

WILEY-VCH

Siegfried Hess

Opa, was macht ein Physiker?

Physik für
Jung und Alt



ERLEBNIS
wissenschaft



Inhaltsverzeichnis

[Über den Autor](#)

[Vorwort](#)

[1 Physik – was ist das?](#)

[2 Mechanik](#)

[2.1 Hebel](#)

[2.2 Auftrieb](#)

[2.3 Stabilität, Schwerpunkt](#)

[2.4 Fallgesetze](#)

[2.5 Pendel](#)

[2.6 Kurven, Graphen und Funktionen](#)

[2.7 Energie](#)

[2.8 Arbeit, Leistung](#)

[2.9 Masse, Trägheit, Impuls](#)

[2.10 Kraft, Bewegungsgleichung](#)

[2.11 Sonne und Planeten](#)

[2.12 Newton, Mond und Erde](#)

[2.13 Energie bei der Planetenbewegung](#)

[2.14 Kraft und Potential*](#)

[2.15 Drehimpuls](#)

[2.16 Laplace-Runge-Lenz-Vektor und Perihel-Drehung*](#)

[2.17 Rechnen mit Vektoren*](#)

[2.18 Vorhersage und Chaos](#)

[2.19 Zwangskräfte, d'Alembert, Lagrange I und Gauß*](#)
[2.20 Verallgemeinerte Koordinaten, Lagrange II*](#)
[2.21 Pendelbewegungen](#)
[2.22 Hamilton-Prinzip und Hamilton-Gleichungen*](#)
[2.23 Phasenraum, Liouville*](#)
[2.24 Bewegung in beschleunigten Bezugssystemen*](#)
[2.25 Kreisel, Euler*](#)
[2.26 Berechnung von Bewegungen*](#)
[2.27 Grenzen der Mechanik](#)
[2.28 Einheiten und Dimensionen*](#)
[2.29 Quadrat und Potenzen, große und kleine Zahlen](#)

[3 Quanten-Mechanik](#)

[3.1 Warum Quanten-Mechanik?](#)
[3.2 Planck, Einstein und die Quanten](#)
[3.3 Bohr, Sommerfeld: Atombau und Spektrallinien](#)
[3.4 Heisenbergs Unschärfe-Relation](#)
[3.5 Form und Stabilität des Wasserstoff-Atoms im Grundzustand](#)
[3.6 de Broglie, Schrödinger und Wellenfunktionen](#)
[3.7 Tunnel-Effekt](#)
[3.8 Drehimpuls und Spin, Stern-Gerlach-Experiment](#)
[3.9 Pauli, Atome und Periodensystem](#)
[3.10 Helium-Atom und Wasserstoff-Molekül](#)
[3.11 Wasserstoff-Isotope und Helium-Isotope](#)

- [3.12 Fermionen und Bosonen](#)
- [3.13 Strahlung und Auswahlregeln*](#)
- [3.14 Dirac und das relativistische Elektron*](#)
- [3.15 Erzeugung und Vernichtung von Teilchen*](#)
- [3.16 Was wäre, wenn an der Planck-Konstanten gedreht wird?](#)

[4 Erhaltungssätze und Symmetrien](#)

- [4.1 Der vermisste Autoschlüssel](#)
- [4.2 Wann gelten Erhaltungssätze?](#)
- [4.3 Das Noether-Theorem](#)
- [4.4 Translations-Invarianz](#)
- [4.5 Rotations-Invarianz](#)
- [4.6 Verschiebung des Zeit-Nullpunktes](#)
- [4.7 Paritäts-Operation und Paritäts-Invarianz](#)
- [4.8 Verletzung der Paritäts-Invarianz und Pauli](#)
- [4.9 Zeitumkehr-Invarianz](#)

[5 Verstehen](#)

[Anhang](#)

- [A.1 Teekessel](#)
- [A.2 Physiker und Mathematiker, Astronomen, Chemiker und Ingenieure](#)

[Bildnachweis](#)

[Nachwort](#)

Dank

Stichwortverzeichnis

Weitere Titel, die Sie interessieren könnten:

Full, Roland

Vom Urknall zum Gummibärchen

2014

ISBN: 978-3-527-33601-2

Zankl, Heinrich / Betz, Katja

Trotzdem genial

Darwin, Nietzsche, Hawking und Co.

2014

ISBN: 978-3-527-33410-0

Groß, Michael

Invasion der Waschbären

und andere Expeditionen in die wilde Natur

2014

ISBN: 978-3-527-33668-5

Hermans, Jo

Im Dunkeln hört man besser?

Alltag in 78 Fragen und Antworten

2014

ISBN: 978-3-527-33701-9

Lindenzweig, Wilfried H.

Wissen macht schlau

Große Themen leicht erzählt

2014

ISBN: 978-3-527-33750-7

Oreskes, Naomi / Conway, Erik M.

Die Machiavellis der Wissenschaft

Das Netzwerk des Leugnens

2014

ISBN: 978-3-527-41211-2

Iván Egry

Physik des Golfspiels

Mit Newton zum Tee

2014

ISBN: 978-3-527-41254-9

Krause, Michael

**Wo Menschen und Teilchen
aufeinanderstoßen**

Begegnungen am CERN

2013

ISBN: 978-3-527-33398-1

Naeser, Thorsten

**Ultraschneller Tauchgang in die Atome
Attosekunden-Blitze erkunden den
Quantenkosmos**

2013

ISBN: 978-3-527-41125-2

Hüfner, Jörg / Löhken, Rudolf

Physik ohne Ende

**Eine geführte Tour von Kopernikus bis
Hawking**

2012

ISBN: 978-3-527-41017-0

Siegfried Hess

Opa, was macht ein Physiker?

Physik für Jung und Alt

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor**Siegfried Hess**

Technische Universität Berlin, EW 7-1

Institut für Theoretische Physik

Hardenbergstr. 36

10623 Berlin

Deutschland

Titelbild

© byheaven - [Fotolia.com](https://www.fotolia.com)

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2014 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim,
Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-527-41263-1

ePDF ISBN 978-3-527-67940-9

ePub ISBN 978-3-527-67938-6

Mobi ISBN 978-3-527-67939-3

Über den Autor



Siegfried Hess studierte Mathematik und Physik an der Universität Erlangen- Nürnberg, schloss das Studium mit dem Diplom in Physik 1964 ab, danach war er ein Jahr in den USA, die Promotion erfolgte 1967 in Erlangen, anschließend war er als Post doc In Leiden, Holland, um sich 1970 in Erlangen für Physik zu habilitieren. Er war Professor für Theoretische Physik in Erlangen und von 1984 bis 2007 Inhaber des Lehrstuhls für Statistische Physik und Transporttheorie am Institut für Theoretische Physik der Technischen Universität Berlin. Siegfried Hess war zu Forschungsaufenthalten und als Gastprofessor an Forschungsinstituten und Universitäten in den USA, Kanada, Holland, Frankreich und Australien.

Im Kurs Theoretischer Physik hielt er in Erlangen und Berlin die Vorlesungen »Mechanik«, »Quanten-Mechanik«, »Elektrodynamik und Optik«, »Thermodynamik und Statistische Physik«. Daneben bot er forschungsorientierte Vorlesungen an, die engen Bezug zu aktuellen theoretischen und experimentellen Untersuchungen der Physik der

Kondensierten Materie hatten. Über seine Forschungen zur Erklärung der Materialeigenschaften von Gasen, Flüssigkeiten, Flüssigkristallen und Festkörpern aus den Eigenschaften der Atome und Moleküle und ihrer Wechselwirkung untereinander sind mehr als 250 Publikationen erschienen.

Diese Forschungsarbeiten, Rechnungen mit Bleistift und Papier, numerische Berechnungen und Computer-Simulationen, sowie Experimente zur Licht- und Neutronen-Streuung, zu Optik und Nicht-Gleichgewichts-Phänomenen sind meistens gemeinsam mit Diplomanden, Doktoranden, wissenschaftlichen Mitarbeitern und Kollegen durchgeführt worden. Auf den daraus resultierenden Veröffentlichungen stehen die Namen von mehr als 100 Koautoren aus 20 Ländern.

Siegfried Hess hat sowohl als Projektleiter, als auch als Gutachter bei nationalen und internationalen Forschungs-Kooperationen mitgewirkt. Daran waren neben Physikern auch Chemiker, Mathematiker und Ingenieure beteiligt. Er erlebte, wie wichtig es ist, bei der Behandlung wissenschaftlicher Probleme eine über die Fachgrenzen hinweg reichende, gemeinsame Sprache zu finden. Mit seinen Kindern und Enkelkindern sprach und spricht er gerne über Physik.

Seine Geschichten zur Mechanik und Quanten-Mechanik sind hier zu finden.

Von Opa gewidmet den Enkelkindern
Rita, Lea, Jonas, Francis und Killian

Vorwort

»Opa, was macht ein Physiker?«

»Opa, was erzählst du eigentlich den Studenten in deinen Vorlesungen?«

Diese Fragen stellten Enkelkinder mir, einem Physik-Professor an der Technischen Universität Berlin. Mit Vorlesungen ist der viersemestrige Kurs in Theoretischer Physik gemeint: Mechanik, Quanten-Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik und Statistische Physik.

»Opa, erzähl uns die Physik!«

Ich begann zu erzählen, Geschichten und Fakten. Bald kam die Frage:

»Opa, kannst du das nicht aufschreiben, eine Physik für Kinder?«

»Ja«, war meine Antwort. Wir wollen hier beginnen mit der Mechanik, dabei am Anfang auch einiges behandeln, was in der Mechanik-Vorlesung schon als bekannt vorausgesetzt wird. Wir wollen etwas lernen über die Quanten-Mechanik, über die Kinder sich vielleicht weniger wundern als viele Erwachsene. Natürlich musste Opa über manches, was in den Vorlesungen an der Tafel erläutert und vorgerechnet wird, neu nachdenken. Ergebnisse von Experimenten und Theorien sollen vermittelt werden, Zusammenhänge sollen aufgezeigt und Verständnis geweckt werden.

Es ist die Absicht, die »richtige« Physik so mitzuteilen, wie sie Kindern erzählt werden kann. Teile des Textes wurden mit 10- bis 15-jährigen Enkelkindern getestet. Gelegentlich kam beim Vorlesen die Bemerkung: »Opa, hier musst du aber noch üben«. Dies war hilfreich. Ein Buch kann neugierig machen und auch mehrmals »befragt« werden.

Im geschriebenen Text soll ein Gefühl für Zahlen und physikalische Einheiten vermittelt werden, also nicht nur

Geschichten, sondern dazwischen auch Fakten und Zahlen. Auch der Inhalt von Gleichungen kann in Worten verständlich gemacht werden. Aus Erfahrungen weiß ich, bei Kindern braucht man keine Scheu zu haben vor Fremdwörtern und Fachausdrücken. In Spielen, in Fantasie-Geschichten und Filmen kommen noch exotischere Ausdrücke vor, die bereitwillig akzeptiert und auch gelernt werden. Im Alter von 13 oder 14 Jahren habe ich das Buch *Evolution der Physik* von Albert Einstein und Leopold Infeld in die Hand bekommen und habe versucht darin zu lesen. Es war nicht für Kinder geschrieben, aber ohne jenes Buch wäre ich wahrscheinlich nicht Physiker geworden. Dieses Buch ist für Kinder gedacht, aber nicht kindlich gemacht. Nicht alles kann beim ersten Hören und Lesen verstanden werden, also: Nach-Lesen und Nach-Denken.

Beim Schreiben habe ich oft überlegt, was könnte in einem Hör-Buch erzählt werden. Ein Lese-Buch braucht Abbildungen. Es sind dies grafische Darstellungen und die von Enkelkindern und mir gefertigten Zeichnungen und Skizzen sowie Bilder von Physikern. Die Zeichnungen von Rita sind über mehrere Jahre hinweg entstanden, im Alter von 12 bis 15 Jahren. Technische und künstlerische Fähigkeiten haben sich dabei weiter entwickelt.

Ich habe die Hoffnung, dass die von Opa erzählte Kinderphysik auch für Studierende der Physik interessant ist, die ihrer Oma oder ihren nicht-physikalischen Kolleginnen und Kollegen erklären wollen, was sie eigentlich lernen. Selbst bei Prüfungen an der Universität ist es gut und nützlich, wenn man das Wesentliche der Physik in einfachen Worten ausdrücken kann.

Beim ersten Durchlesen können die Kapitel mit dem Stern (*) übersprungen werden. Gleiches gilt für die Formeln. In einer frühen Version des Manuskriptes waren Gleichungen nur in Worten formuliert. Von kritischen Lesern bekam ich Anmerkungen, die von »endlich ein Physik-Buch ohne

Formeln« bis zu »Formeln müssen sein, denn daran kann man sich gar nicht früh genug gewöhnen« reichen. Formeln sind behutsam eingefügt, und zwar so, dass das Buch auch ohne Formeln gelesen werden kann. Dem wohlinformierten Leser, der von vorne bis hinten liest, werden viele Wiederholungen auffallen. Wiederholungen sind durchaus beabsichtigt. Wiederholungen erleichtern es auch, in einzelne Kapitel des Buches hineinzuspringen.

Nicht alles muss gleich verstanden werden. Und es gibt Dinge, die wohl kaum zu verstehen sind, die man aber doch wissen sollte. Am Ende des Buches steht noch ein Kapitel über das Verstehen, was ist das eigentlich? Eine Liste von Teekesseln, Worten mit zwei oder mehreren Bedeutungen und eine Liste mit den Lebensdaten von den im Text genannten Physikern, Mathematikern, Astronomen, Chemikern und Ingenieuren, sind angefügt.

Berlin, Mai 2014

Siegfried Hess

1

Physik - was ist das?

»Was ist Physik?« Auf diese Frage antwortete vor über 100 Jahren der Physiker Ludwig Boltzmann: »Physik ist die Mutter der Naturwissenschaften, welche den mathematischen Disziplinen die Nahrung, den speziellen Wissenschaften die Gesetze gibt.«

Klingt merkwürdig. Nun, Boltzmann meint, mit Physik kann man rechnen, und die Physik bestimmt, was wir in der Natur beobachten, bei Spiel und Sport machen können und was in der Technik möglich ist. Wenn ein Löffel vom Tisch nach unten zum Boden fällt, wenn ein gasgefüllter Ballon hochsteigt, eine Bananenflanke beim Fußballspiel ins Tor geht, wenn Wasser zu Eis gefriert, wenn wir einen Regenbogen sehen, wenn mit einem Schalter Licht ein- und auch wieder ausgeschaltet wird, wenn Elektromotoren in der Lokomotive einen Zug antreiben, wenn ein Flugzeug fliegt, wenn Klavier, Geige, Gitarre, Flöte oder Trompete schöne Töne erzeugen, ist all dies geregelt und bestimmt durch die Gesetze der Physik. Auch Menschen machen Regeln, erlassen Vorschriften und Gesetze. Bei Rot sollst du nicht über die Straße gehen. Und trotzdem hast du schon Leute gesehen, die dies tun. Du und deine Mitspieler kennen die Regeln eines Spiels. Und trotzdem gibt es manchmal Spieler, die mogeln. Die Gesetze der Physik sind anders. Sie gelten und niemand kann sie durch Mogeln umgehen. Die Gesetze der Physik sind auch nicht, wie die Regeln eines Spiels, von Menschen gemacht. Die Gesetze der Physik sind eben einfach »da«, manche sagen, sie sind »von Gott gegeben«. Aber die Menschen, die Forscher, die man

Physiker nennt, haben über lange Zeit durch Nachdenken, Beobachten und Experimentieren und wieder Nachdenken die Gesetze der Physik entdeckt, erforscht und aufgeschrieben. Das Aufschreiben geschieht nicht nur mit Worten, sondern auch mit mathematischen Gleichungen. Wenn man diese Gleichungen kennt und gut rechnen kann, mit Bleistift und Papier und mit einem Computer, kann man Vorgänge in der Natur bei Spiel und Technik vorhersagen. Aber Vorsicht, nicht alles können wir berechnen. Die Gesetze der Physik gelten auch für das Wetter. Trotzdem kann noch niemand das Wetter in einem Monat oder gar in einem Jahr vorhersagen.

Physiker wollen auch, wie der Dichter Johann Wolfgang von Goethe sagte, »erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält«. Du weißt, wenn du aus Lego-Steinen ein Haus oder ein Auto baust, dann ist das Haus oder das Auto aus Lego-Steinen aufgebaut. Und du siehst die Bausteine. Nun stell dir vor, du schaust vom Balkon eines Hochhauses nach unten und siehst ein Kind mit einem Lego-Auto, die Bausteine kannst du aber nicht mehr sehen. Trotzdem sind sie natürlich noch da, sonst gäbe es das Lego-Auto ja nicht. Ähnlich ist es mit der Luft, dem Wasser, den Steinen und allen Dingen, die uns umgeben. Sie bestehen aus »Bausteinen« oder Teilchen, die man »Atome« und »Moleküle« nennt. Diese Teilchen sind eben so klein, dass wir sie mit unseren Augen nicht sehen können, auch wenn wir ganz nahe sind. Auch wir bestehen aus Atomen und Molekülen. Es gibt verschiedene Atome, so wie du verschiedene Lego-Bausteine hast. Moleküle bestehen aus zwei oder mehreren Atomen, die in enger Verbindung sich gegenseitig festhalten. Atome sind nicht unteilbar, wie man lange geglaubt hat. Sie bestehen aus viel, viel kleineren Teilchen, dem Atomkern und den Elektronen. Der Atomkern besteht aus Teilchen, die man Protonen und Neutronen nennt. Und auch diese sind aus noch kleineren Teilchen

zusammengesetzt. Ein Physiker, der dies nicht glauben wollte, sagte wohl »so ein Quark«. Und so nennt man diese kleinsten Teilchen »Quarks«. Woher weiß man all dies? Physiker haben nachgedacht und geraten, haben Experimente ersonnen und Geräte gebaut, mit denen man Teilchen aufspürt, verfolgt und einfängt, die man mit den Augen nicht sehen kann.

Wenn die Sonne scheint, ist es hell. Das Licht kommt von der Sonne zu uns. Wenn wir im Sonnenschein stehen, wird uns warm. Die Sonne sendet auch Strahlung zu uns, die wir nicht sehen, aber als Wärme spüren. Solche Wärmestrahlung empfinden wir auch in der Nähe einer Heizung oder eines heißen Ofens. Unsichtbare Strahlung geht auch von Radio- und Fernsehsendern aus und bringt das, was wir an Radio- und Fernsehgeräten hören und sehen können. Die Gesetze der Physik gelten auch für die Entstehung und Ausbreitung der sichtbaren und unsichtbaren Strahlung. Man muss sie kennen, um die Farben des Regenbogens zu verstehen, um Mikroskope und Fernrohre, Radio- und Fernsehempfänger bauen zu können. Die Gesetze der Physik regeln, wie Teilchen sich miteinander verhalten und wie sie auf Strahlung reagieren.

Es ist eine spannende Geschichte wie über viele, viele Jahre, in der Zeit deiner Eltern, Großeltern und davor, die Gesetze der Physik gefunden und angewendet wurden. Noch immer gibt es ungeklärte Probleme, die vielleicht du oder erst deine Kinder werden lösen können.

2

Mechanik

Himmlische, irdische und höllische Mechanik Die Physik beginnen wir mit der Mechanik. Man teilt sie ein in *himmlische*, *irdische* und *höllische Mechanik* erklärt die Bewegung der Erde um die Sonne sowie des Mondes um die Erde. Die irdische Mechanik beschäftigt sich mit der Mechanik auf der Erde, mit Hebeln und mit Stangen, mit Rädern und Maschinen, mit dem Schwimmen und dem Fliegen und mit der Reibung, die Bewegungen, wie wir sie beobachten, bremst und schließlich zur Ruhe bringt. Doch was ist die höllische Mechanik? Nein, die Physik-Prüfungen in der Schule sind nicht gemeint, sondern der Flug und die Wirkung von Kanonenkugeln und anderen Geschossen.

2.1 Hebel

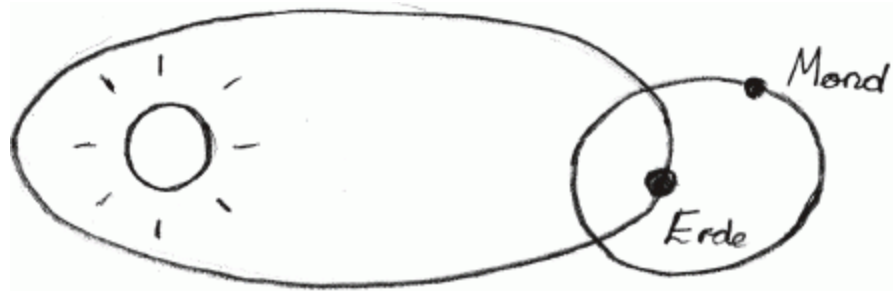
Ihr habt die großen Steine gesehen, die Menschen vor Tausenden von Jahren aufgestellt haben. Diese Steine, die man Menhire nennt, mussten bewegt und transportiert werden. Und Obelix konnte ja nicht überall helfen. Wie haben die Menschen damals, ohne Bagger und Kräne, schwere Steine angehoben und bewegt? Sie verwendeten *Hebel*.

Mit einem Hebel kannst Du einen Gegenstand anheben, der viel schwerer ist als du.

Schaukeln auf einer Wippe Denk dir, du baust mit Freunden eine Schaukel, oder vielmehr eine Wippe: Einen

Balken legt ihr auf einen am Boden liegenden Baumstamm, sodass der Baumstamm in der Mitte ist. Auf jedes Ende des Balkens setzt sich ein Kind, und lustig wird gewippt ([Abb. 2.2](#)). Was macht ihr, wenn ihr zu dritt seid und alle gleichzeitig schaukeln wollen? Auf einer Seite zwei Kinder! Das eine Kind ist in der Luft, die beiden anderen sitzen am Boden. Was ist zu tun? Steigt ab und verschiebt den Balken so, dass er auf der eine Seite des Baumstamms doppelt so lang ist wie auf der anderen. Das eine Kind setzt sich auf den längeren Teil des Balkens, die beiden anderen auf den kürzeren. Die Wippe funktioniert wieder. Und nun wisst ihr auch, was ihr machen könnt, wenn Opa kommt und mitspielen möchte. Ihr verschiebt den Balken so, dass er auf der einen Seite vier mal länger ist als auf der anderen ([Abb. 2.3](#)). »Opa, setz dich auf den kurzen Teil des Balkens! Wir können dich hochheben!« Und siehe da, jedes der Kinder kann alleine Opa anheben, obwohl er ja viel schwerer ist als die Kinder.

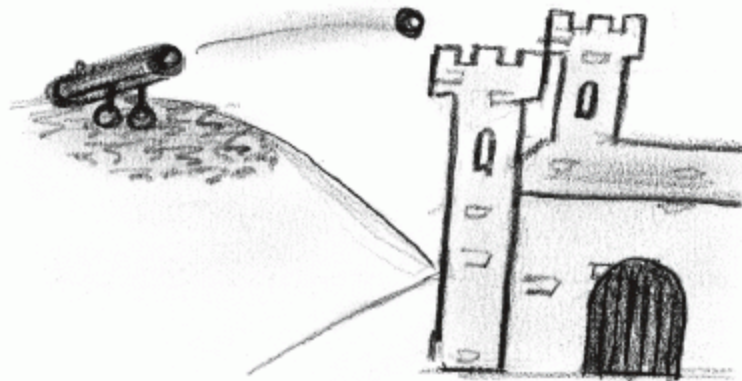
Abb. 2.1 Himmlische, irdische und höllische Mechanik.



himmlische Mechanik



irdische Mechanik



höllische Mechanik

Abb. 2.2 Zwei Kinder auf der Wippe.

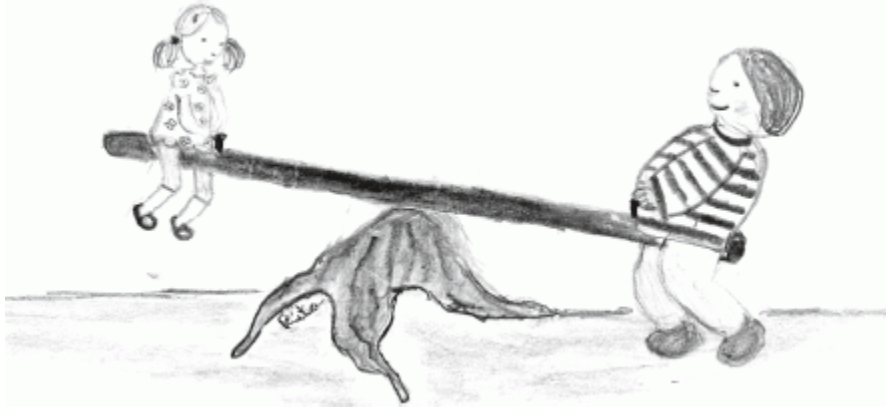
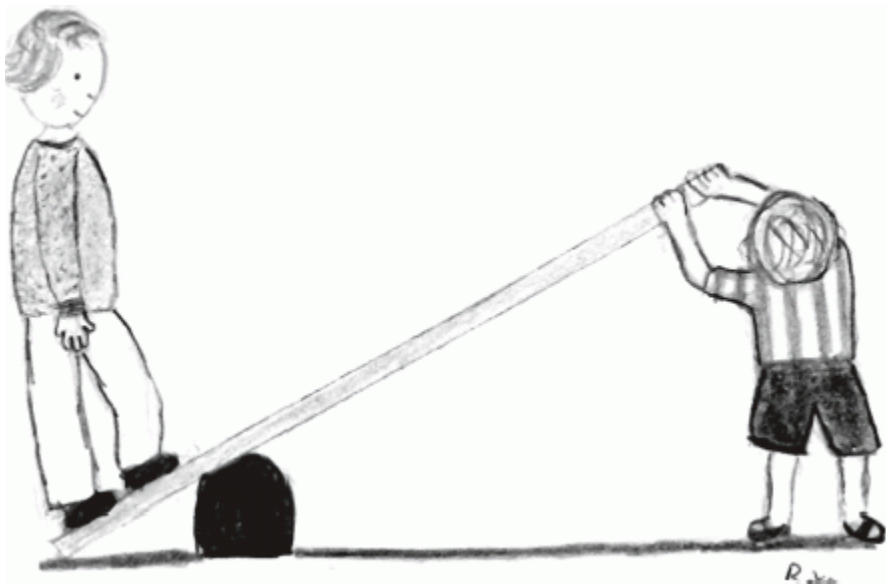


Abb. 2.3 Ein Kind hebt Opa hoch.



Das Hebelgesetz, die alten Ägypter und Archimedes
 Der Balken ist euer Hebel. Ihr könnt euch nun auch vorstellen, wie Menschen mit einem Hebel einen schweren Stein auf einer Seite so hoch anheben, dass sie einen runden, glatten Baumstamm unter den Stein schieben können. Das Gleiche auf der anderen Seite des Steins, noch einen runden Baumstamm in der Mitte unter den Stein, und schon kann der Stein gerollt und weiter bewegt werden. Den Hebel haben vor über viertausend Jahren die Ägypter benutzt, um die großen Steine zum Bau der Pyramiden zu bewegen und anzuheben. Wie ein Hebel funktioniert, hat vor über zweitausend Jahren der griechische Forscher Archime-

des, er lebte in der Stadt Syracus in Sizilien, genauer ausprobiert und aufgeschrieben. Dieses Gesetz der Physik, genannt Hebelgesetz, hast du ja schon verstanden. Es muss nur noch besser mit Worten so gesagt werden, dass man es auch durch Messen nachprüfen kann. Die beiden Seiten des Balkens, links und rechts der Auflage, nennt man *Hebelarme*. Die Länge der beiden Hebelarme kann man mit einem Maßstab messen, zum Beispiel in Meter und Zentimeter. Die Kinder, die sich auf die Enden des Balkens setzen, kann man wiegen, das Gewicht in Kilogramm bestimmen. Sitzen zwei gleich schwere Kinder auf dem Balken, so können sie auf beiden Seiten über dem Boden schweben, wenn beide Hebelarme gleich lang sind. Wie bei einer Waage. Ist ein Kind doppelt so schwer wie das andere, so muss ein Hebelarm doppelt so lang sein wie der andere. Das leichtere Kind setzt sich auf den längeren Hebelarm. Wieder wird der Balken waagerecht, eben wie bei einer Balkenwaage. Man sagt, beide Seiten sind im *Gleichgewicht*. Gibst du einem der Kinder ein zusätzliches Gewicht in die Hand, zum Beispiel eine Trinkflasche, so wird auf dieser Seite der Balken nach unten gehen. Die Balkenwaage funktioniert natürlich auch mit Gewichten, nicht nur mit Kindern.

Das Hebelgesetz besagt: Ist ein Gewicht zwei-, drei-, viermal ... größer als das andere, so muss ein Hebelarm zwei-, drei-, viermal ... größer sein als der andere, damit Gleichgewicht herrscht, damit der Balken waagerecht ist.

Könnte Archimedes die Erde mit einem Hebel hochheben? Ihr wisst inzwischen, das größere Gewicht gehört auf den kürzeren Hebelarm. Und wenn man einen ganz, ganz langen und festen Hebel hat, kann man ein ganz großes Gewicht anheben. Deshalb sagte Archimedes: »Gebt mir einen festen Punkt, am besten eine zweite Erde, und

einen langen Hebel, dann hebe ich die Erde hoch.« Das geht natürlich nicht. Aber das Hebelgesetz gilt. Man kann es auch so sagen:

Im Gleichgewicht, bei waagerechtem Balken, muss Gewicht mal Hebelarm auf der einen Seite gleich Gewicht mal Hebelarm auf der anderen Seite sein.

Damit kann man rechnen. Probiert aus, wie lang der zweite Hebelarm sein muss, wenn ihr die beiden Gewichte kennt – zum Beispiel 10 und 25 kg – und ein Hebelarm z. B. 1m lang ist. Beachtet, es gibt zwei Lösungen, je nachdem, ob der Hebelarm mit einem Meter der kürzere oder der längere sein soll.

Woher wissen wir, wie Archimedes aussah? Das wissen wir nicht. Ein Künstler hat sich ein Denkmal für Archimedes ausgedacht und angefertigt, es steht im Garten einer Sternwarte in Berlin. Rita hat Archimedes dorthin gesetzt, wo er vor über zweitausend Jahren in den Sand gezeichnet haben soll ([Abb. 2.4](#)).

2.2 Auftrieb

Welcher feste Körper schwimmt im Wasser?

Archimedes hat noch ein anderes Gesetz der Physik erforscht und aufgeschrieben. Dies gilt für den *Auftrieb* im Wasser. Wenn du zum Schwimmen gehst und an einer Stelle im Wasser stehst, wo du gerade noch den Boden berührst, denkst du beim Hüpfen, du seiest viel leichter geworden. Das Wasser scheint dich nach oben zu treiben, dies ist der Auftrieb. Als du ins Wasser gegangen bist, ist der Wasserspiegel ein wenig angestiegen, weil du eben Platz brauchst und das Wasser verdrängst. Im Schwimmbad kannst du dies wohl nicht feststellen, in der Badewanne kannst du aber sehr wohl beobachten, dass du Wasser verdrängst. Das Wasser, das du verdrängt hast, hat auch ein

Gewicht. Je nachdem, wie groß du bist oder wie tief du ins Wasser steigst, können dies zehn, zwanzig oder mehr Liter und damit zehn, zwanzig oder mehr Kilogramm sein, denn ein Liter Wasser wiegt ein Kilogramm. Und um das Gewicht des verdrängten Wassers wird dein Gewicht im Wasser kleiner. Archimedes hat dies so gesagt: »Das Gewicht eines Körpers, der ins Wasser eintaucht, wird kleiner um das Gewicht des Wassers, das er verdrängt hat.« Mit »Körper« ist hier jeder feste Gegenstand gemeint. Du kennst Gegenstände, die schwimmen, wie Holz, und andere, die im Wasser untergehen, wie Steine oder Eisen. Man sagt, »ein Gegenstand, der schwimmt, ist leichter als Wasser.« Dies ist so eigentlich nicht richtig, es sollte heißen: »Ein Gegenstand, der schwimmt, ist leichter als das Wasser, welches er verdrängt.« Holz taucht eben nur so tief ins Wasser ein, bis das Gewicht des verdrängten Wassers so groß ist wie das Gewicht des Holzes. Um genauer festzulegen, ob ein Gegenstand schwerer oder leichter als Wasser ist, muss man ein bestimmtes Volumen des Materials, aus dem der Gegenstand besteht, mit dem gleichen Volumen des Wassers vergleichen. Als Volumen kannst du dir leicht einen Würfel mit der Kantenlänge von einem Zentimeter vorstellen. Ein solcher Würfel aus Wasser wiegt ein Gramm, aus Eis ist er ein bisschen leichter. Anstatt ein Gramm schreiben wir 1 g. Ein Würfel aus Tannenholz wiegt 0,8 g, aus Aluminium 3 g, aus Eisen 8 g, aus Kupfer 9 g, aus Silber 10 g, aus Gold 19 g. Das Gewicht eines Körpers dividiert durch sein Volumen ist die *Dichte*. Der Zahlenwert, angegeben in Gramm pro Kubikzentimeter, ist gleich dem Gewicht eines solchen Würfels, dividiert durch das Gewicht von einem Kubikzentimeter Wasser. Dies ist die *relative Dichte*. Die relative Dichte von Wasser ist 1, die von Tannenholz ist 0,8, von Aluminium, Eisen, Silber und Gold sind es 3,8, 9,10,19. Wir können nun genauer sagen:

Abb. 2.4 Archimedes zeichnet in den Sand vor Syrakus. Rita hat Archimedes nicht gesehen, aber sie hatte ein von Gerhard Thieme gefertigtes Denkmal als Vorbild. Dort sitzt Archimedes auf einem Stein im Garten der Archenhold Sternwarte in Berlin-Treptow.



Ein fester Körper schwimmt im Wasser, wenn seine relative Dichte kleiner als 1 ist.

Ist des Königs Krone aus reinem Gold? Archimedes hat sein Getz vom Auftrieb benutzt, um seinem König die Antwort auf die Frage »Ist meine Krone aus reinem Gold?« geben zu können. Wie geht das? Er wog die Krone in Luft, und dann noch einmal voll im Wasser eingetaucht, wo das Gewicht ja um den Auftrieb verringert ist. Aus der Differenz, dem Unterschied der beiden Gewichte, weiß man das Gewicht des verdrängten Wassers. Teilt man nun das Gewicht in Luft durch die Differenz der Gewichte, so ergibt

sich die *relative Dichte* des Materials der Krone. Und Archimedes fand, sie war kleiner als die von Gold. Bei der Herstellung der Krone war wohl dem Gold das weniger wertvolle Silber, oder vielleicht auch Kupfer, beigemischt worden. Auch heute wird ein goldener Ring oder ein goldenes Armband nicht aus reinem Gold gefertigt, reines Gold wäre für Schmuck zu weich. Besorgt euch eine kleine Federwaage zum Wiegen des Gegenstandes in Luft und im Wasser. Dann könnt ihr nach dem Prinzip von Archimedes auch feststellen, ob eine Kette oder ein Armband eurer Mutter aus reinem Gold ist. Aber Vorsicht! Bitte versucht dies nicht bei einer goldenen Uhr!

Woher kommt der Auftrieb? Lea hat eine gute Frage gestellt: »Woher kommt denn eigentlich der Auftrieb?« Du weißt, was auch Taucher wissen und spüren: Im Wasser wird der Druck immer größer, je tiefer ein Taucher taucht. Das Gewicht des Wassers oberhalb des Tauchers drückt auf das Wasser darunter. In 10 m Tiefe ergibt das Gewicht des Wassers einen zusätzlichen Druck, der so groß ist wie der Luftdruck an der Wasseroberfläche. In 10 m Tiefe ist damit der Druck zweimal so groß, in 20 m Tiefe dann eben dreimal so groß wie an der Wasseroberfläche. In 1 m Tiefe ist der zusätzliche Druck des Wassers nur ein Zehntel des Drucks an der Wasseroberfläche. Du kannst ein Stück Holz in die Hand nehmen und ganz ins Wasser eintauchen. Du spürst eine nach oben gerichtete Kraft, das ist der Auftrieb. Wie geht das zu? Auf die Oberfläche des Holzes, wie eines jeden festen Körpers, der ins Wasser eintaucht, übt der Druck eine Kraft aus. Diese Kraft steht immer senkrecht zur Oberfläche und zeigt in den Körper hinein. An der Oberseite des Körpers wirkt die Kraft nach unten, an der Unterseite nach oben. An der rechten Seite des Körpers wirkt die Kraft nach links, an der linken Seite nach rechts. Die Kräfte links und rechts, auf gleicher Wassertiefe sind gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet. Die Kräfte links und rechts heben sich gegenseitig

auf und können den Körper nicht seitwärts bewegen. Aber unten ist der Druck größer als oben. Die Kraft, die von unten nach oben drückt ist größer als die von oben nach unten. Daraus entsteht eine gesamte Kraft, die nach oben zeigt. Dies ist der Auftrieb. Damit haben wir die Richtung der Auftriebskraft verstanden, aber noch nicht bewiesen, wie groß der Auftrieb ist. Es hat weit über 2000 Jahre gedauert, bis bewiesen werden konnte, dass Archimedes recht hatte: Der Auftrieb ist so groß wie das Gewicht der vom Körper verdrängten Flüssigkeit, nur eben von unten nach oben gerichtet. Für den Beweis braucht man das Gesetz der Impulserhaltung und etwas Mathematik, die Carl Friedrich Gauß erfunden hat.

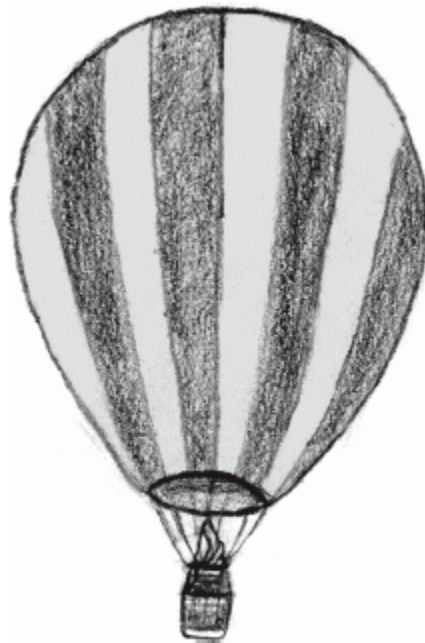
Warum steigen manche Ballone hoch in die Luft?

Auftrieb gibt es auch in der Luft. Luft ist aber tausendmal leichter als Wasser. In 10 m Wassertiefe ist der zusätzliche Druck so groß ist wie der Luftdruck am Boden. Du könntest rechnen: Die Luft über dem Boden muss tausendmal zehn Meter, also zehn Kilometer hoch sein, damit der gleiche Druck entsteht. Es gibt aber auch noch Luft oberhalb von zehn Kilometer Höhe. Wie kann das sein? Du weißt, der Luftdruck ist auf einem Berg kleiner als im Tal. Höhenmesser benutzen dieses Prinzip. In großer Höhe wird die Luft dünner. Die Dichte der Luft ist weiter oben kleiner als am Boden. Deshalb reicht die Luft, die unten am Boden den hier gemessenen Luftdruck erzeugt, eben weiter nach oben als zehn Kilometer.

Auch Luft hat ein Gewicht, nur ist Luft tausendmal leichter als Wasser, bei gleichem Volumen. Ein Kubikmeter Luft, dies ist ein Würfel mit der Kantenlänge von einem Meter, wiegt ein Kilogramm, abgekürzt 1 kg, also so viel wie ein Liter Wasser. Ein Liter Luft wiegt ein Gramm. Natürlich gibt es auch einen Auftrieb in der Luft, nur merken wir ihn nicht, weil wir natürlich nicht in einem luftleeren Raum wiegen wollen. Der Auftrieb in Luft ist auch recht klein. Wie klein ist

klein? Wir können rechnen. Die relative Dichte unseres Körpers ist nur ein klein wenig größer als 1. Ein Kind, das 30 kg wiegt hat also ein Volumen von etwa 30 l. Soviel Luft verdrängt sein Körper, und diese Luft wiegt 30 g. Einen Auftrieb von 30 g kann man nicht spüren. Den Auftrieb in der Luft hast du aber schon beobachtet. Ein Luftballon, gefüllt mit dem richtigen Gas, steigt nach oben. Das Gas ist Helium und dieses ist leichter als Luft. Der Ballon steigt auf, weil er, mit Helium gefüllt, leichter ist als die Luft, die er verdrängt. Du hast auch schon große Heißluftballone gesehen ([Abb. 2.5](#)). Heiße Luft dehnt sich aus, man sagt, sie wird dünner. Heiße Luft ist leichter als kalte Luft. Der Auftrieb des Heißluftballons trägt Personen im Ballonkorb nach oben und sie können mit dem Ballon fahren. Der Ballon sinkt nach unten, wenn die Luft im Inneren nicht mehr heiß genug ist.

Abb. 2.5 Heißluftballon.



Warum schwimmt ein Schiff aus Eisen? Ein Stück Eisen versinkt im Wasser. Trotzdem schwimmt ein Schiff aus Eisen, denn es ist hohl. Das Gewicht des von ihm verdrängten Wassers ist genau so groß wie das Gewicht des