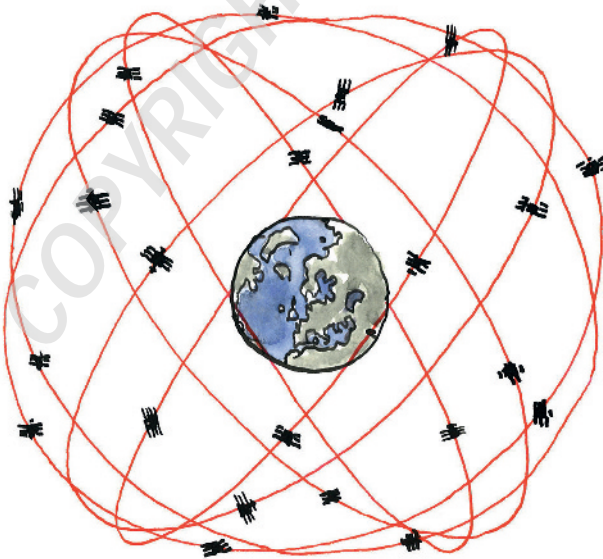


IN DER FREIEN NATUR

Wie funktioniert die GPS-Navigation? Einstein sei Dank

Stellen wir uns einfach Folgendes vor: Ich bin mit dem Rad im Münchner Norden unterwegs und ich weiß nicht, wo ich bin. Zumindest habe ich daran gedacht, eine Detailkarte von diesem Gebiet mitzunehmen. Auf einer Straßenkreuzung steht glücklicherweise ein Hinweisschild, das mir sagt, dass ich mich 6 km von Garching und 5 km von Unterföhring befinde. Ich befinde mich somit auf einem Kreis um Garching herum mit einem Radius von 6 km und gleichzeitig auf einem Kreis um Unterföhring herum mit einem Radius von 5 km. Die zwei Kreise schneiden einander in zwei Punkten. Mein Standort ist somit einer dieser zwei Punkte – aber welcher?

Glücklicherweise stellt sich heraus, dass einer der zwei Punkte im Feringa-See liegt, und dort befinde ich mich bestimmt nicht. Also muss es der andere Punkt sein. Auf der Karte kann ich nun ungefähr finden, an welcher Kreuzung ich stehe. Wenn ich die Entfer-



nungen zu den anderen Orten auf dem Hinweisschild auch noch mit einbeziehe, wird meine Standortbestimmung zuverlässiger, und dann scheidet der Feringa-See automatisch aus.

Unser GPS-Empfänger bestimmt unsere Position in analoger Weise, benutzt dazu jedoch drei Dimensionen, und zwar nicht nur den Punkt auf der Karte, sondern auch die Höhe. Dies geschieht mit einer erstaunlichen Präzision. Wie funktioniert das GPS eigentlich? Und wie funktioniert Galileo, das europäische Gegenstück? Zu letzterem lässt sich sagen, dass sich Galileo noch in der Aufbauphase befindet und wahrscheinlich erst um das Jahr 2020 seinen Betrieb aufnehmen wird. Aber im Prinzip funktioniert es genau wie das uns vertraute GPS. Und damit kommen wir zur Eingangsfrage zurück: Wie funktioniert GPS eigentlich?

In groben Zügen sieht das folgendermaßen aus: Das Global Positioning System (GPS) bestimmt unsere Position mit Hilfe von 24 Satelliten, die sich in einer Entfernung von ungefähr 20.000 Kilometern um die Erde bewegen; dabei schaffen sie zwei Umrundungen pro Tag.

Sie senden Radiosignale aus, die vom GPS-Empfänger aufgenommen werden. Dieser kann sich im Auto, auf dem Fahrrad oder in



unserer Hand befinden. Mindestens vier Satelliten müssen für eine genaue Positionsbestimmung, 'zu sehen' sein, wie später in diesem Text deutlich wird.

Zwei Dinge müssen wir erfahren, um unsere eigene Position bestimmen zu können, nämlich die Position der Satelliten, die unser GPS-Empfänger sieht und die Entfernung zu jedem dieser Satelliten. Die Position aller Satelliten wird von einer Reihe Bodenstationen, die über den Globus verteilt sind, genau verfolgt und von der 'Mutterstation' in den USA koordiniert, wo das System ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt wurde. Diese Daten werden von der Erde aus an die Satelliten weitergeleitet. Jeder Satellit kennt so seine eigene Position und gibt diese seinerseits an unseren GPS-Empfänger weiter.

Nun müssen wir noch die Entfernung zu jedem dieser Satelliten messen. Dies erfolgt, indem wir die Zeit messen, die ein Radiosignal von einem Satelliten aus braucht, um zu unserem GPS-Empfänger zu gelangen. Es geht also um die zeitliche Differenz zwischen dem Versendezeitpunkt und dem Ankunftszeitpunkt. Wenn wir diese Entfernung in Bezug auf (mindestens) drei Satelliten kennen, dann ist unsere Position bekannt. Dies ist dann analog zur Fahrradgeschichte im Münchner Norden. Die Entfernung zum ersten Satelliten sagt mir, dass ich auf einer imaginären Kugel rund um diesen Satelliten sitze und zwar mit einem Radius, der mit der gemessenen Entfernung identisch ist. Das Gleiche gilt für den zweiten Satelliten. Auch dieser führt zu einer imaginären Kugel rund um diesen Satelliten. Ich muss mich nun auf beiden Kugeln zugleich befinden, das heißt auf dem Kreis, der entsteht, wo die zwei Kugeln einander schneiden. Dies ist genau so wie bei zwei Seifenblasen, die aneinander kleben. Zu dem dritten Satelliten gehört auch wieder solch eine Kugel. Diese wird den Kreis in zwei Punkten schneiden. Glücklicherweise stellt sich heraus, dass es einer dieser Punkte nicht sein kann, weil er beispielsweise zu tief in der Erde liegt oder aber viel zu hoch. Der Punkt, der übrig bleibt, ist meine Position. Natürlich gibt es immer eine gewisse Fehlerspanne bei den Messungen. Wenn mein GPS-Empfänger mehr Satelliten sehen kann, wird die Fehlerspanne sinken.

Es geht somit alles in allem darum, die Zeit zu messen. Das muss unglaublich genau erfolgen, da sich die Radiosignale mit Licht-

geschwindigkeit bewegen: 300.000 Kilometer pro Sekunde. Bei einem Fehler von einer Millionstel Sekunde liegen wir bereits 300 Meter neben unserem Zielpunkt. Mit einer Stoppuhr kann diese Berechnung nicht gelingen, soviel ist wohl klar.

Um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen, verfügen alle Satelliten und Bodenstationen über Präzisionsuhren. Sie basieren auf einem äußerst genauen und stabilen Übergang innerhalb eines Cäsium-Atoms. Uhren dieses Typs erreichen eine sagenhafte Präzision: Die genauesten Uhren, die auf der Erde zu finden sind, funktionieren so präzise, dass sie im Laufe von tausend Jahren problemlos noch nicht einmal ein Zehntel einer Millisekunde voneinander abweichen! So gut brauchen die Uhren in den Satelliten auch wieder nicht zu sein, müssen jedoch innerhalb einer Abweichung von einer Milliardstel Sekunde voneinander bleiben.

Die Uhr in unserem GPS-Empfänger ist keine so teure, genaue Atomuhr. Das ist auch nicht erforderlich: Man hat sich nämlich einen Trick ausgedacht, wobei man einen extra Satelliten einschaltet, der dann für die genaue Zeitmessung sorgt. Darum braucht man mindestens vier Satelliten, nämlich drei, um die erforderlichen drei Entfernungen zu bestimmen und einen, um die Uhr in unserem GPS-Empfänger mit den Satellitenuhren zu synchronisieren.

Klar ist dabei, dass alles von der Genauigkeit der Zeitmessung abhängt. Aber jetzt passiert etwas Unerwartetes: Wir brauchen Einstein und seine Relativitätstheorie dazu. Einstein selbst hätte nie vermutet, dass seine Arbeit – solch eine unfassbare Abhandlung über theoretische Physik – jemals eine derart wichtige Rolle in einer so praktischen Angelegenheit wie dem Global Positioning System spielen würde. Dies ist somit auch ein schönes Beispiel für die unerwartete und unbeabsichtigte Anwendung von bahnbrechender Grundlagenforschung.

Aber wie hängt nun das Eine mit dem Anderen zusammen? Der Relativitätstheorie zufolge werden die Uhren in den Satelliten aus zwei Gründen nicht ebenso schnell laufen, wie sie laufen würden, wenn sie auf der Erde stünden. Da sie eine hohe Geschwindigkeit haben, gehen sie etwas langsamer. Aber weil sie in dieser großen Entfernung viel weniger Schwerkraft spüren (nur ein Viertel), gehen sie schneller. Dieser letztgenannte Effekt ist größer, und so ge-

hen sie pro Tag ungefähr 38 Millionstel Sekunden schneller als die Uhren in den Bodenstationen. Dies erscheint uns nicht so sehr viel, kommt aber nach einem Tag schon einem Fehler von gut 11 Kilometern gleich! Solch ein Fehler würde unser GPS völlig unbrauchbar machen.

Um diesen Effekt der Relativitätstheorie zu kompensieren, werden die Uhren in den Satelliten, bevor sie ins All geschossen werden, ein bisschen langsamer gemacht, so dass sie nach dem Start, wenn sie ihre Umlaufbahn erreicht haben, genau zeitgleich mit den Uhren in den Bodenstationen auf der Erde gehen.

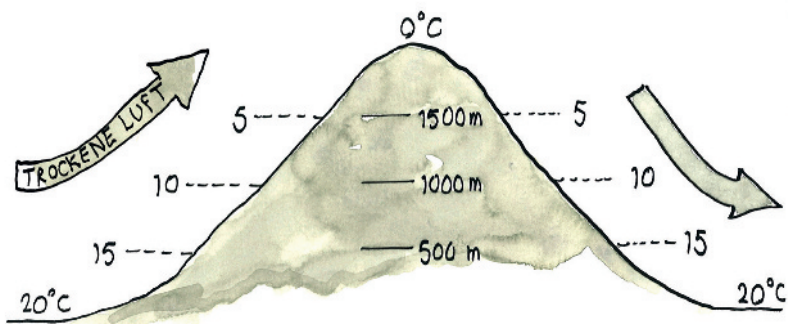
Das Problem ist gelöst – unser Ziel ist erreicht. Einstein sei Dank.

Warum ist der Fö(h)n so warm?

Der Fön, mit dem wir unser Haar trocknen, wird natürlich ganz normal elektrisch beheizt. Aber wie sieht es mit dem Föhn aus, dem warmen Wind, der unserem Haartrockner seinen Namen gegeben hat? Er weht als warmer Wind aus den Alpen kommend ins Tal – vor allem im Winter. Wieso zeigt er sich so trocken und so warm, wo er doch aus den kalten Bergen kommt? Er entsteht aus Luft, die ursprünglich feucht war und über die Berge hinweg zieht. Um zu sehen, wie das kommt, gucken wir uns erst an, was mit trockener Luft passiert, die über die Berge hinweg zieht.

Wir machen uns klar, dass der Luftdruck oben auf dem Berg niedriger ist als unten im Tal. Luft, die einen Berghang entlang nach oben strömt, dehnt sich aus und kühlt sich dadurch ab. Letztgenannter Punkt ist genau die Umkehrung dessen, was in einer Fahrradpumpe passiert: In dieser wird Luft zusammengepresst, die sich dadurch erwärmt. Beim Aufsteigen und Ausdehnen kühlt sich die Luft ab, und zwar um ungefähr 1 Grad Celsius pro 100 m, wenn keine anderen Einflüsse mit hineinspielen. Dies erklärt direkt, warum es kälter wird, wenn wir auf die Berge steigen. Wenn die Luft zum Beispiel 2000 m aufsteigt, dann wird sie um ca. 20 Grad Celsius kälter. Wenn sie an der anderen Seite des Berges wieder nach unten strömt, wärmt sie sich mit derselben Geschwindigkeit wieder auf. Der Netto-Effekt ist somit gleich null: Kein Fö(h)n also.

Schematisch betrachtet sieht das Ganze in dieser Skizze so aus:

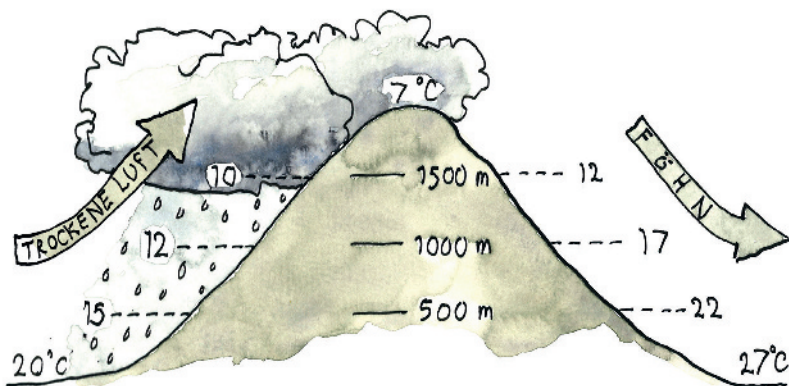


In diesem Modell-Beispiel hat die Luft aus dem Tal zu Anfang 20 Grad Celsius, kühlt sich auf der Bergspitze auf 0 Grad ab und steigt dann wieder auf 20 Grad Celsius im Tal.

Aber nun zum Föhn. Dazu brauchen wir feuchte Luft, die am Berg- hang entlang nach oben steigt. Sie kühlt sich dabei ab, ebenso wie die trockene Luft. Aber nun passiert noch etwas: Beim Abkühlen kondensiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf und bildet Re- gen, ebenso wie sich Frühnebel über einer Wiese bildet, wenn die Temperatur sinkt, oder so wie der Wasserdampf in unserem Atem kondensiert, wenn wir eine kalte Scheibe anhauchen. Und bei der Kondensation wird Wärme freigesetzt: Es ist genau der umgekehr- ter Prozess wie beim Verdampfen, das nämlich gerade Wärme kos- tet.

Durch die Wärme, die beim Kondensieren freigesetzt wird, wird sich die aufsteigende Luft nicht so sehr abkühlen, wie dies bei der trockenen Luft der Fall war. Die Abbildung zeigt, was ungefähr da- bei passiert.

Ergebnis: Die Temperatur erreicht in diesem Beispiel 27 Grad. Die Luft ist somit warm und außerdem trocken, denn sie hat den Groß- teil der Feuchtigkeit als Regen am luvseitigen Berghang beim Auf- steigen zurückgelassen. Die relative Feuchtigkeit kann dadurch auf unter 20% sinken. Warme und trockene Luft: Dass wir den Haar- trockner, Fön' nennen, ist, wie wir gesehen haben, gar keine so ver- rückte Entscheidung.



Die Luft erreicht die Bergspitze nun nicht mehr mit 0 Grad Celsius, sondern hat beispielsweise 7 Grad. Aber beim nach unten Strömen auf der anderen Bergseite erwärmt sich die Luft sehr wohl um die ganzen 20 Grad.

Gefühlte Temperatur, was steckt genau dahinter?

Wenn es draußen kalt und dazu auch noch windig ist, frieren wir besonders schnell. Der Wind kühlt unseren Körper stärker ab, als stehende Luft dies vermag. Häufig spricht man dann von ‚gefühlter Temperatur‘ oder im Englischen von ‚wind chill‘. Für Eisschnellläufer, Radfahrer, Segler und Skiläufer ist es wichtig, dieses Phänomen zu berücksichtigen. Wer dies nicht tut, kann sich Erfrierungen zuziehen. Und trotzdem herrscht in puncto gefühlter Temperatur noch ziemliches Unverständnis. So war mal in der Zeitung zu lesen, dass das in den Heizungen unserer Autos befindliche Wasser sogar bei Temperaturen über null Grad gefrieren kann, wenn es dazu genug Wind gäbe. Natürlich ist das kompletter Unsinn. Solch eine Heizung nimmt auf die Dauer immer die Außentemperatur an. Kälter kann sie nicht werden, zumindest nicht, wenn sie trocken ist (denn Verdampfen kostet Wärme und würde die Heizung zusätzlich abkühlen).

Was für die Heizung gilt, gilt eigentlich für alle Dinge, die man in den Wind hängt: Sie nehmen einfach die Temperatur der Luft an und damit basta.

Bei einem Menschen liegt die Sache jedoch anders: Er produziert Wärme und hält seinen Körper auf einer Temperatur von ca. 37 Grad

Celsius. Die Umgebung ist fast immer ein Stück kälter. Dadurch gibt unser Körper Wärme an die Umgebung ab. Wenn es windstill ist, ist dies relativ wenig: Sogar die ungeschützte Haut ist dann immer noch von einer isolierenden, ein paar Millimeter dicken Luftschicht umgeben, die wir, als wäre sie ein Pullover, mit uns herumtragen (siehe dazu das Kapitel *Wie halte ich meine Körpertemperatur stabil?*, Seite 38). Diese dünne Luftschicht hält den Wärmeverlust in Grenzen und sorgt dafür, dass die Haut noch relativ warm bleibt. Und nun kommt der Wind hinzu. Der Wind bläst diese dünne isolierende Luftschicht weg, so dass die Kälte näher an unsere Haut herankommen kann. Der Temperaturrückgang dicht an der Hautoberfläche nimmt zu. Ergebnis: Die Haut kühlt stärker ab. Sie wird kälter. Sie wird ebenso kalt wie sie normalerweise – ohne Wind – bei einer niedrigeren Lufttemperatur werden würde. Das ist dann die Temperatur, die bei windstillem Wetter einen ebenso großen Wärmeverlust verursachen würde, wie es der Fall ist bei der tatsächlichen Temperatur und herrschendem Wind.

Um an diesen Effekt auch tatsächlich Zahlen koppeln zu können, sind umfangreiche Messungen vorgenommen worden. Man hat beispielsweise die Abkühlung einer Art Flasche, die mit 37 Grad Celsius warmem Wasser gefüllt war, bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten untersucht. Die Ergebnisse hängen auch noch von der Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und anderen Prämissen ab. Was die gängigsten Prämissen betrifft, so finden sich in der nachste-

Wind:	7 m/s =	13 m/s =	20 m/s =
	25 km/h	47 km/h	72 km/h

Lufttemperatur

gefühlte Temperatur

0°C	– 11°C	– 17°C	– 20°C
– 2°C	– 14°C	– 20°C	– 23°C
– 4°C	– 17°C	– 23°C	– 27°C
– 6°C	– 20°C	– 26°C	– 29°C
– 8°C	– 23°C	– 29°C	– 32°C
– 10°C	– 25°C	– 32°C	– 36°C
– 12°C	– 28°C	– 36°C	– 39°C

henden Tabelle eine Reihe von Temperaturwerten dazu. Links ist die echte Lufttemperatur zu finden, in den weiteren Spalten die gefühlte Temperatur in Grad Celsius bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Als niedrigste Windgeschwindigkeit wurde 7 m/s gewählt, was 25 km/h entspricht. Das ist somit die Windgeschwindigkeit für jemanden, der still steht, gilt aber natürlich auch für jemanden, der sich bei windstillem Wetter mit einer Geschwindigkeit von 25 km/h fortbewegt, was ungefähr der Geschwindigkeit eines sportlichen Radfahrers entspricht. Außerdem werden Werte für eine still stehende Person bei Windgeschwindigkeiten von 13 bzw. 20 m/s angegeben. Diese entsprechen, anders gesagt, auch wieder jemandem, der sich unter windstillen Bedingungen mit einer Geschwindigkeit eines Supereisschnellläufers (47 km/h) oder eines Skiläufers auf einer schnellen Piste (72 km/h) fortbewegt.

Wir sehen, dass es ziemlich viel ausmacht, ob es stark weht oder nicht. Wenn es null Grad und sehr windig ist (oder wir fahren mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h den Berg hinunter), dann fühlt es sich ebenso kalt an, als wenn es -20°C und windstill wäre. Und wenn minus zwölf Grad herrschen, dann hat man bei derselben Geschwindigkeit den Eindruck, als ob es minus 39 wären; geradezu sibirische Temperaturen sind das dann!

Warum ist Eis so glatt?

Es scheint so selbstverständlich zu sein: Eis ist glatt. Darum kann man darauf so gut eislaufen. Aber woher kommt es eigentlich, dass Eis so glatt ist? Natürlich ist der Grund nicht, dass es so eben ist, denn ein Spiegel ist auch ganz eben, aber eislaufen kann man auf einem Spiegel bestimmt nicht gut. Das sprichwörtliche ‚spiegelglatt‘ ist also absolut nicht glatt.

Um wirklich gleiten zu können, braucht es mehr, eine Schicht Wasser beispielsweise. Eine Oberfläche, die eben ist, wird erst dann glatt, wenn sie nass ist. Wir rutschen auf einem nassen Fußboden aus, nicht auf einem trockenen. Eine Wasserschicht glättet somit einen ebenen Untergrund. Und das ist tatsächlich auch die Ursache dafür, warum Eis glatt ist: Eine Wasserschicht zwischen dem Schlittschuh und dem Eis funktioniert wie ein Schmiermittel. Es stellt sich

nur die Frage: Woher kommt die Wasserschicht, wenn die Temperatur unter null Grad liegt? Ein altes Missverständnis lautet, dass diese durch den Druck des Eisläufers zustande kommt. Das volle Gewicht des Sportlers konzentriert sich auf eine winzige Oberfläche, nämlich die paar Quadratzentimeter, mit denen die Schlittschuhe das Eis berühren. Nun ist es tatsächlich der Fall, dass Eis unter Druck schon unter null Grad Celsius schmilzt. Das ist logisch, weil flüssiges Wasser ein kleineres Volumen hat als Eis. Wenn wir Eis zusammenpressen, dann wird es zu Wasser. Aber wenn wir ausrechnen, wie viel das im Fall des Eisläufers ausmacht, dann stellt sich heraus, dass es viel zu wenig ist, nämlich höchstens ein paar Zehntel Grad. Dann müsste es mit dem Eislaufen vorbei sein, sobald die Temperatur unter Null fällt. Und dies würde dann auch ganz und gar nicht zur Erklärung herangezogen werden können, warum ein leichter Gegenstand wie ein Eishockey-Puck mit solcher Leichtigkeit über das Eis schlittert.

Die Lösung ist in der Tatsache verborgen, dass Eis von Natur aus an seiner Oberfläche eine Wasserschicht aufweist. Das ist gut zu verstehen, wenn wir uns die Struktur des Eises anschauen. Sie setzt sich aus einem Gitter aus Wassermolekülen zusammen, die von ihren Nachbarn an allen Seiten festgehalten werden. Aber bei der äußersten Molekülschicht liegt der Fall anders: Diese haben an der Außenseite keine Nachbarn. Sie sitzen dadurch weniger fest und verhalten sich wie eine Schicht Wasser, auch wenn die Temperatur unter Null liegt. Bei Eis mit einer Temperatur von null Grad zeigt sich, dass die äußerste dünne Wasserschicht eine Dicke von ungefähr 200 Molekülen aufweist, das sind ca. 70 Nanometer. Das ist weniger als ein Tausendstel des Durchmessers eines Menschenhaares. Das ist noch immer sehr dünn, aber dick genug, um als Schmiermittel zu funktionieren. Die Wasserschicht wird durch das Schlittschuhlaufen selbst noch dicker gemacht. Dafür sorgt die geringe Wärmemenge, die durch die Reibung von Schlittschuh und Eis entsteht, und so das Gleiten noch einfacher macht.

Wenn die Temperatur weiter sinkt, dann wird die Wasserschicht dünner und nimmt damit das Schmiermittel ab. Wenn es kalt genug wird (weit unterhalb von -35°C), dann sind sogar die äußersten Moleküle festgefroren und die dünne Wasserschicht ist komplett verschwunden.

Nun könnte man somit erwarten, dass Eislaufen bei einer Temperatur knapp unterhalb des Nullpunktes den geringsten Widerstand

erzeugt. Aber das ist nicht der Fall, da das Eis dann mechanisch gesehen nicht stark ist; der Schlittschuh gräbt sich ein bisschen ein und erfährt dadurch einen größeren Widerstand. Daher müssen wir die Temperatur senken, um schnell Schlittschuhlaufen zu können.

Das Optimum liegt – in Abhängigkeit von der Art der Schlittschuhe – bei minus 7 bis 8 Grad Celsius. Das ist kalt genug, um nicht zu weit ins Eis einzusinken, aber nicht so kalt, dass die Wasserschicht zu dünn wird. Das Rezept für Rekorde auf Natureis ist also ganz einfach: Wir brauchen windstille Witterungsverhältnisse und minus sieben Grad.

Wellen am Strand

Jeder, der schon mal am Strand entlang läuft, wird bemerkt haben, dass die Wellen alle genau parallel zum Strand auflaufen. Bei Westwind ist dies für einen von Nord nach Süd verlaufenden Strand noch ziemlich logisch. Aber ist es bei Nordwind nicht doch verrückt, dass die Wellen gar nicht darauf zu reagieren scheinen und doch einfach parallel zum Strand verlaufen? Dahinter versteckt sich ein kleines bisschen Physik. Die indirekte Ursache liegt darin, dass der Strand allmählich ansteigt. Oder anders ausgedrückt: Vom Meer aus in Richtung Strand gesehen wird das Wasser langsam seichter. Und die Tiefe wiederum hat Einfluss auf die Geschwindigkeit, mit der sich die Wellen bewegen. Wenn das Wasser flacher wird, dann nimmt die Geschwindigkeit ab (siehe Box auf der nächsten Seite).

Als Beispiel nehmen wir nun einmal schöne breite Wellen, die sich dem Strand im schrägen Winkel nähern, beispielsweise weil sie vom Nordwind fortgetrieben werden. Diese Wellen befinden sich an der einen Flanke in tieferem Wasser als an der anderen. Die Geschwindigkeit ist somit auf der tiefen Seite höher als auf der seichten Seite. Dadurch beschreiben die Wellen eine Kurve, wobei die tiefe Flanke automatisch eine Außenkurve beschreibt. Dadurch dreht sich die Welle zum Strand hin, und zwar genau so lange, bis die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen beiden Flanken ausgeglichen sind. Und das geschieht erst dann, wenn sie parallel zur Küste verlaufen. Danach gibt es keinen Grund mehr vom rechten Kurs abzuweichen und so bleiben sie schön parallel. Dies alles geschieht unter der Voraussetzung, dass der Strand natürlich überall gleichmäßig ansteigt.

Geschwindigkeit von Wasserwellen

Die Geschwindigkeit mit der sich Wasserwellen fortpflanzen, ist von verschiedenen Variablen abhängig. Die zwei Kräfte, welche die Oberfläche schön glatt halten wollen, sind die Oberflächenspannung (die beispielsweise auch dafür sorgt, dass Tropfen rund sind) und die Schwerkraft. Beide haben das Ziel, einen einmal gebildeten Wellenkamm auf dem Wasser so schnell wie möglich wieder zu unterdrücken. Sie haben dadurch beide Einfluss auf die Geschwindigkeit. Die Oberflächenspannung ist nur bei kleinen Kräuselungen auf dem Wasser wichtig, und zwar bei Wellenlängen von bis zu ein paar Zentimetern; diese lassen wir daher weg. Für etwas größere Wellen (wie am Strand) ist die Schwerkraft von entscheidender Bedeutung.

Außerdem ist es noch wichtig, wie groß die Wellenlänge in Bezug auf die Tiefe ist. Für den Strand können wir davon ausgehen, dass die Wellenlänge in Bezug auf die Tiefe groß ist. Die Formel für die Geschwindigkeit lautet dann einfach: $v = \sqrt{g D}$, wobei g die Beschleunigung aufgrund der Schwerkraft und D die Tiefe ist.

Tatsächlich reduziert sich also die Geschwindigkeit der Wellen, wenn die Tiefe abnimmt. Bei einer Tiefe von 1 Meter beläuft sich die Geschwindigkeit auf ungefähr 3 m/s. Das ist zum Mitlaufen ein wenig zu schnell – vor allem im Wasser.

Wellenreiter haben also mit dieser schönen sanft ansteigenden holländischen Nordseeküste Glück – und natürlich mit den physikalischen Gesetzen.

Wie schnell fallen Regentropfen?

Manchmal fällt es uns auf: Wenn ein heftiger Regenschauer über uns hereinbricht, fallen erst die großen Tropfen, und je mehr der Schauer abebbt, desto mehr kommen die kleinen Tropfen an die Reihe. Große Tropfen fallen schneller als kleine.



Das ist doch verrückt! Im luftleeren Raum fällt alles gleich schnell nach unten, das wissen wir doch noch aus dem Schulunterricht. So fällt eine Vogelfeder in einer Vakuumröhre ebenso schnell wie eine Murmel oder eine Reißzwecke – das Gewicht ist ganz egal.

Aber Regentropfen fallen nicht in einem Vakuum. Sie fallen in der Luft und dabei spielt Reibung eine Rolle. Diese wirkt der Schwerkraft entgegen, sobald Dinge fallen.

Um den Unterschied zwischen kleinen und großen Tropfen zu begreifen, müssen wir kurz untersuchen, welche Rolle diese Reibung während des Fallens spielt. Dieser Prozess fängt genau wie im Vakuum an: Die Schwerkraft sorgt dafür, dass der Tropfen an Geschwindigkeit zunimmt. Aber sobald die Geschwindigkeit steigt, wird auch die Reibung größer. Diese richtet sich nach oben, verhält sich also entgegengesetzt zur Schwerkraft. Die Netto-Kraft nach unten nimmt demnach ab, und die Geschwindigkeit nimmt – gemäß Newtons „Kraft ist Masse mal Beschleunigung“ – weniger schnell zu. Die Geschwindigkeit steigt noch, bis die Netto-Kraft null ist und bleibt danach konstant. In dieser Situation gibt es somit ein Gleichgewicht zwischen der nach unten gerichteten Schwerkraft und der nach oben gerichteten Reibung. Und hierbei spielt die Größe der Regentropfen eine Rolle.

Bei fallenden Regentropfen, die größer als ungefähr 1 mm sind, ist die Reibung proportional zum Quadrat des Durchmessers. Das heißt: Wenn ein Tropfen zwei Mal so dick wird, dann wird er einen vier Mal so großen Widerstand bei derselben Geschwindigkeit erfahren. Das kommt daher, dass der Luftstrom turbulent wird, so wie dies auch beim Radfahrer auf Seite 45 und dem Auto auf Seite 63 der Fall ist. Das ist übrigens anders bei kleineren Tropfen, zum Beispiel bei Nebeltropfen; siehe dazu das folgende Kapitel *Warum fallen Nebeltropfen nicht?* Nehmen wir nun mal an, dass ein Tropfen mit einer bestimmten Geschwindigkeit fällt und plötzlich zum doppelten Durchmesser anwächst (beispielsweise dadurch, dass er andere Tropfen aufnimmt), dann wird die nach unten gerichtete Schwerkraft acht Mal so groß und die nach oben gerichtete Rei-

bung nur vier Mal so groß. Plötzlich gibt es also eine Netto-Kraft nach unten, und der Tropfen fängt unmittelbar an, schneller zu fallen, genau so lange, bis die Geschwindigkeit so weit gestiegen ist, dass sich die Kräfte wieder im Gleichgewicht befinden. Damit ist klar, dass große Regentropfen schneller fallen als kleine.

Es stellt sich nun die Frage: Wie schnell fallen Regentropfen genau? Gibt es eine Grenze bei dieser Geschwindigkeit? Und wie groß werden Regentropfen eigentlich? Denn je größer, je schneller. Die Größe ist ein interessanter Faktor. Wassertropfen wollen gern kugelförmig werden: Sie streben eine möglichst kleine Oberfläche bei einem gegebenen Inhalt an, das Gleiche gilt für Luftballons. Bei Wassertropfen kommt dies durch die Anziehungskräfte zwischen den Molekülen. Die ‚Oberflächenspannung‘, die dadurch verursacht wird, zieht sozusagen eine Haut um den Tropfen herum.

Wenn solch ein Tropfen nun fällt, fühlt er den Luftwiderstand, den die vorbeiströmende Luft verursacht. Für größer werdende – und schneller fallende – Tropfen nehmen diese Kräfte stets zu. Sie führen dazu, dass die Tropfen von unten abgeflacht werden. Wenn die Tropfen einen Durchmesser von ungefähr 5 Millimeter erreichen, werden sie so instabil, dass sie in kleinere Exemplare zerfallen. Das kann man schön in einem Windtunnel mit einem vertikalen Luftstrom beobachten, wobei die Tropfen still hängen bleiben, wenn der Luftstrom die richtige Geschwindigkeit hat.

Wenn Regentropfen schön rund bleiben sollen, dann dürfen sie höchstens einen Durchmesser von ungefähr 3 Millimetern bekommen. Werden sie größer, dann werden sie an der Unterseite flacher. Daraus folgt dann, dass der Widerstand zunimmt und sie nicht mehr viel schneller fallen.

Wie hoch sind die Geschwindigkeiten? Für Tropfen mit einem Durchmesser von 1 Millimeter hat sich ergeben, dass es 16 km/h sind. Für Tropfen mit einem Durchmesser von 3 Millimetern sind es schon 28 km/h. Aber dann haben wir auch das Maximum schon fast erreicht: Für größere Tropfen wird einer weiteren Steigerung der Geschwindigkeit durch die Abplattung entgegengewirkt. Die schnellsten Tropfen sind diejenigen mit einem Durchmesser von 5 Millimetern. Sie erreichen so ungefähr 29 km/h. Das ist dann kaum mehr als bei den Tropfen mit 3 Millimeter Durchmesser.

Wenn wir also schnell mit dem Rad unterwegs sind, dann bewegen wir uns genau so schnell fort wie die schnellsten Regentropfen. Nur fallen diese vertikal und wir dahingegen fahren horizontal. Diese Tropfen treffen uns dann also - zumindest wenn es windstill ist - genau in einem Winkel von etwas weniger als 45° schräg von vorn. Das ist gut zu wissen, wenn wir den Regenschirm beim Fahrradfahren aufspannen.

Warum fallen Nebeltropfen nicht?

Regen und Nebel: Beide setzen sich aus Wassertropfen zusammen, aber vom Regen sagt man, dass er fällt und vom Nebel, dass er in der Luft hängt. Der einzige Unterschied besteht in der Größe der Tropfen. Und große Tropfen fallen viel schneller als kleine, wie wir im vorstehenden Abschnitt sahen. Nebeltropfen fallen nicht - oder kaum. Im Prinzip kommt es wieder daher, dass die Schwerkraft bei solchen kleinen Tropfen unverhältnismäßig klein ist. Die Schwerkraft ist nämlich proportional zur Masse des Tropfens, somit proportional zum Durchmesser hoch drei.

Bis hierher ähnelt die Geschichte der über die Regentropfen. Nur sind Nebeltropfen viele Male kleiner - und fallen so viel langsamer - so dass ein anderes Reibungsgesetz als für Regentropfen gilt. Das kommt vor allem dadurch, dass die Luft, die um die Tröpfchen herum strömt, sich ordentlich verhält. Sie bildet schöne Stromlinien, die mehr oder weniger parallel verlaufen: Die Strömung ist laminar, wie man das nennt, und nicht turbulent wie bei größeren und schnelleren Gegenständen. In diesem Fall (für Tropfen, die kleiner als ungefähr 0,1 mm sind) ist die Reibung direkt proportional zum Durchmesser. Somit gilt: Wenn ein kleiner Tropfen zwei Mal so dick wird, wird er bei derselben Geschwindigkeit auch einen zwei Mal so großen Widerstand spüren. Inzwischen wird jedoch die Schwerkraft in diesem Fall tatsächlich acht Mal so groß.

Bedeutet dies nun, dass Nebeltropfen letzten Endes doch nach unten fallen? Wahrscheinlich ja, aber ihre Geschwindigkeit ist dabei arg gering. Wir schauen uns Nebeltropfen mit einem Durchmesser von 0,002 mm an. Deren Größe entspricht ungefähr vier Mal der Wellenlänge des Lichts; damit sind sie groß genug, um vom menschlichen Auge als eine weiße Wolke wahrgenommen zu wer-

den. Wenn wir uns nun ans Ausrechnen machen, kommen wir auf eine Geschwindigkeit von 0,1 mm/s bzw. 36 cm pro Stunde. Das ist nicht viel; weniger als 10 Meter an einem ganzen Tag. Ein Windhauch oder ein wenig Konvektion werden schnell dafür sorgen, dass solche Tröpfchen in der Luft hängen bleiben.

Aber es gibt etwas Überraschendes: Manche Nebeltropfen schweben wirklich weiter, sogar wenn die Luft vollständig still ist; nur klein genug müssen sie dazu sein! So verrückt ist das nun auch wieder nicht. Letztes Endes fallen die losen Luft- und Wassermoleküle auch nicht auf die Erde, sondern bilden gemeinsam die Erdatmosphäre. Das ist die Folge der thermischen Bewegung, wodurch Gasmoleküle und andere kleine Teilchen weiter schweben und wodurch uns die Atmosphäre nicht auf den Kopf fällt, sondern sich kilometerweit nach oben erstreckt.

Wir können ausrechnen, wie groß die Tröpfchen werden dürfen, um, ebenso wie die Moleküle in der Erdatmosphäre, weiterhin zu schweben. Aber da sie viel schwerer sind als lose Moleküle, können wir nicht erwarten, dass sie weiterhin genau so hoch schweben wie lose Moleküle und eine ebenso dicke Hülle bilden wie die Atmosphäre. Wir wählen daher für diese ‚Tröpfchen-Atmosphäre‘ eine bescheidene Dicke von, sagen wir mal, einem Tausendstel der Dicke der echten Atmosphäre; das heißt mit einer Dicke von 8 Metern anstelle von 8 Kilometern. Wassertropfen, die dies tun, müssen offensichtlich aus ungefähr 1600 Wassermolekülen bestehen. Zugegeben: Das sind winzig kleine Tröpfchen, so klein, dass sie für unsere Augen unsichtbar sind. Aber sie fallen wirklich nicht.

Skydiving: Wie schnell kann ein Mensch fallen?

Stellen wir uns vor, wir springen aus einem Flugzeug, ohne Fallschirm. Wie hart schlagen wir dann auf dem Boden auf? Und spielt es eigentlich eine Rolle, wie hoch das Flugzeug fliegt?

Um mit Letzterem zu beginnen: Nein. Wenn das Flugzeug nicht zu tief fliegt (sagen wir, nicht unter 1000 Meter), spielt die Höhe keine Rolle.

Sobald wir anfangen zu fallen, nimmt unsere Geschwindigkeit zu und damit auch der Luftwiderstand. Schon bald entsteht ein Gleichgewicht zwischen beiden: Die Schwerkraft wirkt nach unten, der Luftwiderstand ist nach oben gerichtet, und die resultierende

Rekordsprung

Zuerst geht es um den Skydiver, der aus einem Flugzeug springt und damit in einer ziemlich dichten Atmosphäre schwebt. Nach ein paar Sekunden erreicht er eine konstante Geschwindigkeit, wobei die Schwerkraft $m g$ kompensiert wird durch den Luftwiderstand $C_w A \times (\frac{1}{2} \rho v^2)$, mit der Masse m , der Erdbeschleunigung g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), dem Luftwiderstandskoeffizienten C_w , der frontalen Oberfläche A , der Luftdichte ($\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ bei 0°C auf Meereshöhe) und der Geschwindigkeit v . Das ergibt $v = \sqrt{(2 m g / C_w A \rho)}$. Für einen Erwachsenen mit kompletter Ausrüstung nehmen wir $m = 100 \text{ kg}$ an und mit ausgestreckten Armen und Beinen schätzen wir $A = 1 \text{ m}^2$ und $C_w = 0,8$ für ein nicht stromlinienförmiges ‚Objekt‘ wie einen Skydiver. Wir nehmen an, dass sich der Skydiver auf einer Höhe von rund 3000 Metern befindet. Die Luftdichte beträgt dort noch 70% der Luftdichte auf Meereshöhe. Wir nehmen deshalb $\rho = 0,9 \text{ kg/m}^3$ an. Das ergibt $v = 52 \text{ m/s}$ oder 188 km/h . Das stimmt einigermaßen mit der Freifallgrenzgeschwindigkeit von 200 km/h überein.

Für einen vollständig zusammengeballten Skydiver ist eine Berechnung nicht so zuverlässig, da C_w für einen kugelartigen Gegenstand gerade bei diesen Geschwindigkeiten anfängt, von den üblichen 0,5 abzuweichen (C_w sinkt ziemlich plötzlich auf Werte um 0,1 bei Reynolds-Zahlen um 100000). Doch dass sich die Geschwindigkeit erhöht, ist deutlich: In der Praxis werden es 320 km/h .

Und jetzt der Rekordsprung aus dem Ballon. Im freien Fall ohne Luftwiderstand (außerhalb der Atmosphäre also) erfährt ein beliebiger Gegenstand die Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$): Jede Sekunde wächst die Geschwindigkeit um $9,81 \text{ m/s}$. Nach 30 Sekunden freien Falls bedeutet das eine Geschwindigkeit von 294 m/s oder 1058 km/h , was ungefähr der Schallgeschwindigkeit entspricht. Jeder Gegenstand, der sich wirklich gänzlich außerhalb der Atmosphäre befindet, ist also nach einer halben Minute Fall im Begriff, die Schallmauer zu durchbrechen.

Für einen Fallschirmspringer, der aus einem Ballon springt, dauert dies etwas länger: Es ist nämlich ein bisschen Luft vorhanden, denn sonst könnte der Ballon nicht schweben. Joseph Kittinger scheiterte 1960 mit 980 km/h knapp daran, die Schallmauer zu durchbrechen, Felix Baumgartner schaffte es 2012 mit 1.342 km/h dann aber doch.

Kraft wird null. Damit nimmt die Geschwindigkeit nicht weiter zu, genau wie bei den Regentropfen (siehe Seite 13).

Der Luftwiderstand eines *Skydivers* ist – analog zu dem eines Autos, Radfahrers oder sogar eines großen Regentropfens – proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit, der frontalen Oberfläche und zum C_w -Wert, dem Luftwiderstandskoeffizienten, der durch das Strömungsprofil bestimmt wird. Die Frage lautet also: Bei welcher Geschwindigkeit sind die beiden Kräfte gleich? Denn das ist die Geschwindigkeit, die wir suchen.

Jetzt hängt dies noch von der Haltung ab, wie Skydiver wissen. Mit ausgestreckten Armen und Beinen ist die frontale Oberfläche (also auch der Luftwiderstand) maximal. Die Endgeschwindigkeit liegt dann ziemlich genau bei 200 km/h. Das ist keine gute Nachricht: Man muss schon sehr viel Glück mit dem Landeplatz haben (ein Heuhaufen wäre ideal), um solch einen Fall zu überleben, vor allem ohne Fallschirm. Wenn wir uns zu einer Art Ball zusammenrollen, nimmt die Geschwindigkeit beträchtlich zu. Aber diese Variante hat sowohl einen Vorteil als auch einen Nachteil: Die frontale Oberfläche wird kleiner und das Strömungsprofil etwas günstiger. Ergebnis: Mit ungefähr 320 km/h kommt einem die Erde entgegen (ein sehr hoher Heuhaufen wäre ideal).

Der Fallschirm bringt Rettung. Damit wird die Oberfläche drastisch vergrößert und die Geschwindigkeit drastisch verringert. Mit dem traditionellen runden Fallschirm (Oberfläche ca. 60 m² mit einem C_w von 0,8) beträgt die Landegeschwindigkeit ungefähr 18 km/h. Das entspricht einem Sprung von einer anderthalb Meter hohen Mauer.

Das ist nichts verglichen mit der Höhe, in welcher der Skydiver startete, doch immer noch ein beträchtlicher Sprung für einen normalen Menschen.

Und für denjenigen, der an Rekorde denkt: Geht es nicht schneller? Sicher, wenn wir wirklich in großer Höhe starten, haben wir den Vorteil dünner Luft. Dort ist der Widerstand viel geringer, denn er ist proportional zur Luftdichte. Ein Start am Rande der Atmosphäre ist dann am Schönsten. Nur ist es dort eiskalt, und außerdem muss man eine Sauerstoffflasche mitnehmen.

Das hielt den amerikanischen Luftwaffenpiloten Joseph Kittinger jedoch nicht davon ab, am 16. August 1960 in 31.300 Metern Höhe aus einem Ballon zu springen. Das ist ungefähr die dreifache Dauer-

Experiment für Zuhause Überraschend fallen

Wenn wir einen Stein durch eine 1 Meter lange vertikale Röhre fallen lassen, können wir genau ausrechnen, wie lange er dafür braucht, nämlich ungefähr 0,45 Sekunden. Und ob es sich nun um einen Stein handelt, eine Metallkugel oder einen kleinen Zylinder, ob die Röhre aus PVC, Stahl oder Kupfer ist, ist ganz egal: Die Fallzeit muss eine knappe halbe Sekunde betragen, solange der fallende Gegenstand gut in die Röhre passt und der Luftwiderstand nicht berücksichtigt zu werden braucht. Wir führen den Versuch nun mit einem metallischen Zylinder durch und was stellt sich heraus? Er braucht in einer PVC-Röhre erwartungsgemäß eine halbe Sekunde, doch in einer Kupferröhre fast zehn Sekunden. Unser ‚Publikum‘ kann sich nicht erklären, warum das so ist.

Die Lösung ist einfach: Der Zylinder ist ein starker Magnet. Und wenn die Röhre aus gut leitendem Metall besteht, werden darin beim Fall des magnetischen Zylinders elektrische Ströme erzeugt, genauso, wie es in den Kupferspulen des Dynamos an unserem Fahrrad geschieht. Kurzum: Das Experiment ist eine ebenso einfache wie spannende Veranschaulichung der Lenzschen Regel. Diese besagt, kurz zusammengefasst, dass sich ein elektrischer Leiter einer Veränderung eines Magnetfelds widersetzt, indem er Ströme erzeugt, die ein entgegengesetztes Feld bewirken. Diese Ströme können in der Röhre herumlaufen, vorausgesetzt, die Röhre ist leitend – und Kupfer ist ein hervorragender Leiter. Die Ströme sorgen für eine Erwärmung der Röhre, auch wenn diese zu gering ist, um sie mit der Hand zu fühlen.

Wir können das Experiment auch aus der Sicht des Energieerhaltungssatzes betrachten. Ein Teil der ‚Fallenergie‘ wird mittels elektrischer Ströme in Wärme der Röhre umgewandelt. Dies muss zu Lasten der Energie gehen, mit welcher der Gegenstand aus der Röhre zum Vorschein kommt. Deshalb verlässt er sie mit so geringer Geschwindigkeit.

Und wo wir uns schon mit Supermagneten beschäftigen: Wir können sie auch hervorragend für den *super-einfachen Elektromotor* auf Seite 158 verwenden – und für eine Reihe anderer Scherze. Sogar ein originelles Geburtstagsgeschenk gehört zu den Möglichkeiten.

flughöhe eines Verkehrsflugzeugs. Die Luftdichte beträgt dort nur noch etwa 2% der Luftdichte auf Meereshöhe. Somit war ein Großteil seines Sprungs fast ein freier Fall im Vakuum, praktisch ohne Luftwiderstand. Der ‚freie Fall‘ dauerte insgesamt 4,5 Minuten.

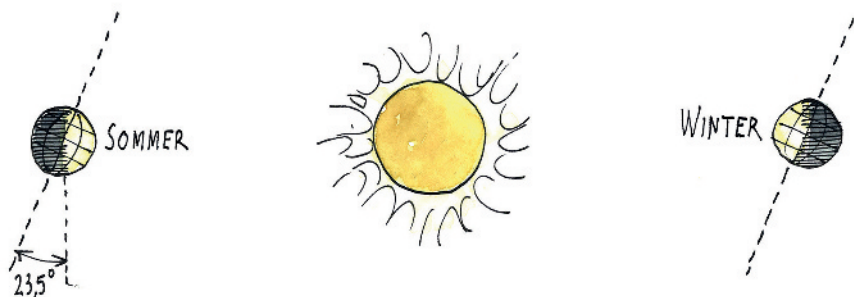
Er erreichte eine Geschwindigkeit von ungefähr 980 km/h, nicht ganz die Schallgeschwindigkeit (ca. 1.050 km/h bei der in dieser Höhe herrschenden Temperatur).

Das ließ sich der österreichische Stuntman Felix Baumgartner nicht zweimal sagen. Gut ein halbes Jahrhundert später – genau gesagt am 14. Oktober 2012 – sprang er in einer Art Weltraumanzug in 38.969 Metern Höhe aus einem Ballon. Bei seinem vier Minuten und 19 Sekunden dauernden freien Fall erreichte er eine Geschwindigkeit von 1.357,6 km/h. Das war deutlich schneller als der Schall. Damit ist er der erste Mensch, der ohne Zuhilfenahme eines Motors die Schallmauer durchbrochen hat.

Doch besonders angenehm war dieser eiskalte freie Fall nicht. Man muss schon etwas dafür übrig haben, will man ins Guinnessbuch der Rekorde kommen.

Wie hoch steigt die Sonne heute?

Bei tief stehender Sonne spürt man wenig von ihrer Wärme. Die Ursache dafür liegt in der Dämpfung der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre. Wenn die Sonne sehr tief steht, muss sie durch eine viel dickere Atmosphärenschicht hindurch scheinen, als wenn sie hoch steht. Dies wird deutlich, wenn wir bedenken, dass diese Atmosphäre, relativ betrachtet, nur eine dünne Hülle rund um die Erde bildet: Sie ist viel weniger dick als eine Apfelschale bei einem Apfel (siehe dazu auch *Warum ist der Himmel blau?* Seite 76). Ein sehr schräger Winkel verlängert den Weg durch die Atmosphäre beträchtlich und dämpft die Strahlung deutlich. Dies gilt vor allem für den ultravioletten Teil des Sonnenspektrums, der für die Bräunung unserer Haut sorgt. Die durch die Atmosphäre hervorgerufene Dämpfung ist relativ groß und ob die Sonne nun hoch oder tief steht, macht einen ziemlichen Unterschied. Bei einem hohen Sonnenstand ist ein Sonnenschutzmittel besonders wichtig. Kurzum:



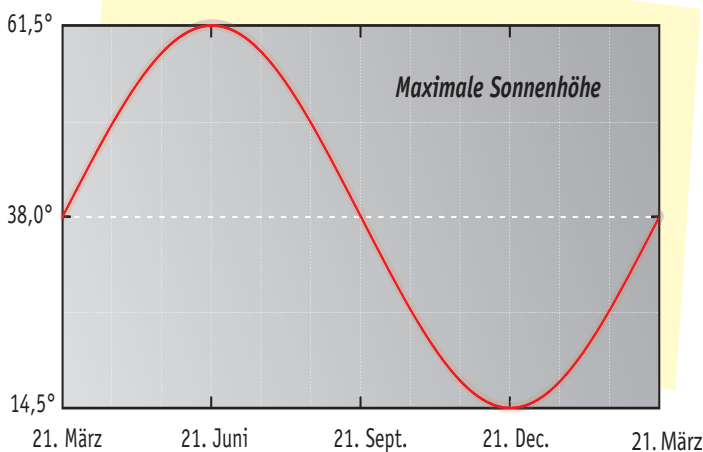
Für solche Sachen ist es praktisch, wenn man weiß, wie hoch die Sonne steigt.

Für Bewohner des Äquatorgebietes ist es einfach: In der Tagesmitte steht die Sonne direkt über ihrem Kopf, zumindest gilt dies für den 21. März und 21. September. Die Sonne steht dann somit in einem Winkel von 90 Grad zur Horizontalen. Bei uns in Deutschland in der Gegend um Berlin, auf dem 52. nördlichen Breitengrad, steht die Sonne 52 Grad niedriger. Vom Horizont aus gemessen steht sie nur noch $90 - 52 = 38$ Grad hoch.

Aber dadurch, dass die Erdachse ein bisschen schief steht, kommen mitten im Sommer noch 23,5 Grad hinzu: Die Sonne steht dann senkrecht über dem nördlichen Wendekreis, auch Wendekreis des Krebses genannt. Das sind dann $38 + 23,5 = 61,5$ Grad. Im Winter wird die gleiche Zahl abgezogen und dann bleibt nicht viel übrig: $38 - 23,5 = 14,5$ Grad.

Aber was passiert in der Zwischenzeit? Bei der Berechnung können wir es uns leicht machen, denn uns hilft die Tatsache, dass unser Jahr ungefähr ebenso viel Tage hat (365) wie ein Kreis Gradzahlen (360). Die Erde legt in ihrer Bahn um die Sonne jeden Tag eine Entfernung von ungefähr 1 Grad zurück. Anschaulicher wird es noch, wenn wir in Monaten rechnen: Dann sind es pro Monat durchschnittlich $360 : 12 = 30$ Grad, wobei es den einen Monat ein Grad mehr und den anderen Monat ein Grad weniger sein kann, im Durchschnitt sind es jedoch 30 Grad.

Jetzt wird es einfach. Die Höhe, welche die Sonne erreicht, ist annäherungsweise eine sinusförmige Wellenlinie um den Durchschnitt von 38 Grad, mit Höchstwerten nach oben und unten von plus und minus 23,5 Grad. Genau dies zeigt die nachstehende Abbildung:



Nun erreicht eine Sinuskurve schon bei einem Winkel von 30 Grad (also in einem Monat) die Hälfte ihres maximalen Standes und braucht sie die nächsten 60 Grad (2 Monate) für die andere Hälfte. Die Schlussfolgerung dazu lautet: Um den 21. April herum hat die Sonne schon die Hälfte ihres ‚Gewinnes‘ eingefahren und kommt auf (abgerundet) $38 + 12 = 50$ Grad über dem Horizont. Erst um den 21. Juni erreicht sie ihre maximale Höhe mit beinahe 62 Grad. Zwei Monate später, um den 21. August, passiert sie die 50-Grad-Grenze und einen Monat später ist sie schon bei 38 Grad angekommen.

Wie schnell geht es eigentlich auf dem steilen Stück, um den 21. März und 21. September rum? Ein wenig Mathematik ergibt 0,4 Grad pro Tag; das ist somit pro Tag beinahe der Durchmesser der Sonne selbst (der beläuft sich ziemlich genau auf 0,5 Grad). Dahingegen dauert es mitten im Sommer und mitten im Winter, um den 21. Juni und den 21. Dezember herum, natürlich lange, bis ein Unterschied zu merken ist. Wenn wir ab dem 21. rechnen, dann ist es so, dass wir ungefähr 12 Tage warten müssen, bevor wir einen Unterschied in der Größenordnung des Sonnendurchmessers feststellen können. Natürlich haben wir die Dinge hier und da ein wenig vereinfacht. So haben wir für die Bahn der Erde um die Sonne einen Kreis angenommen, was nicht ganz stimmt: In Wirklichkeit ist die Umlaufbahn eine Ellipse, und die Erde bewegt sich im Winter (wenn die Entfernung zur Sonne etwas kleiner ist) etwas schneller und etwas langsamer im Sommer (wenn die Entfernung zur Sonne etwas größer ist). Dadurch gibt es, was den 21. betrifft, einen kleinen Spielraum (und dadurch ist auch der scheinbare Sonnendurchmesser

nicht konstant). Außerdem sind nicht alle 12 Monate des Jahres gleich lang. Das Jahr teilt sich nicht einmal in genau 365 Tage, sondern 365 Tage und einen Viertel Tag, so dass wir alle vier Jahre ein Schaltjahr mit 366 Tagen haben, um ein bisschen im Gleichschritt zu bleiben. Dadurch weichen die ‚21sten‘ ab und zu noch ein bisschen mehr ab. Aber im Großen und Ganzen kann man unsere Resultate doch als recht genau bezeichnen.

Reise zur Sonne

Warum holt man sich beim Skilaufen so schnell einen Sonnenbrand? Dafür gibt es mindestens zwei auf der Hand liegende Ursachen, die auch bei allen Formen des Wassersports in Deutschland eine Rolle spielen: 1. Man ist den ganzen Tag an der frischen Luft – abgesehen von den Ferien ist das selten der Fall. 2. Die Sonne scheint nicht nur von oben herab, sondern wird auch noch ungehindert von Bäumen oder Gebäuden wie in der Stadt, von der Oberfläche des Schnees bzw. Wassers reflektiert. Dadurch verdoppelt sich die Intensität beinahe. Auch der Beitrag des blauen Himmels ist unter diesen Umständen beträchtlich: Der große offene Himmel enthält nämlich nicht nur indirektes blaues und violettes Sonnenlicht, sondern auch ultraviolettes, das mit seiner kurzen Wellenlänge noch mehr gestreut wird als blaues (siehe dazu Seite 76).

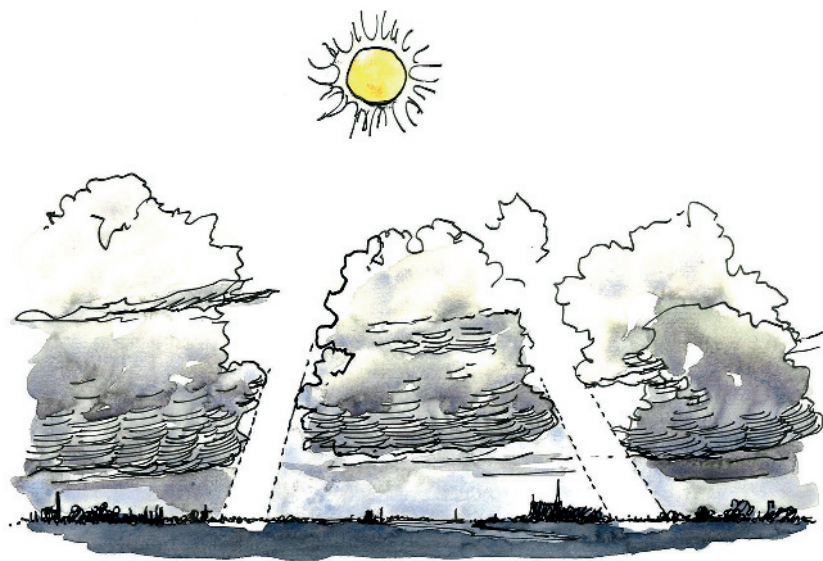
Aber auch zwei weitere Faktoren sind wichtig. Zuerst ist der Einfluss der geografischen Breite zu nennen – zumindest wenn wir nach Süden fahren, zum Beispiel in die Alpen. Für jeweils 100 Kilometer in Richtung Süden steigt die Sonne ungefähr um 1 Grad. Das ist einfach zu verstehen. Der Erdumfang beläuft sich auf 40.000 km, somit ist die Entfernung vom Pol zum Äquator 10.000 km. Das entspricht 90 Grad, und 10.000 geteilt durch 90 ergibt 111 km pro Grad, wenn man es genau ausrechnet. Wenn wir also in die südlichen Alpen reisen, dann steht die Sonne schon beinahe 10 Grad höher am Himmel als in Norddeutschland. Im Winter bedeutet dies zur Tagesmitte ungefähr 25 anstelle von 15 Grad oberhalb des Horizonts. Der Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre wird dann kürzer. Und das fühlt man deutlich.

Bei Faktor zwei handelt es sich um die Höhe in Bezug auf die Meereshöhe. Was für einen Unterschied macht es, wenn wir außer der Tatsache, dass wir nach Süden fahren, auch noch in die Berge fah-

Luftdruck und Atmosphäre

Der atmosphärische Luftdruck nimmt bei zunehmender Höhe zu Anfang schnell ab – und zwar um 12% für die ersten 1000 Meter. Dieser Rückgang wird allmählich weniger stark: Der Druck senkt sich grob gesagt mit einer e-Potenz, gemäß $e^{-h/8\text{km}}$, wobei h die Höhe ist. In einer Höhe von 1 km beträgt der Druck nur noch $e^{-1/8}$ bzw. 0,88 – was tatsächlich einem Rückgang von 12% entspricht. So stellen wir fest, dass der Luftdruck auf dem Montblanc, der 4800 m hoch ist, nur noch 55% des Wertes auf der Meereshöhe beträgt. Etwas höher, auf gut 5 km, hat sich der Druck halbiert. Das liefert uns eine schöne Faustregel: Die Höhe, wo sich die Werte halbieren, beträgt ungefähr 5 km. Auf der Langstreckenflughöhe von Flugzeugen, auf so ca. 10 km Höhe, hat sich der Luftdruck nochmals halbiert – nun ist nur noch ein Viertel übrig. Extrem genau sind diese Zahlen übrigens nicht. Der Grund dafür liegt in den natürlichen Fluktuationen des Luftdrucks und vor allem in der unterschiedlichen Temperatur in der Atmosphäre.

ren, also in die Höhe? Dass wir damit näher an die Sonne herankommen ist natürlich irrelevant; es macht höchstens ein paar Kilometer in Bezug auf eine Entfernung von 150 Millionen Kilometer aus. Was aber sehr wohl zählt, ist die Tatsache, dass wir ein Stück von der Atmosphäre hinter uns lassen, so dass der Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre hindurch kürzer wird. Der Anstieg auf 1000 m Höhe macht einen Unterschied von 12% aus. Wenn wir noch höher steigen, auf 2000 m, dann sind es schon ca. 22% Differenz, bei 3000 Metern sogar 31% (siehe oben). Das sind deutliche Zahlen, die natürlich immer und überall auf der Welt gelten, wenn wir ‚hoch hinaus wollen‘. Wir können sie übrigens nicht einfach so benutzen, um den sich verändernden Einfluss des schädlichen UV-Lichts zu bestimmen. Dafür kann keine allgemeingültige Zahl genannt werden, was unter anderem daran liegt, dass das Ozon als wichtiger das UV-Licht abschwächender Bestandteil nicht homogen der Atmosphäre beigemischt ist – Ozon befindet sich vor allem in Höhen zwischen 15 und 35 km. Eines jedoch möge klar sein: Sonnencreme in den Bergen ist ein absolutes Muss – auch ohne Schnee!



Lichtstreifen in Richtung Sonne

An Tagen mit schönen Gewitterwolken am Himmel, kommt es häufig vor, dass an zwei oder mehreren Stellen ein Loch zwischen den Wolken vorhanden ist, aus dem ein breiter Streifen Sonnenlicht fällt. Die verschiedenen Streifen verlaufen absolut nicht parallel. Sie scheinen in einem Punkt oberhalb der Wolken zu entstehen – aber auch wieder nicht so viel weiter oben. Schnell ist man geneigt zu denken: „Nun kann man gut sehen, wo die Sonne steht – genau im Schnittpunkt dieser Lichtbündel.“

Das ist eigentlich Unsinn. Natürlich befindet sich die Sonne in der Verlängerung dieser Bündel, aber dass sie sich in solcher Nähe befinden soll, ist natürlich nur eine optische Täuschung oder besser gesagt, eine perspektivische Verzerrung. Die Bündel verlaufen nämlich sehr wohl genau parallel zueinander. Die perspektivische Verzerrung, mit der wir es hier zu tun haben, ist dieselbe, die wir sehen, wenn wir uns auf die Eisenbahnschienen stellen. Die Schienen und die Oberleitung scheinen aus einem Punkt hervorzugehen, irgendwo in der Ferne. In Wirklichkeit verlaufen sie doch tatsächlich schön parallel.

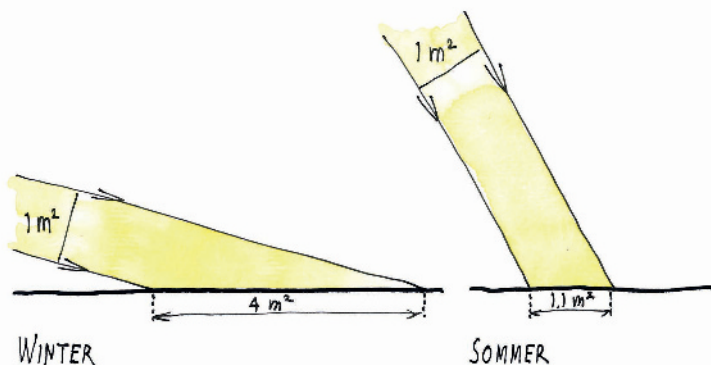
Zugegeben, der Vergleich stimmt nicht hundertprozentig. Die Sonnenstrahlen gehen letzten Endes sehr wohl aus einem ‚Punkt‘ (der

Sonne) hervor, während die Schienen dies nicht tun: Sie verlaufen wirklich überall dort parallel, wo Eisenbahnschienen verlegt worden sind. Aber was macht das nun aus? Wie parallel verlaufen diese Lichtstreifen nun wirklich? Die Sonne befindet sich in einer Entfernung von 150.000.000 km von der Erde. Wir schätzen den Abstand zwischen den Löchern in den Wolken, durch die die Lichtstreifen verlaufen, der Einfachheit halber auf 15 km. Dann ist der Winkel, in dem die Bahnen zueinander verlaufen, derselbe wie der Winkel zwischen zwei Fäden, die ich 10 cm auseinander halte und die an ein und demselben Nagel in einer Entfernung von 1000 km, irgendwo in Südfrankreich, befestigt sind.

Leider hindert uns die Erdkrümmung daran, diese Fäden tatsächlich über eine so große Entfernung zu spannen, sonst würden wir nämlich sehen, dass sie immer schön parallel zu einander verlaufen. Schlussfolgerung: Wenn wir sagen, dass die Sonnenstrahlen ein Parallelbündel bilden, dann ist das wirklich gar nicht so falsch.

Sommer und Winter, woher kommt dieser große Unterschied?

In den Niederlanden und auch in Norddeutschland beträgt die mittlere Temperatur im Sommer ungefähr 17 Grad Celsius. Im Winter liegt sie kaum oberhalb des Gefrierpunktes, bei ca. 2 oder 3 Grad. Wie kommt es, dass der Unterschied so groß ist? Steht die Sonne im Winter vielleicht viel weiter weg? Nein, das ist nicht der Grund. Im Gegenteil, die Sonne steht im Januar sogar etwas weniger weit weg als im Juli.



Aber eigentlich ist die Frage verkehrt gestellt. Der Unterschied zwischen Sommer und Winter ist gar nicht so groß. Das sieht nur so aus, weil wir die Celsius-Skala benutzen, die einen ziemlich willkürlich gewählten Nullpunkt aufweist. Statt dessen müssen wir eigentlich schauen, wie hoch die Temperatur in Bezug auf den absoluten Nullpunkt ist: Dann ist der Unterschied viel kleiner: ungefähr 290 gegenüber 270 Kelvin.

Und jetzt müssten wir uns darüber wundern, dass der Unterschied so *klein* ist. Es ist nämlich nicht nur so, dass die Tage im Winter viel kürzer als im Sommer sind, sondern die Sonne steht auch noch viel niedriger. Und vor allem letzteres spielt eine große Rolle. Mitten im Winter steigt die Sonne kaum höher als 15 Grad über den Horizont. Wenn wir uns anschauen, was das für die horizontale Erdoberfläche bedeutet, dann stellt sich heraus, dass ein Sonnenbündel von einem Quadratmeter sich auf der Erde über vier Quadratmeter verteilt. Im Sommer, wenn die Sonne am höchsten steht, sind dies nur noch 1,1 Quadratmeter. Damit ist die Wintersonne am Boden ungefähr dreieinhalb Mal schwächer als die Sommersonne.

Außerdem steht die Sonne mitten im Winter halb so lang über dem Horizont wie mitten im Sommer. Insgesamt bedeutet dies, dass der Deutsche Boden am kürzesten Wintertag – um den 21. Dezember herum – nur ungefähr ein Siebtel der Sonnenenergie auffängt, die er am längsten Sommertag bekommt. Es ist in Wirklichkeit noch schlimmer, wenn wir bedenken, dass die Sonne bei einem sehr niedrigen Sonnenstand auch noch durch die viel dickere Luftschicht gedämpft wird, die sie durchdringen muss. Die allerniedrigsten Sonnenstände tragen somit so gut wie nichts zur Erwärmung bei. Alles in allem erhalten die Böden in Deutschland um den 21. Dezember herum kaum ein Zehntel der Sonnenenergie, die sie um den 21. Juni bekommen.

Es stellt sich somit die Frage: Warum ist der Unterschied zwischen Sommer und Winter dann nicht viel größer? Ein Teil der Antwort liegt in den ausgleichenden Effekten des warmen Golfstroms, der atmosphärischen Luftströme und der gesamten ‚Wettermaschine‘. Aber die wichtigste Ursache: Es gibt keine Zeit, um ins Gleichgewicht zu kommen. Das gilt insbesondere für Länder wie die Niederlande und Deutschland, die an der Nord- bzw. Ostsee liegen. Die See wirkt wie ein Puffer und weist eine sehr große Wärmeka-

pazität auf, wodurch Temperaturunterschiede gedämpft werden. Dadurch werden die Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter viel kleiner als beispielsweise in Mittelsibirien, das doch auf der gleichen geografischen Höhe liegt. Der trockene Boden dort erwärmt sich viel schneller und kühlt sich auch wieder viel schneller ab als unser Nordseewasser, das außerdem auch noch immer wieder durchmischt wird. Dadurch arbeiten auch die tieferen Schichten an der Pufferwirkung mit – dies ist beim meeresfernen Festland kaum der Fall. Dieses langsame ins Gleichgewicht Kommen sehen wir auch darin, dass die Jahreszeiten zeitlich gesehen ‚im Rückstand‘ sind. Die wärmsten Wochen im Sommer sind im Allgemeinen nicht die um den 21. Juni herum, wenn die Sonne ihren höchsten Stand erreicht, sondern gut einen Monat später. Die Situation im Winter ist analog dazu.

Alles in allem dürfen wir froh sein, dass sich die Erde so schnell um die Sonne dreht. Wenn sie dazu fünf Mal länger brauchen würde, dann hätten wir in den Niederlanden oder in Deutschland wirklich sibirische Zustände.

Warum laufen wir so, wie wir laufen?

Wir finden es normal, dass es jeder tut: Wenn wir spazieren gehen, schlenkern wir mit unseren Armen und Beinen gegenläufig. Wenn das linke Bein nach vorn geht, bewegen wir den linken Arm nach hinten – und rechts ist es genauso.

Warum tun wir das? Der Grund: Wir berücksichtigen unwillkürlich ein Naturkundegesetz: Der Drehimpuls-Betrag eines Körpers bleibt konstant, so lange keine Kräfte von außen darauf einwirken. Unsere Arme und Beine sind nicht an der Mitte des Rumpfes befestigt, sondern ein wenig seitlich. Wenn das rechte Bein nach vorn bewegt wird, muss es sich gegen die rechte Körperhälfte abstoßen. Diese wird nach hinten gedrückt, als ob wir ein Gewehr von der rechten Schulter aus betätigen. Daraus folgt, dass wir uns um unsere eigene Achse drehen wollen. Das vermeiden wir, indem wir gleichzeitig den rechten Arm nach hinten schlenkern, womit die Drehung kompensiert wird.

Aber es geht natürlich auch anders. Wir können den linken Arm und das linke Bein gleichzeitig nach vorn oder nach hinten schwin-

gen. Dann findet keine Kompensation statt, sondern die Drehung wird deutlich stärker. Das passiert bei jedem Schritt, und die Füße müssen dies jedes Mal auffangen, wenn sie den Boden berühren. So zu laufen ist somit nicht nur merkwürdig anzusehen, sondern ist auch noch sehr ineffizient.

In verstärktem Maße fällt uns dieses Phänomen auf, wenn wir unseren Partner mit einer Tasse Tee im Bett überraschen wollen. Wenn wir die Treppe mit einem Tablett in der Hand hinaufgehen, bewegen wir das Tablett unwillkürlich nach rechts und links, da wir ja die Arme zum natürlichen Schwingen nicht frei haben, und wenn wir nicht gut aufpassen, schwappt der Tee über den Rand.

Erfahrene Bowling-Spieler leiden ganz besonders unter diesem Problem, wenn sie ihre schweren Bowling-Bälle werfen. Aber sie haben eine ganz eigene Lösung gefunden. Genau in dem Moment, in dem sie ihren Ball lancieren, schwingen sie automatisch ihr freies Bein, um die Drehbewegung zu kompensieren. Hier sorgt das physikalische Gesetz für ein wenig sportliche Eleganz.

Experiment für Zuhause

Ein Gesetz mit einer unerwarteten Wendung

Wenn ein sich reibungslos drehender Bürostuhl oder Drehschemel vorhanden ist, können wir Zuhause anhand zweier Beispiele demonstrieren, wie es sich mit dem Gesetz zur Drehimpulserhaltung verhält.

1. Das erste ist eine einfache Illustration des Pirouetten-Effekts: Je mehr Masse wir zur Drehachse hin verschieben, desto mehr nimmt die Drehgeschwindigkeit zu. Wir bringen den Drehstuhl in den höchsten Stand (dann ist es einfacher, die Füße in der Luft zu behalten). Wir setzen uns auf den Stuhl, nehmen in jede Hand eine Flasche Wasser mit einem oder anderthalb Liter Inhalt. Wir strecken die Arme seitlich aus und fragen jemanden, ob er den Bürostuhl drehen kann. Nun halten wir die beiden Flaschen dicht an unsere Brust – oder noch besser auf unseren Kopf – damit diese so dicht wie möglich an der Rotationsachse sind. Die Drehgeschwindigkeit wird nun

steigen. Wenn es zu schnell wird, dann können wir ‚bremsen‘, indem wir die Arme wieder horizontal ausstrecken. Bei diesen Bewegungen bleibt die Summe der Impulse – der Drehimpulse – konstant. Diese hängt nämlich nicht nur von der Drehgeschwindigkeit, sondern auch von der Masseverteilung rund um die Drehachse ab.

2. Echt spektakulär wird es, wenn wir ein loses Rad von einem Fahrrad zur Hand haben, und zwar komplett mit Achse und Kugellagern. Ein normales Rad von einem Fahrrad oder ein Vorderrad von einem Mountainbike sind gut geeignet. Wenn noch ein Reifen darum vorhanden ist, umso besser. Es geht vor allem darum, dass an der Außenseite viel Masse vorhanden ist – eine schwere Felge ist also auch günstig. Ein Rad von einem Rennrad ist weniger geeignet. Wir montieren zwei Handgriffe an der Achse; dazu können wir zwei Metall-Kleiderbügel von der Reinigung benutzen. Das Rad lassen wir – anstelle in die Vorderradgabel - in die Ecken der Kleiderbügel gleiten und fixieren das Ganze gut. Die Kleiderbügel werden 90 Grad nach außen gebogen und zusammengeklappt, wie auf den Fotos zu sehen ist. Fertig! Wir machen uns die Tatsache zunutze, dass der Schwung nicht vollständig durch einen Zahlenwert charakterisiert wird. Auch die Richtung der Drehachse müssen wir kennen. Das Gesetz zur Drehimpulserhaltung bezieht sich auf das Ganze, also auch auf die Richtung der Achse.

Wir setzen uns nun auf den Drehstuhl und halten das Rad mit beiden Händen gut fest, wobei die Achse horizontal ausgerichtet ist. Jemand muss dabei das Rad tüchtig in eine drehende Bewegung versetzen. Jetzt kippen wir das drehende Rad so, dass die Achse in die vertikale Richtung zeigt. Dabei beobachten wir dass wir uns selbst auf dem Stuhl drehen! Kippen wir das Rad andersrum, drehen wir uns selbst auf dem Stuhl auch andersherum. Dieser verblüffende Effekt beruht auf der Drehimpulserhaltung: Wenn wir den Drehimpuls durch verkippen der Drehachse verändern, wird die dadurch entstehende Drehimpulsänderung kompensiert indem wir uns selbst auf dem Stuhl drehen.



Breite in der Drehbewegung die Arme mit den Wasserflaschen aus



Führe die Hände mit den Flaschen zum Kopf, und die Rotationsgeschwindigkeit nimmt zu.

Das Gesetz zur Drehimpulserhaltung in der Praxis. Oben der Pirouetten-Effekt, Unten ein überraschendes Experiment mit einem Rad eines Fahrrads.

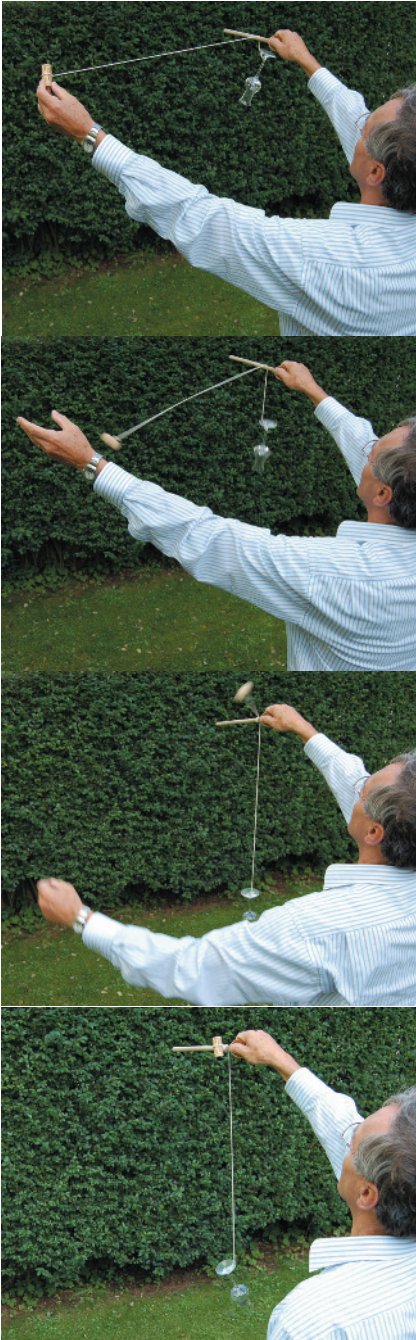


Experiment für Zuhause Tollkühnes Weinglas

Hier scheint es sich ja um die Tollkühnheit schlechthin zu handeln, wie die Fotos zeigen. Für das Experiment nehmen wir eine dünne Schnur von gut einem Meter, binden das eine Ende um den Stiel eines Weinglases und das andere um den Korken einer normalen Weinflasche.

Anschließend nehmen wir einen runden Stab von ca. 40 cm Länge (der Stiel eines Kochlöffels ist dazu bestens geeignet) und halten ihn mit der rechten Hand horizontal vor uns. Mit der linken Hand halten wir den Korken fest, lassen die Schnur mit dem Glas daran vertikal pendeln und ziehen die Schnur über den Stab so weit nach links, dass das Glas dicht unterhalb des Stabes hängt. Wir kündigen jetzt an, dass wir den Korken loslassen. Schade um das schöne Weinglas: So lautet – mit großer Sicherheit – die Reaktion der Zuschauer. Doch die Zuschauer haben die Rechnung ohne die Gesetze der Physik gemacht. Das Glas geht nämlich gar nicht kaputt, sondern kommt dadurch rechtzeitig zum Stillstand, dass sich das Ende der Schnur mit dem Korken daran um den Stock gewickelt hat. Es kann nicht schaden, das Ganze ein paar Mal über einem weichen Kissen zu üben, denn in seltenen Fällen kann es schiefgehen: Dann stößt der Korken genau gegen die Schnur und läuft nicht schnell genug daran entlang. Das Ganze ist eine nette Veranschaulichung des Satzes zur Drehimpulserhaltung. Der Korken fällt nämlich nicht nur in Richtung des Stabes, sondern auch nach unten und beginnt eine Drehbewegung um den Stab. Dadurch, dass sich die Schnur um den Stab windet, wird das freie Ende immer kürzer. Und jetzt lässt sich das Erhaltungsgesetz anwenden: Je kleiner die Drehungen sind, die der Korken beschreibt, desto schneller sind sie. Bevor das Glas auf dem Boden zerschellt, hängt der Korken fest! So liefert ein physikalisches Gesetz noch einen schönen Versuch für eine kleine Show.

Hinweis für diejenigen, die Scherben vermeiden möchten: Neigen Sie den Stab ein wenig zu sich hin und beginnen Sie am weit entfernten Ende. Hiermit wird das Risiko, dass der Korken genau gegen die Schnur schlägt, beträchtlich gesenkt.



Das tollkühne Weinglas als
Illustration für ein klassisches
physikalisches Gesetz.