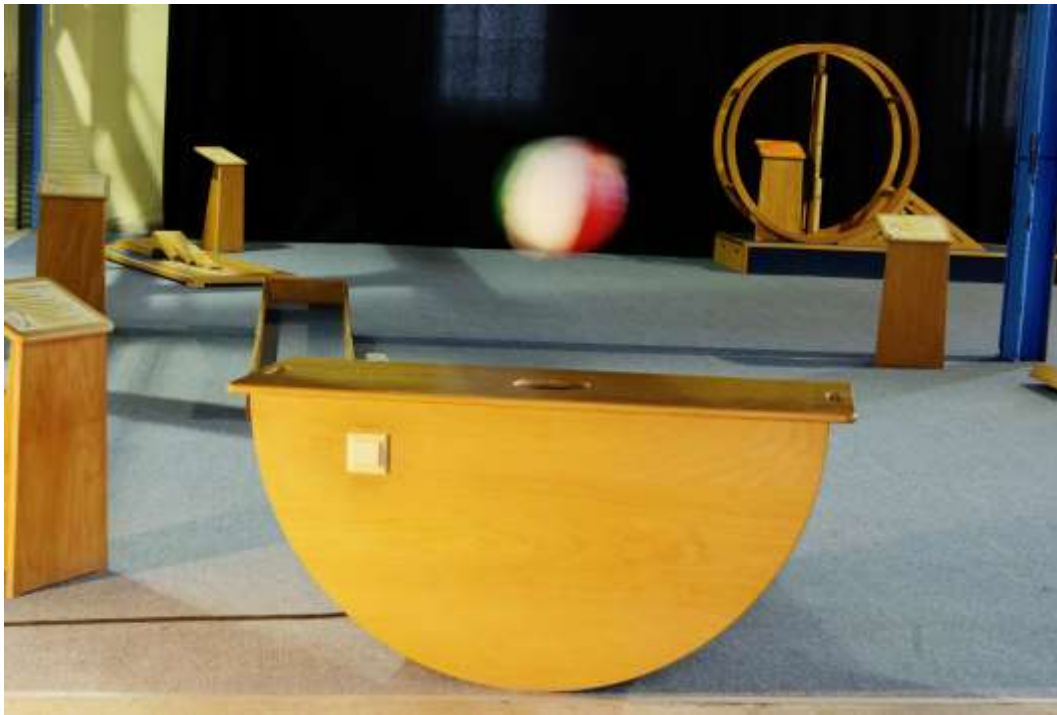
* Wenn du am Äquator stehst, bewegst du dich mit etwa 1670 km/h um die Erdachse; in unseren Breiten sind es immerhin noch um die 720 km/h.

** Beide Versuche wurden 1999 bzw. 2006 in Jena wiederholt.

Schwebende Kugel

110 kV-Halle

Im Luftstrom über dem Gebläse wird der Wasserball zum Schweben gebracht.
Was passiert, wenn man das Gebläse vorsichtig zur Seite neigt und dann wieder aufrichtet?

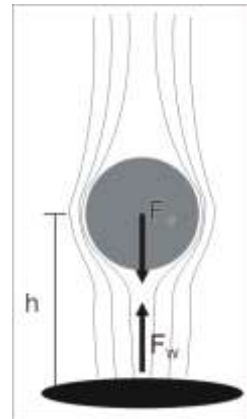


- Wie bewegt sich die Kugel im Luftstrom?
- Versuche, die Kugel vorsichtig seitlich aus dem Luftstrom zu drücken.
Was spürst du?
- Was spürst du, wenn du den Ball neben den Luftstrom hältst?

Die Familie Bernoulli brachte im 17. und 18. Jh. eine Reihe bedeutender Mathematiker hervor. Einer von ihnen, der Schweizer Daniel Bernoulli (1700-1782), beschrieb (neben Glücksspielstrategien) das Verhalten von strömenden Flüssigkeiten und Gasen und begründete damit die Strömungslehre. Aufgrund der fundamentalen Bedeutung seiner Erkenntnisse wird das Phänomen der „Schwebenden Kugel“ auch „Bernoulli-Effekt“ genannt.

„Ich war wie Luft für ihn“ ist ein sprichwörtliches Beispiel für die Tatsache, dass wir die uns umgebende Luft meist nicht wahrnehmen. Wenn sich die Luft allerdings bewegt, wie an einem stürmischen Tag, können wir deren Wirkungen unter Umständen sehr deutlich spüren.

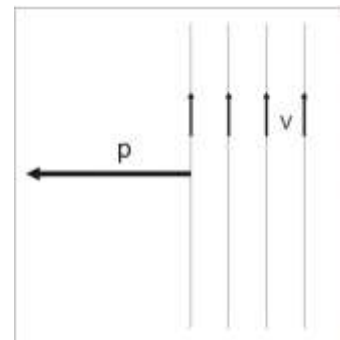
Bei der schwebenden Kugel kannst du das Verhalten und die Effekte strömender Luft an einem einfachen Modell studieren und dabei einige grundlegende Prinzipien der Strömungslehre ergründen. Wenn du den Ball in den Luftstrom bringst, siehst du zweierlei: Erstens bleibt der Ball (mehr oder weniger) in der gleichen Höhe. Zweitens schwebt er dort außerordentlich stabil. Selbst wenn du das Gebläse neigst oder den Ball vorsichtig seitlich anstößt, bleibt er im Luftstrom „gefangen“. Die erste Beobachtung ist gut mit dem Luftwiderstand erklärbar. Der Ball bleibt in der Höhe stehen, in der sein Luftwiderstand, also die Kraft, die die strömende Luft auf ihn ausübt, genauso groß ist wie seine Gewichtskraft.



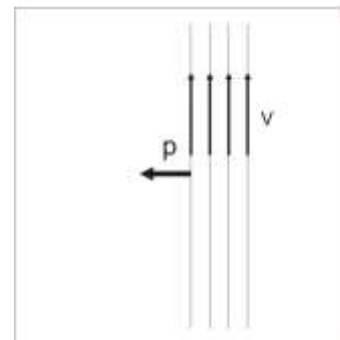
Zum Verständnis der zweiten Beobachtung kannst du zunächst mal versuchen, den Ball seitlich aus dem Luftstrom zu ziehen. Du wirst dabei deutlich eine Kraft spüren, die senkrecht zum Luftstrom auf den Ball wirkt. Sie hat ihre Ursache in den Druck- und Geschwindigkeitsunterschieden der strömenden Luft.

Dem Italienischen Physiker Giovanni Battista Venturi (1746–1822) verdanken wir die Erkenntnis, dass Flüssigkeiten und Gase umso schneller strömen, je enger der Strömungsquerschnitt ist. Für die schwebende Kugel heißt das: Wenn die Luft den Ball umströmt, bewegt sich der Luftstrom also nicht überall mit gleicher Geschwindigkeit, sondern ist in der Nähe des Balles, wo es eng ist, schneller.

In seiner „Hydrodynamica“ beschrieb der Schweizer Mathematiker Daniel Bernoulli (1700–1782) den Zusammenhang zwischen Druck und Geschwindigkeit in strömenden Flüssigkeiten und Gasen: Je größer deren Geschwindigkeit ist, umso geringer ist der statische Druck, also der Druck, der senkrecht zur Strömungsrichtung wirkt.*



Angewendet auf die „Schwebende Kugel“ bedeutet dies: Wenn die Luft am Ball vorbeiströmt, erhöht sich dort ihre Geschwindigkeit und dadurch verringert sich der Druck. Da die Luft den Ball auf allen Seiten umströmt, entsteht rings um den Ball ein Unterdruck, der Ball im Luftstrom hält. Die daraus resultierende Kraft ist so stark, dass der Ball sogar in einem schräg gerichteten Luftstrom schwebt. Dieser „Bernoulli-Effekt“ ist Grundlage vieler physikalischer Spielereien, aber die Bedeutung der dahinterstehenden Prinzipien reicht weit darüber hinaus. Der Auftrieb von Flugzeugen, die Bahnen von „angeschnittenen“ Bällen, das Zerstäuben von Flüssigkeiten im Kraftstoffvergaser oder Parfümflakon: All dies beruht letztendlich auf der Nutzung von Geschwindigkeits- und Druckunterschieden in strömender Luft.



* Die Bernoulli-Gleichung (die bei genauerem Hinsehen eine Form des Energieerhaltungssatzes ist) fasst den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Druck und Dichte von Gasen folgendermaßen zusammen:

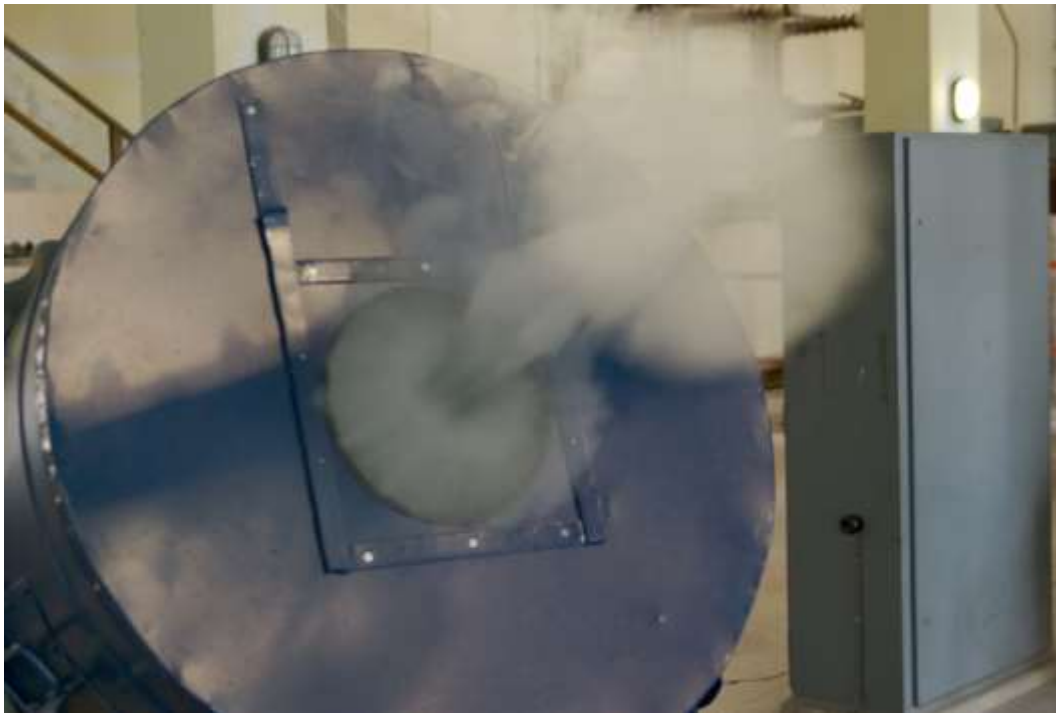
$$p + \frac{\rho}{2} v^2 = \text{konst.}$$

p	statischer Druck
ρ	Dichte des Gases
v	Strömungsgeschwindigkeit

Wirbelkanone

110 kV-Halle

Mit der Wirbelkanone lassen sich wunderschöne Rauch-Ringe erzeugen, die durch die ganze Halle schweben.

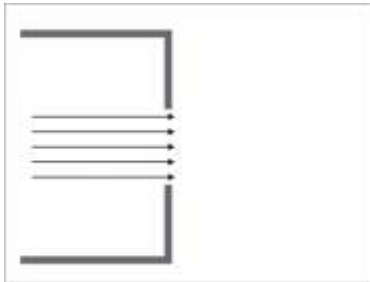


- Was spürst du, wenn du dich vor die „Kanone“ stellst?
- Beobachte die Rauchringe, während sie durch die Luft fliegen.
Sind deren Form und Geschwindigkeit immer gleich?
- Was passiert, wenn die Öffnung der Wirbelkanone zu einem Viertel oder zur Hälfte geschlossen ist?

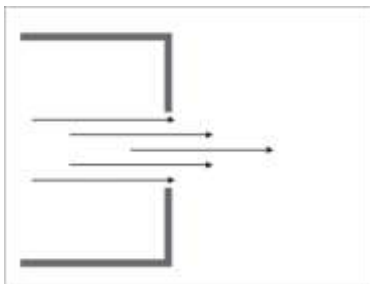
Nicht nur in der Luft, auch im Wasser können Wirbelringe entstehen, und auch diese können zur Unterhaltung dienen - für Delphine. Videoaufnahmen zeigen, wie Delphine durch geschicktes Schlagen mit ihrer Schwanzflosse Wirbelringe erzeugen, durch eingeblasene Luft sichtbar machen und als Spielobjekte benutzen.

Die Wirbelkanone demonstriert die Wirkung bewegter Luft mindestens ebenso eindrücklich wie die Schwebende Kugel. Wenn du dich vor die Wirbelkanone stellst und jemanden bittest, auf die Gummimembran zu schlagen, kann deine Frisur schon mal durcheinander geraten. Da dies selbst über eine Strecke von 7–10 m funktioniert – auch eine Kerze in diesem Abstand wird noch mühelos gelöscht – muss es mehr als nur ein „kräftiger Windstoß“ sein, der aus der Öffnung kommt.

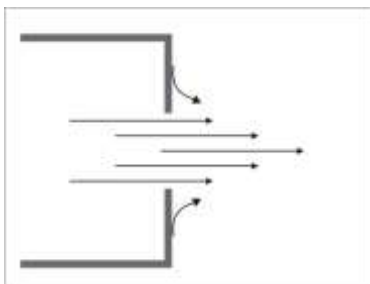
Was tatsächlich an der Wirbelkanone passiert, kannst du erkennen, wenn die Luft mit künstlichem Nebel sichtbar gemacht wird. Je nachdem, wie stark du auf die Membran schlägst, siehst du mehr oder weniger schnelle „Rauchringe“, die durch die gesamte Halle wandern können, wenn sie nicht vorher an einem der Stahlträger „zerplatzen“. Diese rotierenden Ringwirbel entstehen – wie alle Wirbel – durch Reibung. Durch sie werden die Unterschiede in der Strömungsgeschwindigkeit so groß, dass die Luft nicht mehr in einzelnen Schichten („laminar“) strömt, sondern sich verwirbelt.



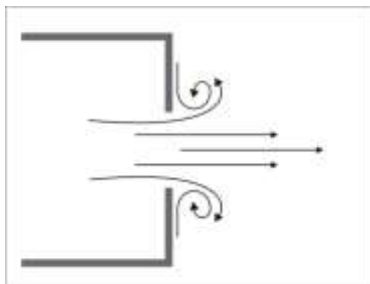
Wenn du auf die Membran schlägst, drückst du die Luft durch die Öffnung. Da diese Öffnung klein im Vergleich zur Fläche der Membran ist, strömt die Luft mit großer Geschwindigkeit hindurch.



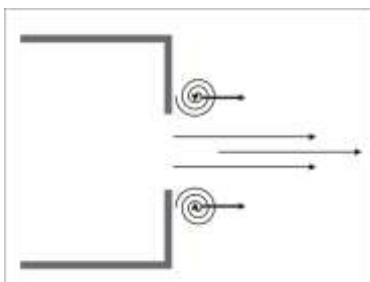
Die ausströmende Luft wird an den Rändern der Öffnung durch Reibung abgebremst, wodurch es zu unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten in der Mitte (schnell) und am Rand (langsam) der Öffnung kommt.



Die ausströmende Luft reißt aufgrund ihrer Geschwindigkeit die Luft neben der Öffnung mit sich. (Wie Strömungsgeschwindigkeit und Druck zusammenhängen, kannst du bei der „Schwebenden Kugel“ nachlesen.)



Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit der ausströmenden Luft und durch die seitlich einströmende Luft entsteht eine Drehbewegung.

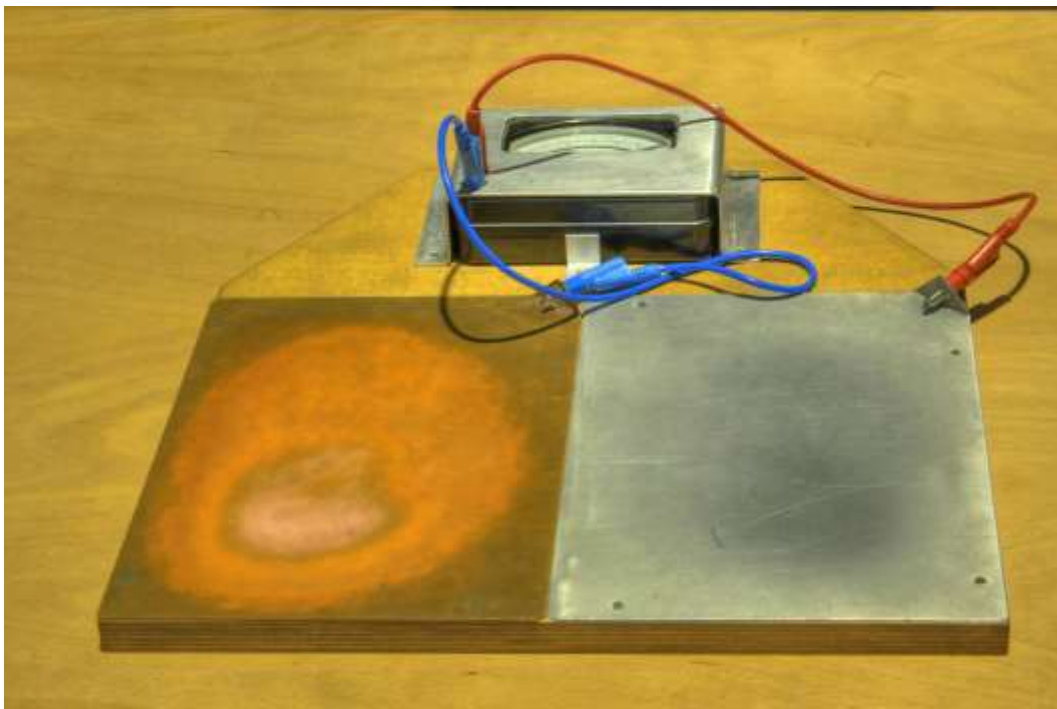


Da die Öffnung rund ist und die Luft nur kurzzeitig ausströmt, stabilisiert sich die Drehbewegung zu einem großen ringförmigen Wirbel. Zum Schluss sind aus der Bewegung der ausströmenden Luft zwei Bewegungen geworden: Zum einen die Drehung und zum anderen die (langsame) Vorwärtsbewegung des Wirbelrings.

Hand-Batterie

110 kV-Halle

Lege die Hände auf die beiden Metallplatten und presse sie kräftig darauf.
Beobachte den Strommesser.
Funktioniert es auch mit mehreren Personen?
Was passiert, wenn du deine Hände anfeuchtest?



- Welchen Wert zeigt das Strommessgerät bei dir an?
Wie groß ist er bei anderen Personen?
- Dein Partner und du fassen sich an die Hand, die freien Hände legt ihr auf je eine Metallplatte. Welchen Wert zeigt das Strommessgerät?
Verlängert eure Kette um weitere Personen.

*„Strom sieht man nicht.
Strom hört man nicht.
Strom kann man nur fühlen.“*

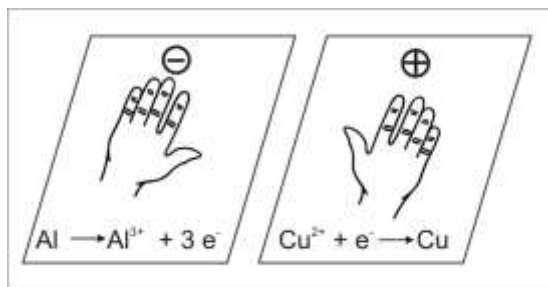
Elektrikerweisheit

Die Handbatterie ist zunächst ein sehr einfaches Experiment. Du musst nicht mehr tun, als deine Hände auf die Metallplatten legen und auf das Strommessgerät schauen. Da jedoch, wie bei vielen elektrischen Vorgängen, das eigentliche Phänomen nicht sichtbar ist, beschränkt sich die Erkenntnis aus diesem Experiment oft auf ein „Das hat wohl irgendwas mit Strom zu tun.“

Um zu verstehen, was genau an der Handbatterie eigentlich passiert, musst du dich zunächst mit den grundlegenden Begriffen „Strom“ und „Spannung“ vertraut machen. Strom ist bewegte Ladung. Damit Strom fließen kann, müssen Ladungsträger, also bewegliche geladene Teilchen vorhanden sein. Bei Metallen, die allesamt mehr oder weniger gute elektrische Leiter sind, übernehmen freie Elektronen diese Funktion. Auch Flüssigkeiten können Strom leiten, hier sind positiv oder negativ geladene Teilchen (Ionen) die Ladungsträger. Elektrischer Strom wird durch eine Spannung zwischen zwei unterschiedlich geladenen Polen erzeugt. Wenn die zwei Pole durch einen elektrischen Leiter verbunden werden, fließt Strom, dessen Stärke sowohl von der Spannung als auch vom elektrischen Widerstand des Leiters anhängig ist.

In der Handbatterie wird die Spannung nach dem gleichen Prinzip erzeugt wie in einer handelsüblichen Alkali-Mangan-Batterie. So ein „galvanisches Element“ besteht aus zwei unterschiedlichen Metallen – bei der Handbatterie Kupfer und Aluminium, die durch eine leitende Flüssigkeit – nämlich dich und die in dir gelösten Salze – miteinander verbunden sind. Wenn du eine Hand auf die Aluminiumplatte legst, wird der Schweiß auf deiner Haut zum elektrischen Leiter.

Die Aluminiumatome geben ihre Elektronen ab und lösen sich in der Feuchtigkeit (du hast nach dem Experiment tatsächlich Spuren von Aluminium auf deiner Haut). Auf der Kupferplatte siehst du eine stumpfe braune Schicht aus Kupferoxid. Durch die Feuchtigkeit auf deiner Haut entstehen



daraus Kupferionen, die Elektronen aufnehmen und zu Kupfer reagieren. An der Aluminiumplatte sind also Elektronen „übrig“, an der Kupferplatte ist Elektronenmangel. Da durch das Strommessgerät beide Elektroden miteinander verbunden sind, fließt ein Strom, wie du am Zeigerausschlag des Strommessgerätes sehen kannst.

Die Spannung, die mit einer Batterie erzeugt werden kann, hängt davon ab, wie groß die Neigung der verwendeten Metalle ist, Elektronen aufzunehmen oder abzugeben. Alle Metalle lassen sich abhängig von diesem „Redoxpotential“ in einer elektrochemischen Spannungsreihe ordnen; je höher die Spannung, umso geringer ist die Neigung, Elektronen abzugeben und umso „edler“ ist das Metall. Kupfer hat als „edles“ Metall ein Redoxpotential von 0,35 Volt, Aluminium ist mit -1,66 V ein „unedles“ Metall, daher ließe sich mit unserer Aluminium-Kupfer-Batterie theoretisch eine Spannung von etwa 2 V erzeugen. Wenn du allerdings auf das Messgerät schaust, siehst du bei jeder Person einen anderen Wert. Das Gerät zeigt den Strom an, der tatsächlich fließt, und der hängt hier vor allem vom der Leitfähigkeit und damit von der Feuchtigkeit der Haut ab. Prinzipiell ließe sich die Handbatterie sogar als „Lügendetektor“ nutzen, da „schwitzige Hände“, also eine erhöhte Feuchtigkeit der Haut, gemeinhin als mögliches Zeichen für gesteigerte Nervosität gelten. Tatsächlich wird bei „polygraphischen Untersuchungen“ (die in Fachkreisen durchaus umstritten sind) neben Blutdruck, Atem- und Pulsfrequenz auch die Leitfähigkeit der Haut in gemessen, um aus erhöhten Werten auf mögliche Falschaussagen des Probanden zu schließen.

Waltenhofensches Pendel

110 kV-Halle

Zwischen den Polschuhen eines starken Permanentmagneten schwingt ein Pendel. Probiere unterschiedliche Materialien (Kupfer, Aluminium) und Formen (volle Platte, Platte mit Löchern, Platte mit Schlitten) von Pendelkörpern. Wann wird das Pendel besonders stark abgebremst?



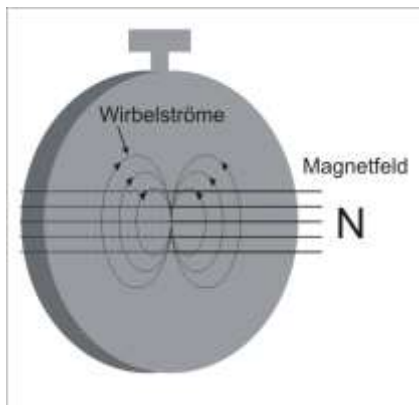
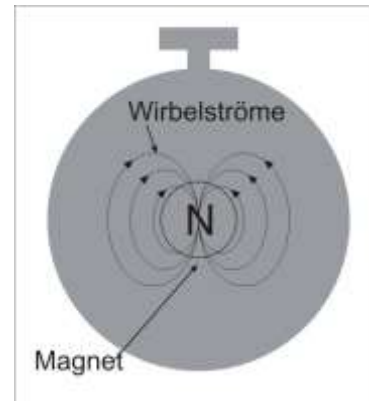
- Lass nacheinander Holz-, Kupfer- und Aluminiumplatte pendeln. Welche Platte pendelt am längsten, welche am kürzesten?
- Vergleiche alle Kupferplatten miteinander. Welche Platte wird am stärksten abgebremst, welche am wenigsten?
- Sind Holz, Kupfer oder Aluminium magnetisch? Probiere es aus, indem du die Platten an die Magneten hältst.
- Nimm die Kupferplatte in die Hand und führe sie schnell zwischen den Magneten durch. Was spürst du?

Das Pendel ist nach dem österreichischen Physiker und Elektrotechniker Adalbert Carl von Waltenhofen (1828-1914) benannt, der neben dem magnetischen Verhalten von Eisen und verschiedenen Stählen erstmals auch die Konstruktion des Pendels und den daran beobachtbaren Bremsseffekt beschrieb.

Das Waltenhofensche Pendel irritiert viele Besucher, weil sich die Beobachtungen auch bei längerem Experimentieren zwar beschreiben, aber ohne entsprechendes Vorwissen nicht deuten lassen.

Die Vermutungen, es könnte etwas mit der Masse oder dem magnetischen Verhalten der unterschiedlichen Materialien zu tun haben, sind sich leicht überprüfbar. Der Masseunterschied zwischen Holz- (ca. 100g) und Aluminiumscheibe (ca. 250 g) ist viel geringer als der zwischen Aluminium- und Kupferscheibe (ca. 700g), dennoch wird Aluminium ebenso wie Kupfer gebremst. Und wenn du die Scheiben direkt an die Magneten hältst, stellst du fest, dass keines dieser Materialien angezogen wird. Was eigentlich in den Metallscheiben passiert, ist – wie schon bei der Handbatterie – deiner Beobachtung nicht zugänglich, jedoch lassen sich auch hier Parallelen zu Phänomenen finden, die dir aus dem Alltag vertraut sind.

Kupfer und Aluminium, also die Materialien, die gebremst werden, sind Metalle. Alle Metalle leiten elektrischen Strom, da sie freie Elektronen als Ladungsträger haben. Wann immer sich ein elektrischer Leiter in einem Magnetfeld bewegt, werden die Elektronen durch das Magnetfeld abgelenkt und bewegen sich – es fließt ein Strom. (Nach diesem Prinzip funktioniert auch ein Fahrraddynamo, der im Wesentlichen aus einer Drahtspule in einem Magneten besteht. Dreht sich der Magnet, wird in der Spule ein Strom generiert.)



Auch wenn du die Kupferplatte zwischen den Magneten bewegst, fließen in ihr ringförmige Wirbelströme. Diese Ströme wiederum erzeugen ein Magnetfeld, so dass die Kupferscheibe selbst zum Magneten wird. Da sich zwei entgegengesetzt gepolte Magneten anziehen, wirkt auch auf die Kupferscheibe eine anziehende – also bremsende Kraft, aber eben nur solange, wie sich das Metall im Magnetfeld bewegt und in ihm ein Strom induziert wird. Ganz anders hingegen verhält sich die gezähnte Scheibe. Da in ihr keine Ringströme fließen können, wird auch kein Magnetfeld

erzeugt, so dass die Scheibe fast ungebremst pendelt.

Der Physiker Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804–1865) beschrieb die elektromagnetischen Induktion mit seiner „Lenzschen Regel“, die letztendlich eine Form des Energieerhaltungssatzes ist: „Die durch Induktionsvorgänge entstehenden elektrischen Felder, Ströme und Kräfte behindern stets den die Induktion einleitenden Vorgang.“

Der Physiker und Elektrotechniker Carl von Waltenhofen (1828–1914) hat dieses Prinzip zur Grundlage einer wichtigen technischen Anwendung gemacht: „Wirbelstrombremsen“ arbeiten leise und verschleißfrei, nicht nur in Straßenbahnen und ICEs, sondern auch bei Achterbahnen oder hochwertige Ergometern.

Plasmakugel

110 kV-Halle

**Bewege deine Finger langsam über die Kugeloberfläche.
Berühre die Kugel mit der Leuchtstoffröhre.**



- Was passiert, wenn du die Plasmakugel mit einem Finger oder der ganzen Hand berührst? Wie fühlt sich deine Hand danach an?
- Halte ein Ende der Leuchtstoffröhre an die Kugel.
Was passiert, wenn du die Röhre in der Mitte hältst?
- Leg eine Münze auf die Kugel und halte deinen Finger oder eine zweite Münze dicht darüber.
Was siehst du?
Was riechst du?

Die „Edelgas-Entladungsröhre“ wurde bereits zu Beginn des 20. Jh. von dem Elektroingenieur Nikola Tesla (1856-1943) erfunden.

In der ARD-Wissenschaftssendung „Kopfball“ konnten Zuschauer bis 2003 eine Plasmakugel – eben dem Kopfball – als Preis gewinnen.

In der Plasmakugel kannst du Strom anschauen.

Strom fließt nicht nur in Metallen und Flüssigkeiten; auch Gase können Strom leiten, wenn die anliegende Spannung hoch genug ist, das Gas zu „ionisieren“, also Elektronen aus den Atomen oder Molekülen zu entfernen. Dadurch entstehen geladene Teilchen, die den Strom leiten können. Ein Gas, dessen Atome in positiv geladene „Atomrümpfe“ und negativ geladene Elektronen aufgeteilt wurden, nennt man Plasma, und es ist oft von eindrucksvollen Lichterscheinungen begleitet. Ob Blitz, Polarlicht, Leuchtstoffröhre oder Plasmakugel: stets sind es ionisierte Gase, die da leuchten.

Die zur Ionisierung notwendige Energie hängt von der Art des Gases, dessen Druck und dem Abstand zwischen den Elektroden ab. Die Plasmakugel ist mit Neon, Argon und Stickstoff gefüllt, und es sind einige tausend Volt nötig, um dieses Gasgemisch zum Leuchten zu bringen. Wenn du deine Hand an die Lampe hältst, wirst du selbst zur Elektrode, und kannst sogar mit deinem Finger – oder mit jedem anderen leitenden Gegenstand – die Richtung des Stromflusses dirigieren.

Eigentlich ist es nicht ratsam, bei so großen Spannungen selbst zum Leiter zu werden. Dass es bei der Plasmakugel dennoch ungefährlich ist, liegt an der hochfrequenten Wechselspannung. Die Richtung des Stromflusses ändert sich etwa 20000 Mal in der Sekunde, so dass – kurz gesprochen – der Strom nicht genügend Zeit hat, in deinem Körper Schaden anzurichten. Allenfalls berichten einige Besucher über ein leichtes Wärmeempfinden in der Hand.

So kannst du auch unbedenklich die Leuchtstoffröhre an die Glaskugel halten und in den in der Röhre enthaltenen Quecksilberdampf zum Leuchten bringen. Nur wenn du metallische Gegenstände, beispielsweise eine Münze, auf die Lampe legst, wird es unter Umständen etwas unangenehm: Sobald du dich mit dem Finger der Münze näherst, bekommst du einen kleinen Stromschlag. Um die Untersuchung dieses Phänomens erträglicher zu gestalten, nimmst du am besten eine zweite Münze und hältst sie ein bis drei Millimeter über die erste. Du siehst tatsächlich einen kleinen Lichtblitz; hier ist es die Luft, die ionisiert und dadurch leitfähig wird, und dazu sind (abhängig von der Luftfeuchtigkeit) immerhin noch um die 1000 V nötig.

Eventuell nimmst du nach einiger Zeit einen stechenden Geruch wahr. Dies ist Ozon, das entsteht, wenn sich der ionisierte Sauerstoff wieder zu Molekülen verbindet. Auch kurz vor einem Gewitter, wenn die Luft im wahrsten Sinne des Wortes „geladen“ ist, hat sie diesen typischen Geruch.

Balance Bretter 99
 Balance-Stäbe 155
 Balancier-Besen 149
 Begehbare Lochkamera 137
 Begehrer Bogen 23
 Begehrtes Kaleidoskop 127
 Bernoulli-Effekt 185
 Beschleunigung 164
 bewegte Bilder 66
 Bewegungsenergie 154, 164, 173
 Black Box 49
 Blendenöffnung 138
 Bogenkonstruktion 24
 Brachistochrone 166
 Brennpunkt 30
 Brennweite 141, 146
 Chaos-Pendel 175
 Dauerwelle 81
 Die Macht der Dominosteine 153
 Dosenwettlauf 167
 Drehimpuls 180
 Drehimpulserhaltungssatz 180
 Drehmoment 162
 Drehscheibe 'Spirale' 73
 Drehscheiben 71
 Drehstuhl 179
 Dreifarbentheorie 62
 Druckrezeptor 98
 dynamisches Gleichgewicht 156
 elektromagnetische Induktion 192
 Energie 154, 168, 173
 Energieerhaltungssatz 173
 Energieformen 173
 Epizyklen 11
 Epizykloiden 11
 Farben sehen 62
 Farben? Blind! 59
 Farbige Schatten 61
 Farbmischung 62
 Fluoreszenz 64
 Fotorezeptoren 62
 Fresnel-Linse 145
 Garnrolle 159
 Gasionisation 194
 Geheimbotschaften 41
 gekoppelte Systeme 176
 Geschwindigkeit 164
 Gewichtsmonochord 85
 Gleichdick 26
 Gleichgewicht 154, 162
 Gleichgewichtslage 154
 Gleichgewichtsorgan 100
 Gleichgewichtssinn 102, 104
 Große Kamera 139
 Hand-Batterie 188
 Händigkeit 110
 harmonische Reihe 18
 Haus der Riesenzwerge 75
 Hebel 162
 Hebelgesetz 162
 Hochseilrad 157
 Hörbar 79
 Hör-Lampe 91
 Hörspiegel-Ohren 91
 Hörspiegelstrecke 29
 Hör-Spirale 33
 Ich bin drei! 43
 Impuls 178
 Katenoide 24
 Klangmikroskop 89
 Kleine Baumeister 17
 Klick-Klack 177
 Knall und Fall 151
 Kopftausch-Fenster 39
 Körpersymmetrie 110
 Kraft 160, 162
 Kugelspiegel 133
 Kugelwettlauf 163
 Ladungsträger 189
 Lageenergie 154, 173
 Lebensräder 65
 Lehrgerüst 24
 Leonardos Brücke 21
 Lichtbrechung 140, 146
 Lichtdurchlässigkeit (Transmission) 40
 Licht-Labyrinth 55
 Lichtlose Küche 53
 Lichtspektrum 60
 Lichtstrahl 108, 138
 Linse 140
 Longitudinalwelle 90
 Luftschwinger 88
 Mal Spirale 9
 Mara-Ton 170

Massenmittelpunkt 150
 Meeresrauschen 45
 Mehrfachreflexion 114, 116
 Mensur 88
 Möbiusbahn 7
 Moiré Effekt 77
 Monochord 83
 Natriumdampflampe 60
 Obertöne 82
 Oloid 27
 optische Aufheller 64
 optische Täuschungen 72
 Orgel 87
 Parabolspiegel 30
 Partner-Kaleidoskop 123
 Pendel 173
 Pirouetten-Maschine 182
 Planspiegel 107
 Plasma 194
 Plasmakugel 193
 potentielle Energie 154
 Präzession 171
 Propriozeption 100, 104
 Pulfrich-Pendel 69
 Pyramiden-Kaleidoskop 125
Rayleigh-Wellen 32
 Reibung 150
 Reproduktionskamera 143
 Resonanz 92, 94
 Retroreflexion 114
 Reuleaux-Räder 25
 Richtungshören 96
 Rotation 164, 171
 Rotierende Spiegel 115
 Saitenschwinger 82
 Sammellinse 140
 Sandfiguren-Pendel 172
 Schall 80
 Schallgeschwindigkeit 34
 Schallortung 96
 Schallwellen 30, 32
 Schiefes Haus 103
 Schlussstein 24
 Schwärzer als Schwarz 47
 Schwarzlicht-Kabinett 63
 Schwebende Kugel 184
 Schwebespiegel 37
 Schwerpunkt 150, 154, 158
 Sechzehnfaches Spiegelbild 131
 Seekrank 101
 Sehstrahl 108
 Seitenrichtiger Spiegel 109
 Spannung 189
 Spiegel-Allee 121
 Spiegelbuch 117
 Spiegeltunnel 119
 Spiegelwürfel 129
 Spiegelzeichner 35
 stabiles Gleichgewicht 158
 Stereo-Sound 95
 Stroboskopeffekt 82
 Strom 189
 Summsteine 93
 Tastatour 51
 Tastbar 97
 Tautochrone 166
 Tonintervall 84
 Trägheitsmoment 156, 168, 180
 Translation 164
 Tripel-Spiegel 113
 Turm von Hanoi 13
 Tuschelmuschel 31
 ultraviolette Strahlung 64
 ungehorsame Garnrolle 159
 Waltenhofensches Pendel 191
 Wirbelkanone 186
 Wirbelstrom 192
 Wölbspiegel 135
 Wundertrommel 67
 Zweifach-Rollbahn 165
 Zykloide 166