

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 4

ISBN 3 - 7896 - 0588 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 1998

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

K.-H. Lotze

Die Auseinandersetzung der Fachdidaktik mit neuen Erkenntnissen in der Physik am Beispiel der Gravitation

1 Vorbemerkung

Während sich bis zum Ende ihrer Schulzeit Fehlvorstellungen etwa über den Zusammenhang von Kraft und Bewegung sowie Schwerelosigkeit und Gezeiten hartnäckig halten, stellen Schüler schon sehr früh Fragen über das Weltall, die Schwarzen Löcher usw.. Antworten darauf lassen sich aber nur dann in das Wissen der Schüler integrieren, wenn die elementaren Fehlvorstellungen sinnvolles Lernen nicht weiter behindern.

Der Lehrende muß sich daher zunächst darüber klar werden, welche didaktischen Konsequenzen sich aus einer organischen Verbindung von klassischer und moderner Physik ergeben. Im Klassenzimmer können ihm dabei die komplizierten Formeln der Relativitätstheorie ebensowenig helfen wie die ausgeklügelten Experimente der Gravitationsphysik, wohl aber die für die wissenschaftliche Methode der Physik des 20. Jahrhunderts so charakteristischen Gedankenexperimente. Hierzu werden dem Lehrenden einige Anregungen gegeben und ferner wird gezeigt, inwieweit Dimensionsbetrachtungen nützlich sein können, physikalisches Denken zu schulen, indem beispielsweise der in der Schulbuchliteratur auf statische Situationen beschränkte Vergleich zwischen Elektrizität und Gravitation bis zu den Gravitationswellen hin ausgedehnt wird.

2 Der wachsende Abstand zwischen Schulphysik und moderner Wissenschaft

2.1 Generationenkonflikt

Eine zentrale Aufgabe der Physikdidaktik und der Lehrerausbildung besteht darin, einen sich abzeichnenden Generationenkonflikt innerhalb der Physik zu bewältigen. In weniger als fünf Jahren ist das, was wir heute als "moderne Physik" bezeichnen, oft bereits wieder "veraltete Physik", denn das "Wissen" in der Physik verdoppelt sich zur Zeit alle acht bis zehn Jahre. Es eröffnet sich damit das Problem, wie man diese Wissensexplosion im Unterricht bewältigt und zwar unter der Bedingung, daß die Zahl der in der Schule angebotenen Physikstunden konstant bleibt bzw. in der Tendenz eher abnimmt, der Lehrbetrieb eher konservativ ausgerichtet ist und Innovationen bei Lehrern aus vielerlei Gründen oft wenig Akzeptanz finden, was sich in Lehrplänen und Schulbüchern niederschlägt, denn weit mehr als die Hälfte des Inhalts betrifft hierin eine Physik, die bereits am Ende des 19. Jahrhunderts bekannt war.

Diesen augenscheinlichen Generationenkonflikt beschreibt A. Pflug wie folgt: „Obwohl die beiden genannten Disziplinen (die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie, Anm. d. Verf.) das physikalische Denken des 20. Jahrhunderts in entscheidender Weise beeinflußt und verändert haben und als Eltern bzw. Großeltern der gegenwärtigen physikalischen Forschung anzusehen sind, steckt die Kunst ihrer gemeinverständlichen Darstellung gegenwärtig noch gänzlich in den Kinderschuhen, so daß selbst eine pubertäre Phase derselben noch Zukunftsmusik ist“ [1].

Stellen wir also die Frage: Was können wir tun, damit wenigstens für die Kinder unserer heutigen Schüler Quantenmechanik und Relativitätstheorie dereinst klassische Physik sind?

Der Antwort kommen wir durch eine andere Frage näher: Wodurch ist für uns die Faraday-Maxwellsche Elektrodynamik, um nur ein Beispiel zu nennen, klassische Physik geworden? - Sie besitzt „innere Vollkommenheit“ und hat viele „äußere Bewährungen“ (A. Einstein) bestanden; fast nichts an ihr ist mehr paradox. Trotz ihres hohen Abstraktionsgrades ist sie anschaulich geworden. Alle diese Faktoren haben die Physik klassisch, d.h. auch vertrauenswürdig und lehrbar gemacht. Eine erste Antwort auf unsere Ausgangsfrage lautet also: Schon heute sollten Quantenmechanik und beide Relativitätstheorien in gebührendem Umfang im Schulunterricht vorkommen. Diese Schlußfolgerung ist jedoch nicht unumstritten.

2.2 Das Für und Wider moderne Physik zu lehren

Beginnen wir mit zwei Einwänden gegen moderne Physik¹ im Unterricht: Die Physik steht in dem Verdacht, so kompliziert zu sein, daß es nicht einmal an den Gymnasien mehr nützlich sei, sie zu unterrichten. Indem sie das „ganz Große“ (Astrophysik, Kosmologie), das „ganz Kleine“ (Elementarteilchen) oder das „ganz Komplexe“ (Chaos) behandelt, habe sie sich zu weit von der menschlichen Lebenswelt entfernt. Zudem sei moderne Physik im Klassenzimmer fast immer „Kreidephysik“. Sollten wir daraus folgern, auf die in Rede stehenden Inhalte lieber zu verzichten und stattdessen noch mehr technische Anwendungen der klassischen Physik zu lehren? Zu viele Gründe sprechen dagegen.

Erstens belegt die Neugier bereits sehr junger Schüler, daß sie mit einem Verzicht auf moderne Physik im Unterricht unzufrieden wären.

Zweitens ist moderne Physik ein Grundbestandteil unserer heutigen Kultur. Wir brauchen sie also, wenn Physikunterricht etwas zu Bildung und verständnisvoller Auseinandersetzung mit der Wirklichkeit beitragen soll. Bei unserem über alle Maßen selbstverständlichen Umgang mit Apparaten, die übrigens zum gro-

¹ Mit dem Begriff „moderne Physik“ wird oft - vor allem im Schulbereich - einschränkend nur die Physik der 20er Jahre gekennzeichnet. Hier wird jedoch der Begriff unter Einbeziehung aktuellster Forschungsergebnisse gesehen.

ßen Teil Technik gewordene Quantenphysik sind, sollten wir die Worte Einsteins nicht vergessen:

“Schämen sollten sich die Menschen, die sich gedankenlos der Wunder der Wissenschaft und Technik bedienen und nicht mehr davon geistig erfaßt haben als die Kuh von der Botanik der Pflanzen, die sie mit Wohlbehagen frißt” [2].

Und schließlich: Die beste “öffentliche Wissenschaft” muß wieder in der Schule gelehrt werden. Die Medien werden mit dieser Aufgabe nicht fertig. Anstatt auf außerschulische Informationsquellen angewiesen zu sein, sollten Schüler in der Schule lernen, kritisch zu werten, was diese bieten.

Wir wollen die Liste der Pro- und Contra-Argumente nicht verlängern, sondern fragen:

2.3 Wie wird moderne Physik in der Schule lehrbar?

Wie so oft, ist es leichter zu sagen, wie nicht.

Sicherlich nicht durch Erweiterung des Stoffumfanges in gegebener Zeit, denn: “Überbürdung mit zusammenhanglos erscheinendem Stoff führt notwendig zur Oberflächlichkeit und Kulturlosigkeit. Das Lernen soll aber so sein, daß das Dargestellte als wertvolles Geschenk und nicht als saure Pflicht empfunden wird.”

(A. Einstein, [3])

Moderne Physik wird auch nicht lehrbar durch Beschränkung auf das Allerneueste, wengleich Schüler natürlich schnelle Antworten auf ihre Fragen ohne weit hergeholt Grundlagen wünschen. In der klassischen Physik liegt aber für immer ein wesentlicher Teil des intellektuellen Gehalts der gesamten Physik. Wer dies vergißt, dem gerät Unterricht über moderne Physik unweigerlich zur Effekthascherei.

Die produktiven Fragen erwachsen hingegen - in Anspielung auf den berühmten Titel eines Mathematikwerkes von F. Klein - aus einer Betrachtung der klassischen Physik “von einem modernen Standpunkt aus”. Sie lauten:

- Wie kann man moderne Physik mit den Begriffen und Konzepten des traditionellen Stoffes verknüpfen?
- Welche klassischen Grundlagen sind für die moderne Physik unabdingbar?
- Wie tragfähig sind beliebte Inhalte, didaktische Analogien usw.?
- Welche Fakten und Formeln in den Schulbüchern sind wirkliche Fossilien?

Wohlgermerkt: Die Suche danach ist nicht gleichbedeutend mit dem Weglassen von herkömmlichem Schulstoff! Wie wir sehen werden, können sich längst aus dem Curriculum verbannte Inhalte “von modernem Standpunkt aus” wieder als äußerst fruchtbringend erweisen.

Alle diese Fragen münden also in die Suche nach den didaktischen Rückwirkungen, die die Einbeziehung der modernen Physik in den Unterricht auf die Art und Weise hat, klassische Physik zu lehren.

Wir wollen nachfolgend am Beispiel der Gravitation die Verknüpfung von modernen und traditionellen Begriffen und Konzepten demonstrieren, denn man

kann 80 Jahre nach der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht so tun, als hätte sie keine Auswirkungen auf den heutigen Unterricht über "Gravitation".

3 Elementare Physik vom modernen Standpunkt aus - Das Beispiel der allgemeinen Schwere

3.1 Wissen und Vorwissen - Wie lernen Schüler Physik?

Gerade für den weiten Weg zur modernen Physik brauchen wir eine sichere und realistische Ausgangsposition. "Man muß den Schüler dort abholen, wo er steht." (M. Wagenschein). Fragen wir also nach den Vorstellungen der Schüler und ihren Schwierigkeiten, den Zusammenhang zwischen Kraft und Bewegung und die Schwerkraft insbesondere zu verstehen.

Die Begriffe "schwer", "leicht", "oben" und "unten" beschreiben die Schwerkraft qualitativ. Dabei wird oft die Fehlzuordnung "schwer - unten" und "leicht - oben" getroffen (Abb. 1).

Nicht selten wird die Schwerkraft nur dort vermutet, wo Luft ist. So wird dann "erklärt", warum es im Weltraum, wo die Luft nicht ist, Schwerelosigkeit gibt. Nach unserer eigenen Erfahrung sind "Entfernungserklärungen" für die Schwerelosigkeit auch unter sehr guten Schülern weit verbreitet: In der Erdumlaufbahn herrsche Schwerelosigkeit, weil sie so weit weg ist, daß nach dem $1/r^2$ -Kraftgesetz die Schwerkraft "praktisch" keine Rolle mehr spielt.

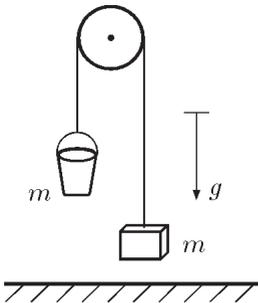


Abb. 1: Selbst in Situationen wie der hier gezeigten wird sehr oft die Fehlzuordnung "oben - leicht", „unten - schwer“ getroffen [4].

Hier hat das Newtonsche Kraftgesetz die Schüler völlig in die Irre geführt. Nachtigall [5] berichtet, daß von 600 befragten Abiturienten die meisten (!) die Vorstellung haben, für jede Bewegung sei eine zur Geschwindigkeit proportionale Kraft erforderlich, für die dann auch Begriffe wie "Seitwärtskraft" und "tangentielle Wurfkraft" erfunden werden (Abb. 2). Oftmals geht Unterricht an dieser Stelle so weiter, als ob (Schwer-)Kraft, Schwerelosigkeit und Bewegung verstanden wären. Das ist höchst riskant!

Die Fehlvorstellungen der Schüler widerspiegeln die historische Entwicklung. Bei der Wiederholung der Phylogenese durch die Ontogenese ertappen wir manchmal auch Abiturienten - sozusagen - noch im aristotelischen Stadium ihrer Entwicklung. Sie haben das Trägheitsgesetz als Merksatz gelernt, aber es ist ihnen entgangen, daß es im Widerspruch zu ihrer Alltagsvorstellung aussagt: Es gibt in der Natur Bewegungen, die keiner Kraft bedürfen.

Darunter braucht das Selbstvertrauen der Schüler nicht zu leiden, welche die Physik als kompliziert empfinden, weil sie dem gesunden Menschenverstand

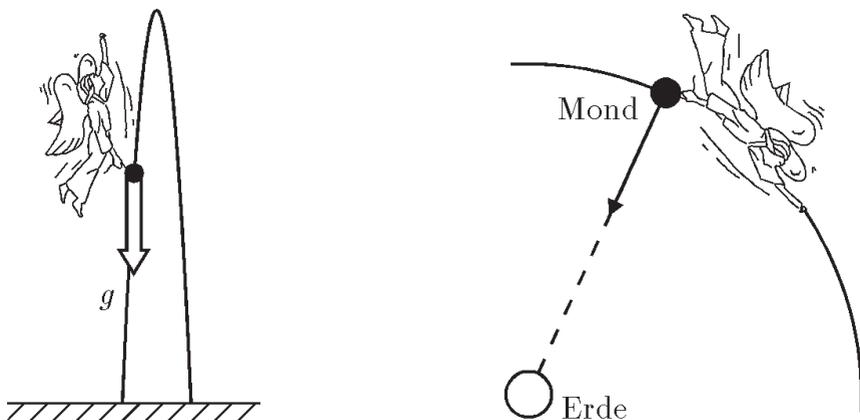


Abb. 2: Beispiele für die weit verbreitete Schülervorstellung, jede Bewegung erfordere eine Kraft in Bewegungsrichtung.

angeblich nicht zugänglich ist. Die Darstellung historischer Erkenntnisabläufe im Unterricht kann dem Schüler helfen, sich seiner eigenen Vorstellungen bewusst zu werden, ohne sich seiner Fehlvorstellungen zu schämen.

Für den Lehrer reicht es nicht aus, den korrekten Inhalt zu lehren. Der Konflikt zwischen dem intuitiven Verständnis des Schülers und dem physikalischen Wissen des Lehrers sitzt tief. Da der Lehrer aber so unterrichtet, wie er selbst Unterricht erlebt hat, wird er diesen Konflikt nicht provozieren und austragen, wenn ihn die Universität dazu nicht befähigt hat. Er soll ihn aber offenlegen, denn explizit angesprochene Fehlvorstellungen können sinnvolles Lernen fördern.

Was wäre nämlich der Lohn für eine Auseinandersetzung mit der "Seitwärtskraft" und der "tangentialen Wurfkraft" gewesen? Erörtern wir die merkwürdig klingende Behauptung "Der Mond fällt um die Erde" (Abb. 3): Die einzige für die Mondbewegung verantwortliche Kraft ist die Zentralkraft in Richtung auf die Erde. Insofern ist die Mondbewegung ein freier Fall. Jedoch sind die Richtungen von Kraft und Bewegung verschieden; der Mond fällt zwar frei zur Erde, dennoch stürzt er nicht auf sie. Die Komponente der Bewegung in Richtung der momentanen Bahntangente ist gerade eine solche, für die keine Kraft verantwortlich ist.

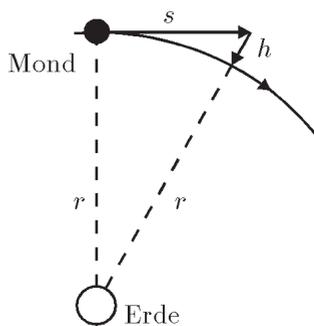


Abb. 3: Der Mond fällt um die Erde.

Aus dem rechtwinkligen Dreieck in Abb. 3 lesen wir die folgende Beziehung ab,

$$r^2 \left(1 + \frac{h}{r} \right)^2 = r^2 + s^2$$

und da für infinitesimal kleine Zeitintervalle Δt des Bewegungsablaufs $h/r \ll 1$ ist, folgt daraus näherungsweise

$$h \approx \frac{s^2}{2r} .$$

Dem Charakter der beiden Bewegungskomponenten entsprechend setzen wir

$$s = v \cdot \Delta t \quad \text{und} \quad h = \frac{a}{2} (\Delta t)^2 \quad \text{und erhalten}$$

$$a = \frac{v^2}{r} = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r .$$

Mit der Umlaufzeit $T_M = 27,3$ Tage und dem Bahnradius $r_M = 384400$ km ergibt sich die Beschleunigung des Mondes zu $a_M = 0,27 \text{ cm/s}^2$. Diese vergleichen wir mit der Beschleunigung $a_A = 981 \text{ cm/s}^2$ eines in der Nähe der Erdoberfläche ($r_A = 6372$ km) fallenden Apfels. Auch für seine Bewegung ist allein die zum Erdmittelpunkt gerichtete Zentralkraft verantwortlich - die Physik am Himmel und auf der Erde ist die gleiche. Allerdings stimmen bei ihm die Richtungen von Kraft und Bewegung überein. Wir finden

$$\frac{a_A}{a_M} = 3640 \quad , \quad \frac{r_A}{r_M} = \frac{1}{60,3}$$

und mit $60,3^2 \approx 3640$ das quadratische Abstandsgesetz

$$\frac{a_A}{a_M} = \left(\frac{r_M}{r_A} \right)^2 .$$

Außerdem haben wir gelernt (und zwar ohne den terminus technicus der "Integrationskonstanten" verwenden zu müssen), daß für die Vielfalt der Bewegungen bei *ein und derselben* Kraft die Anfangsbedingungen, die für die Mondbewegung tief in der Geschichte des Sonnensystems verborgen sind, genauso wichtig sind wie das Kraftgesetz selbst.

3.2 Elektrostatik und Gravitation - ein Vergleich

Obwohl die Begriffe "leicht", "schwer", "oben" und "unten" zu den ältesten der Menschheit gehören, ist - historisch gesehen - das Phänomen Gravitation erst sehr spät verstanden worden. Das hat vor allem zwei Gründe: erstens die Universalität der Gravitation, die darin besteht, daß ein homogenes Schwerfeld alle Körper gleich stark beschleunigt (Galilei) und zweitens ihre Konstanz, die Tatsache also, daß das Schwerfeld nahe der Erdoberfläche (näherungsweise) homogen ist. Die Universalität der Gravitation ist ihre wichtigste Eigenschaft, ihr grundlegender Unterschied zu anderen Kräften.

Nachdem diese Erschwernisse historisch nun überwunden sind, werden sie den Schülern beim Lernen jedesmal neu zugemutet. Dabei wird die Einsicht in das Wesen der Gravitation durch die undifferenzierte Verwendung des Begriffs "Masse" als Antwort auf zwei völlig verschiedene Fragen erschwert. Diese lauten:

1. Wie schwer ist es, einen Körper durch irgendeine Kraft zu bewegen?
2. Wie schwer ist der Körper? Mit anderen Worten: Wie stark wird er durch ein spezielles Kraftfeld, eben das Gravitationsfeld, beeinflusst?

Es hat sich genau das ereignet, was F. Hund [6] beschreibt:

"Als Physiker wissen wir wenigstens aus der jüngsten Geschichte unserer Wissenschaft, daß die wichtigsten und grundlegenden Erkenntnisse nur bei ihrem Entstehen ausführlich diskutiert werden, nachher werden sie mehr oder weniger geglaubt und als selbstverständlich ohne Bedenken gehandhabt."

Wir behandeln zunächst die Elektrostatik, da sie als Antwort auf die beiden entsprechenden Fragen zwei Begriffe kennt. Die Frage "Wie schwer ist es, einen Körper zu bewegen?" ist unabhängig von der Spezifik des Kraftfeldes und wird mit dem Begriff der trägen Masse m_t beantwortet.

Wie stark ein Körper von einem elektrischen Feld beeinflusst wird, hängt von seiner elektrischen Ladung q ab. Die spezifische, auf die *träge* Masse bezogene, elektrische Ladung q/m_t ist erfahrungsgemäß von Körper zu Körper verschieden,

$$\frac{q}{m_t} < 0 \quad (1)$$

und damit auch die durch ein elektrisches Feld erteilte Beschleunigung

$$a = \frac{q}{m_t} E \quad (2)$$

Schließlich ist diese Eigenschaft die Grundlage für technische Apparate wie den Massenspektrographen, der Teilchen gleicher elektrischer Ladung nach ihrer Masse sortiert.

Im Falle der Gravitation wird die erste Frage wieder durch die träge Masse beantwortet. Wie schwer aber ein Körper ist, wie stark er also an das Schwerefeld koppelt, hängt von seiner schweren Masse m_t ab, die wir in Analogie zur Elektrostatik aus didaktischen Gründen besser Gravitationsladung nennen sollten. Beide "Massen", die träge Masse m_t und die Gravitationsladung m_s , sind logisch voneinander genauso unabhängig wie die Fragen, die sie beantworten. Es ist eine allein das Gravitationsfeld charakterisierende Eigenschaft, daß die spezifische Gravitationsladung m_s/m_t für alle Körper gleich ist

$$\frac{m_s}{m_t} = 1 \quad . \quad (3)$$

An die Stelle von (2) tritt nun

$$a = g \quad (4)$$

mit g als Schwerebeschleunigung. Auf der Basis des freien Falls im homogenen Schwerefeld ließe sich kein Massenspektrograph konstruieren. Wir sehen also, daß es vorteilhaft sein kann, im Klassenzimmer eine andere Sprache ("Gravitationsladung") zu verwenden als im Labor des Physikers ("Masse").

Die universelle Konstanz der spezifischen Gravitationsladung rechtfertigt die Doppelbedeutung des Begriffs "Masse". In didaktischer Hinsicht ist sie die Hauptschwierigkeit und zugleich der Schlüssel für das Verständnis des Phänomens Gravitation.

3.3 Schwerelosigkeit und Gezeiten

Die durch $m_s = m_t$ ausgedrückte Universalität der Gravitation ist im Rahmen der Newtonschen Physik nicht herleitbar, sondern ein unabhängiges Naturgesetz. Auf der Grundlage seiner berühmten Fahrstuhl-Gedankenexperimente stellte Einstein das sog. Äquivalenzprinzip an die Spitze seiner Theorie. Es besagt:

In einem kleinen Labor (so klein, daß man die Feldlinien des Schwerefeldes als parallel ansehen darf), das in einem Schwerefeld frei fällt, sind alle Gesetze der Physik die gleichen wie die ohne Schwerefeld in einem Inertialsystem.

Zusammen mit vielen anderen Konsequenzen folgt aus diesem Prinzip die Gleichheit von träger und schwerer Masse. Begeben wir uns gedanklich in die Situation eines in einer kleinen, frei fallenden Fahrstuhlkabine mitfallenden Beobachters. Hält dieser anfänglich die legendäre Stahlkugel und die Vogelfeder neben sich in Ruhe, so werden sie in bezug auf ihn und die Kabine dauernd in Ruhe bleiben (Inertialsystem!). Das ist nur möglich, wenn bei Abwesenheit nicht gravitativer Kräfte auch Schwerelosigkeit herrscht.

Ein Beobachter am Boden, der dem Geschehen zusieht, wird sagen, daß die Kabine, der mitfallende Beobachter, die Stahlkugel und die Vogelfeder gleich schnell fallen. Da er die Schwerkraft spürt, und zwar nicht, weil er sich im Schwe-

refeld befindet (das gilt für den Beobachter in der Kabine ja auch), sondern weil ihn der Erdboden am freien Fall hindert, wird er das gleich schnelle Fallen als eine Eigenschaft dieser Schwerkraft deuten.

Kehren wir nun zurück zur Bewegung eines Satelliten um die Erde. Wir wiederholen: Obwohl die Richtungen von Kraft und Bewegung nicht mehr übereinstimmen, handelt es sich um den freien Fall. Folglich herrscht im Innern eines kleinen Erdsatelliten aus dem gleichen Grunde Schwerelosigkeit wie in der frei fallenden Fahrstuhlkabine. (Hier sehen wir, wie sehr die "Entfernungs-Erklärungen" einer vermeintlich angenäherten Schwerelosigkeit das Verständnis der vollkommenen Schwerelosigkeit im freien Fall blockieren.)

Im übrigen befinden wir uns ja selbst dauernd in dieser Situation, denn auch die Erde ist auf ihrer Bahn um die Sonne im freien Fall. Tatsächlich spüren wir die Anziehungskraft der Sonne nicht. Andernfalls müßten wir uns am Tage, wenn die Sonne über uns steht, ja leichter und nachts, wenn sie unter uns steht, schwerer fühlen.

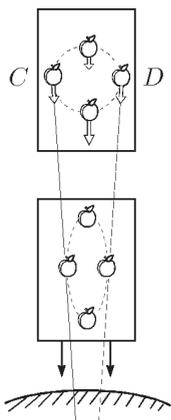


Abb.4: Ein frei fallender Kreisring von Testteilchen wird zu einer Ellipse verformt.

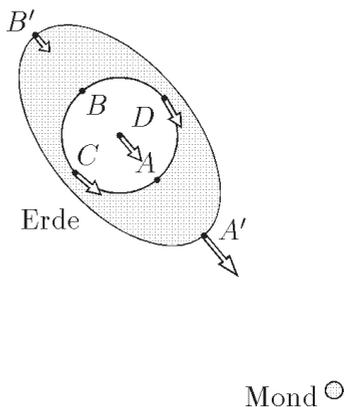


Abb. 5: Die Verformung der Ozeane durch die Gezeitenwirkung des Mondes in einer stark übertriebenen Darstellung.

In einem Zuge mit der Schwerelosigkeit behandeln wir nun auch die Gezeiten. Wieder beginnen wir mit einem Gedankenexperiment in Einsteins Fahrstuhl (Abb. 4), der nun nicht mehr "klein" sei, so daß wir die Konvergenz der Schwerkraftlinien zum Erdmittelpunkt hin bereits innerhalb der Fahrstuhlkabine in Rechnung stellen müssen. Benachbarte Testteilchen (die Äpfel aus Abb. 4) erfahren durch die Erde eine Beschleunigung aufeinander zu, und ein aus ihnen anfänglich gebildeter Kreisring wird zu einer Ellipse deformiert. (Die gegensei-

tige Massenanziehung der Äpfel wird dabei völlig vernachlässigt!) Bei einem Anfangsabstand der Äpfel C und D von 1 m bewirken 100 m freier Fall in der Nähe der Erdoberfläche eine Annäherung um 0,016 mm.

Beim "Real-Experiment", den Gezeiten im traditionellen Wortsinn, werden die Ozeane verformt, weil ihre Teile relativ zueinander und zum festen Erdkörper beschleunigt werden wie die Äpfel im Gedankenexperiment (Abb.5). Dafür ist der Einfluß des Mondes bedeutender als der der Sonne, obwohl die Anziehungskraft der Sonne auf die Erde 177mal größer als die des Mondes ist. Wir haben oben bereits betont, daß wir die Anziehungskraft der Sonne gar nicht spüren, denn wir fallen ja frei. Es kommt darauf an, wie stark sich die Anziehungskräfte über den Erddurchmesser hinweg ändern, und das sind beim Mond 6,6%, bei der Sonne aber nur 0,017%!

Auch der Flutberg B' von Abb. 5 läßt sich auf diese Weise leicht erklären: Der Punkt B des festen Erdkörpers fällt wie der Erdmittelpunkt und läßt den Punkt B' des Ozeans zurück, der, von B aus gesehen, als Flutberg erscheinen muß, obwohl auch er zum Mond hin beschleunigt wird.

Wir haben bis hierher ausschließlich Bekanntes zum Thema Gravitation behandelt, es allerdings im Lichte von Einsteins Fahrstuhl-Gedankenexperimenten neu gesehen. Letztere sind ein "Triumph der Wissenschaft", der darin besteht, "daß wir einen solchen Gedankengang finden können, daß das Gesetz einleuchtend erscheint." (R.P. Feynman). Insbesondere haben wir qualitative Fehlvorstellungen von Schülern mit qualitativen Argumenten widerlegen können. Auf die gelegentlich erhobenen Bedenken, ob denn Allgemeine Relativitätstheorie in den Unterricht gehöre, antworten wir daher: Wenn ein Physiklehrer um wissenschaftliche Korrektheit in seinem Unterricht bemüht ist, kann er das durch diese Theorie veränderte Verständnis von Gravitation nicht ignorieren.

3.4 Elektromagnetische Wellen und Gravitationswellen

Den Vergleich von Elektromagnetismus und Gravitation haben wir bislang auf statische Situationen beschränkt. Auch die Schulbuchliteratur geht darüber nicht hinaus. Das Feldkonzept wird aber erst bei zeitabhängigen Problemen wirklich bedeutsam. Unser bisher praktizierter Zugang ist tragfähig genug, um uns sogar einen Einblick in das Thema "Gravitationswellen" zu gewähren. Die Darstellung in diesem Abschnitt ist wesentlich von P.C.W. Davies [7] beeinflusst.

3.4.1 Elektromagnetische Wellen

Wir beginnen mit den vertrauten elektromagnetischen Wellen.

In einem einfachen Beispiel mögen zwei Teilchen mit den (trägen) Massen m_{t1} und m_{t2} die Ladungen $q_1 = +e$ bzw. $q_2 = -e$ tragen und durch Federkraft beschleunigt werden (Abb. 6). Bewegt sich bei einer Kontraktion der Feder die positive Ladung um die Strecke Δx nach rechts, bewegt sich die negative um die Strecke $\frac{m_{t1}}{m_{t2}} \cdot \Delta x$ nach links.

Der Ladungsmittelpunkt (das elektrische Dipolmoment) ist:

$$p_{el} = (+e)(+\Delta x) + (-e)\left(-\frac{m_{t1}}{m_{t2}}\Delta x\right). \quad (5)$$

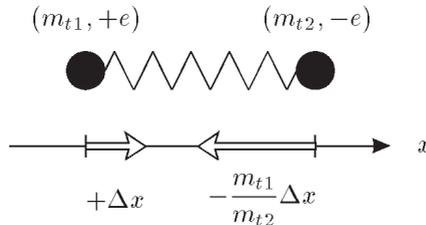


Abb. 6: Ein schwingender Dipol aus elektrischen Ladungen.

Sind insbesondere die Massen beider Teilchen einander gleich, ist die Bewegung der positiven Ladung um die Strecke Δx nach rechts und die der negativen um die gleiche Strecke nach links äquivalent zur Verschiebung *einer* doppelten positiven (negativen) Ladung nach rechts (links):

$$(+e)(+\Delta x) + (-e)(-\Delta x) = (+2e)(+\Delta x) = (-2e)(-\Delta x) .$$

Der Ladungsmittelpunkt schwingt, das Dipolmoment ändert sich. (Bei der Expansion der Feder ersetzen wir Δx durch $-\Delta x$.)

An der zeitlichen Veränderlichkeit des elektrischen Dipolmoments ändert sich auch dann nichts, wenn sich nur noch eines der beiden Teilchen bewegt. Dies können wir z.B. dadurch realisieren, daß wir bei gleichbleibender elektrischer

Ladung q_1 die Masse m_{t1} so vergrößern, daß $\frac{q_1}{m_{t1}} \ll \frac{q_2}{m_{t2}}$ gilt.

Bekanntlich werden von den beschleunigt bewegten Ladungen elektromagnetische Wellen erzeugt, weil sich der mit der Bewegung der Ladungen verbundene Umbau der elektromagnetischen Felder nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. Auf die Einzelheiten gehen wir nicht ein, sondern verweisen z.B. auf die Darstellung in [8].

Wird die Beschleunigung eines elektrisch geladenen Teilchens statt durch eine Feder durch ein anderes geladenes Teilchen bewirkt, so ist für den Ablösevorgang elektromagnetischer Wellen charakteristisch, daß das elektrische Feld, das ein geladenes Teilchen umgibt, selbst elektrisch neutral ist. Also spürt nur das zu beschleunigende Teilchen, aber nicht sein Feld die andere Ladung. Wie auch bei dem Beispiel von Abb. 6 wird einige Zeit vergehen, bis das Fernfeld auf die veränderte Bewegung seiner Quelle reagiert.

Eine wichtige Anwendung dieser Ideen ist das elektromagnetische Stabilitätsproblem des alten Rutherford'schen Planetenmodells des Atoms. Die Bewegung eines Elektrons um den Atomkern ist die beschleunigte Bewegung einer Ladung. Durch den Energieverlust infolge der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen sollte das Elektron binnen 10^{-10} s in den Kern spiralen (s. Abb. 7) - im Widerspruch zur Stabilität der Atome. Dieses Problem ist im Bewußtsein von Schülern und Studenten größtenteils nicht mehr vorhanden, wohl deshalb, weil Schulbuchautoren es zum Fossil erklärt und es aus den Büchern verbannt haben. Andere Autoren geben aber sogar die Strahlungsleistung P bei der Beschleunigung a einer elektrischen Ladung q an [8]:

$$P = \frac{2}{3} \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 c^3} a^2 . \quad (6)$$

Dieses Problem sollte seine Daseinsberechtigung nicht nur als eine die Quantenmechanik motivierende Fragestellung behalten, denn: "Wir verstehen eine Theorie, wenn wir das Problem verstehen, zu dessen Lösung sie erfunden wurde" (K. Popper). Auch als Vergleichsgegenstand für das noch zu behandelnde gravitative Stabilitätsproblem ist es von Interesse.

Zunächst fragen wir jedoch, ob man in der Schule einen Zugang zu der Strahlungsleistung (6) überhaupt gewinnen kann. Immerhin gehört die Herleitung dieser Formel ja selbst in Hochschullehrbüchern zu den fortgeschrittenen Themen der Elektrodynamik. Wir bedienen uns hier der Dimensionsanalyse als eines heuristischen Instruments.

Der zeitliche Energieverlust P wird einerseits von Größen abhängen, die das beschleunigt bewegte Elektron charakterisieren: von seiner Ladung e und dem Abstand r vom Kern in der Kombination $e \cdot r$, denn elektromagnetische Strahlung entsteht (vgl. Glg. (5)), wenn sich das Dipolmoment ändert, sowie von der Umlauffrequenz ω . Aber auch Naturkonstanten, die elektromagnetische Wellen charakterisieren, sollten vorkommen: die elektrische Feldkonstante ϵ_0 und die Lichtgeschwindigkeit c . Wir versuchen damit den Zusammenhang:

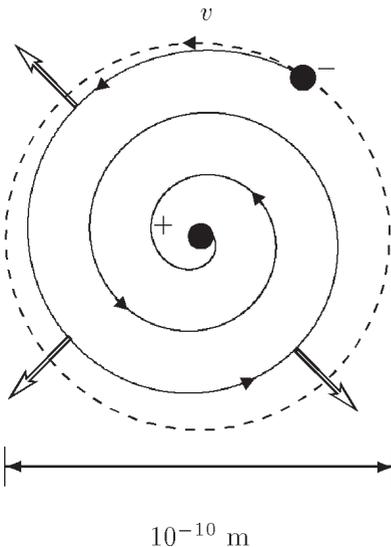


Abb.7: Die Instabilität des Rutherford'schen Planetenmodells des Atoms.

$$P \sim (er)^\alpha \omega^\beta \cdot c^\gamma \epsilon_0^\delta .$$

Ausgedrückt durch die Grundgrößen Länge (L), Zeit (T), Masse (M) und Stromstärke (I) ist $\dim P = ML^2T^{-3}$, $\dim(er) = IT \cdot L$, $\dim \omega = T^{-1}$, $\dim c = LT^{-1}$ und, wie man am einfachsten aus dem Coulombgesetz ersehen kann:

$\dim \epsilon_0 = I^2T^4M^{-1}L^{-3}$. Der Exponentenvergleich in

$$ML^2T^{-3} = I^{\alpha+2\delta}T^{\alpha-\beta-\gamma+4\delta}L^{\alpha+\gamma-3\delta}M^{-\delta} \text{ ergibt } \alpha = 2 \wedge \beta = 4 \wedge \gamma = -3 \wedge \delta = -1$$

und damit schon aus Dimensionsgründen

$$P \sim \frac{(er)^2 \omega^4}{c^3 \epsilon_0} . \tag{7}$$

Dies ist die Strahlungsleistung (6), wenn man für a die Beschleunigung auf der Kreisbahn nimmt. Der Zahlenfaktor $\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4\pi}$ läßt sich durch Dimensionsanalyse natürlich nicht gewinnen.

3.4.2 Gravitationswellen

Wenden wir uns nun den Gravitationswellen zu und betrachten einen schwingenden Massendipol (Abb.8), der sich von dem aus Abb. 6 nur dadurch unterscheidet, daß die beiden gleich großen Massen nun elektrisch neutral sind.

Daß der Mittelpunkt der elektrischen Ladung auch für zwei Ladungsträger mit gleichen Massen noch schwingen konnte, lag daran, daß es elektrische Ladungen beiderlei Vorzeichens gibt. Die Masse ist jedoch immer positiv, Gravitation stets anziehend, und obendrein ist das Verhältnis von Gravitationsladung zu träger Masse für alle Körper gleich. In der Anordnung von Abb. 8 schwingt deshalb der Massenmittelpunkt (das Massendipolmoment) nicht.

Anstelle von (5) haben wir

$$p_{\text{grav}} = m_{s1}(+\Delta x) + m_{s2}\left(-\frac{m_{t1}}{m_{t2}} \cdot \Delta x\right) = m_{t1}\left(\frac{m_{s1}}{m_{t1}} - \frac{m_{s2}}{m_{t2}}\right) \cdot \Delta x = 0 . \tag{8}$$

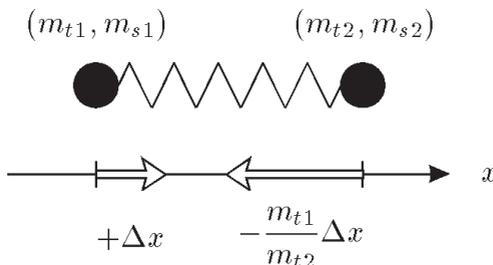


Abb. 8: Ein schwingender Dipol aus Gravitationsladungen (Massendipol)

Zwar schwingen die Konstituenten des Dipols für sich, man kann sie jedoch nicht durch eine einzige schwingende Masse ersetzen, wie es bei den Ladungen möglich war (vgl. (5)). Es hilft auch nicht, wenn wir die Trägheit des einen Körpers stark erhöhen in der Hoffnung, der Massenmittelpunkt könnte durch die alleinige Schwingung des anderen Körpers in Bewegung geraten. Während die Trägheit erhöht werden konnte, ohne daß die elektrische Ladung zunehmen mußte, wächst mit der trägen Masse in gleichem Maße auch die schwere Masse. Das Massendipolmoment ändert sich also nicht, wohl aber

$$Q_{\text{grav}} = m(+\Delta x)^2 + m(-\Delta x)^2 = 2m(\Delta x)^2 . \quad (9)$$

Die universelle Gleichheit von träger und schwerer Masse hat auch Auswirkungen auf die Ablösung von Gravitationswellen von der Quelle des Gravitationsfeldes.

Wenn eine Masse durch das Gravitationsfeld einer zweiten Masse anstelle der Feder beschleunigt wird, können wir nicht mehr - wie bei den elektrischen Ladungen - sagen, daß zwar die zu beschleunigende Masse, aber nicht ihr Gravitationsfeld das Gravitationsfeld der beschleunigenden Masse spürt. Ein Gravitationsfeld ist nicht gravitativ neutral! Mehr noch: Daß alle "Körper" durch ein Gravitationsfeld die gleiche Beschleunigung erfahren, gilt lokal ("in kleinen Fahrstuhlkabinen") auch für Felder. Können sich dann überhaupt Gravitationswellen ablösen, wenn doch die Felder mit ihren Quellen "gleich schnell" fallen?

Die Antwort lautet: Das Äquivalenzprinzip macht eine Aussage über lokale Verhältnisse, Felder erstrecken sich jedoch über den ganzen Raum. Das Fernfeld der zu beschleunigenden Masse spürt daher eine andere Anziehungskraft als die Masse selbst, so wie auch Teile der Ozeane eine andere Anziehungskraft des Mondes als etwa der Erdmittelpunkt spüren. Es sind also die Gezeitenkräfte, die eine Ablösung von Gravitationswellen von den felderzeugenden Massen doch noch ermöglichen.

Wie beim Rutherford'schen Atommodell das elektromagnetische Stabilitätsproblem auftritt, so sollte es bei Doppelsternsystemen ein gravitatives geben. Während aber die Quantenmechanik u.a. dafür erfunden wurde, die Stabilität der Atome in der Realität auch in der Theorie wiederzufinden, wäre es höchst wünschenswert, den vorausgesagten Kollaps eines Doppelsternsystems infolge des Energieverlustes durch Gravitationswellen in der Natur zu beobachten. Das enge Doppelsternsystem, dessen eine Komponente der Pulsar PSR 1913+16 ist, ist dafür ein Beispiel [9] (Abb.9).

Wir schätzen die Strahlungsleistung wieder mit Hilfe der Dimensionsanalyse ab. An die Stelle der elektrischen Ladung beim Rutherford-Atom tritt jetzt die Masse m , und zwar in der Kombination mr^2 (vgl. (9)). Wir stellen nun fest, daß sich aus den Systemparametern allein eine Strahlungsleistung:

$$P_{\text{System}} \sim (mr^2)^\alpha \omega^\beta$$

mit $\alpha = 1$ und $\beta = 3$ konstruieren läßt. Das kann aber nicht die Lösung unseres Problems sein, denn es fehlen die charakteristischen Naturkonstanten: die Lichtgeschwindigkeit c und - anstelle von ϵ_0 - die Gravitationskonstante G . Aus diesen beiden allein ergibt sich mit $\dim G = L^3 M^{-1} T^{-2}$ wieder eine Strahlungsleistung, nämlich $P_{\text{Natur}} = G^\gamma c^\delta$ mit $\gamma = -1$ und $\delta = 5$. Erst die denkbar einfachste Kombination beider:

$$P = \frac{P_{\text{System}}^2}{P_{\text{Natur}}} \sim \frac{(mr^2 \omega^3)^2}{\left(\frac{c^5}{G}\right)} \quad (10)$$

könnte eine Lösung unseres Problem sein. Dabei steht P_{Natur} im Nenner, denn es ist:

$$P_{\text{Natur}} = 3,6 \cdot 10^{52} \frac{\text{J}}{\text{s}},$$

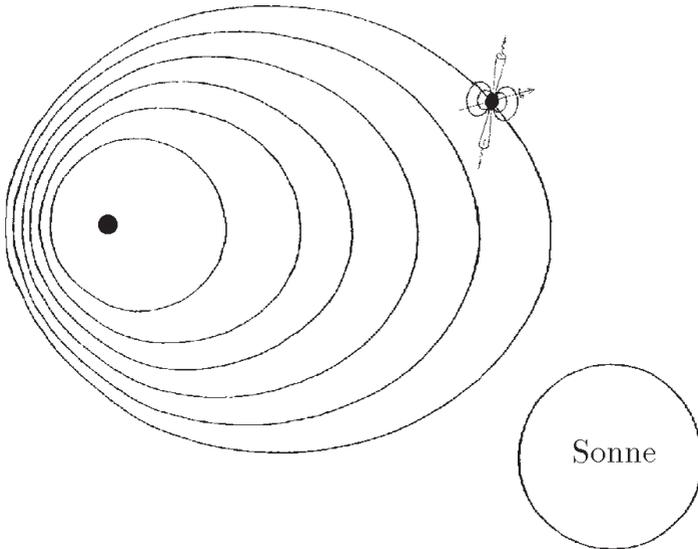


Abb. 9: Die Instabilität des Pulsar-Doppelsterns PSR 1913+16. (Die Sonne ist zum Zwecke des Größenvergleichs eingezeichnet.)

entsprechend einer thermischen Leuchtkraft von 10^{26} (!) Sonnen, und wir haben ja gerade mit Hilfe des Äquivalenzprinzips argumentiert, daß Gravitationswellen sehr schwach sein müssen. Das Erstaunliche ist nun: Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie ist Gleichung 10 die für die gesuchte Strahlungsleistung - bis auf einen Faktor $\frac{64}{5}$! Mit den Bahnparametern des Pulsar-Doppelsterns [9] ergibt sich eine "Lebensdauer" des Systems von

$$\tau \approx \frac{E}{P} \approx 2,6 \cdot 10^9 \text{ a} .$$

Dadurch, daß eine seiner Komponenten, der sehr stabil rotierende Pulsar, eine Uhr verkörpert, die in ihrer Genauigkeit mit den genauesten Atomuhren vergleichbar ist, kann man schon im Verlaufe von nicht einmal 20 Jahren die Auswirkungen der Gravitationswellen-Abstrahlung auf die Umlaufzeit beobachten (Abb.10) und eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit der Theorie konstatieren.

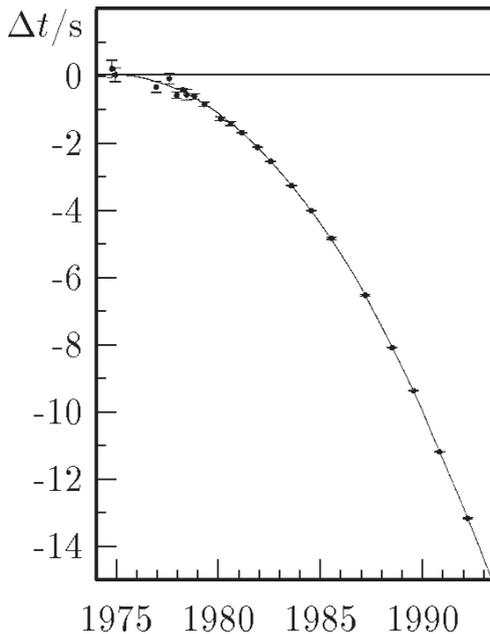


Abb. 10: Verschiebung Δt der Durchgangszeit durch das Periastron der Bahn des Pulsars PSR 1913+16 infolge der Abstrahlung von Gravitationswellen (durchgezogene Kurve: Vorhersage der Theorie, Punkte: Meßwerte mit Fehlergrenzen), nach [10]

3.4.3 Kritik an der Dimensionsanalyse

Worin bestehen die Vorzüge und Grenzen der Dimensionsanalyse? Ist dieses qualitative Verfahren ein brauchbares Werkzeug für den Unterricht?

Unbestritten ist wohl ihre Nützlichkeit bei der Fehlersuche in Ergebnissen oder einzelnen Schritten von deren Herleitung.

Als heuristisches Instrument besteht ihr großer *Vorzug* darin, daß sie zum physikalischen Überlegen und Argumentieren zwingt und beispielsweise die Aufmerksamkeit auf die Rolle der für ein Problem relevanten Naturkonstanten lenkt. Sie hat nur Sinn, wenn aus der Kenntnis des physikalischen Problems heraus vorher entschieden wird, welche Parameter für die Lösung des Problems eine Rolle spielen. Ohne die ausführliche Erörterung des Unterschiedes von spezifischer elektrischer und Gravitationsladung und die Schlußfolgerung, daß elektromagnetische Strahlung Dipolstrahlung ist, Gravitationsstrahlung aber nicht, hätte unsere Analyse keinen Sinn gehabt.

Mit anderen Worten: Die Dimensionsanalyse verlangt die Einhaltung von Wheelers Verhaltensregel "Never start a calculation before you know the answer" [11]. Im gleichen Sinne schreibt Mößbauer über eine Begegnung mit Feynman [12]:

"Er als Theoretiker untersagte mir bei Diskussionen zu meinem großen Erstaunen die Verwendung von mathematischen Formulierungen mit der Begründung, daß die Mathematik ja nachgeholt werden könne, wenn die Lösungen erst einmal klar wären."

Die Dimensionsanalyse birgt aber auch Nachteile und Gefahren, die wir nicht verschweigen dürfen.

Ein offensichtlicher Nachteil liegt in dem Verfahren selbst: Dimensionslose Faktoren wie in unserem Fall $\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4\pi}$ oder $\frac{64}{5}$ können nicht gewonnen werden. Für einen quantitativen Vergleich von Theorie und Experiment kommt es aber auf ihren genauen Wert an.

Zum anderen können Vorzüge und Grenzen dieses heuristischen Verfahrens eigentlich nur von dem eingeschätzt werden, der die vollständige Lösung des Problems kennt, für die die Dimensionsanalyse kein Ersatz ist. Das sind unsere Schüler aber in der Regel nicht. Dort, wo die Dimensionsanalyse erfolgreich ist, darf sie nicht leichtsinnig mit der physikalischen Theorie verwechselt werden!

Indem diesem Verfahren physikalische Überlegungen vorausgehen müssen, bewahrt es uns davor, uns zu dem für den Lehrer verbotenen Satz "Es kommt eben so heraus" hinreißen zu lassen.

4 Literatur

- [1] Pflug, A.: Der menschliche Lebensraum zwischen Atom und Kosmos: eine Reise durch Dimensionen und Disziplinen, Physik und Didaktik 22(1994)(2)103-125
- [2] Einstein, A.: Rede zur Eröffnung der Rundfunk- und Phono-Ausstellung in Berlin am 22.8.1930 (zitiert nach F. Herneck, Bahnbrecher des Atomzeitalters, Buchverlag Der Morgen, Berlin 1969)
- [3] Einstein, A.: Mein Weltbild, (Hrsg. C. Seelig) Frankfurt/M., Berlin, Wien 1977
- [4] McDermott, L.C.: Research on conceptual understanding in mechanics, Physics Today (1984)(7)2-10
- [5] Nachtigall, D.K.: Krise des Physikunterrichts — Fünf Thesen zu einem aktuellen Thema, PLUS LUCIS (Wien) (1993)(1)5-9
- [6] Hund, F.: Geschichte der physikalischen Begriffe, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford 1996
- [7] Davies, P.C.W.: The search for gravity waves, Cambridge University Press, Cambridge 1980
- [8] Sexl, R., I. Raab, E. Streeruwitz: Der Weg zur modernen Physik - Eine Einführung in die Physik, Bd. 2, Verlag M. Diesterweg Frankfurt/M., Berlin, München 1980, S. 190
- [9] Lotze, K.-H.: Nobelpreis für Astronomen - Ein Doppelstern sendet Gravitationswellen aus, Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU) (6)327-338
- [10] Taylor, J.H.: Eröffnungsvortrag des Texas-Symposiums über Relativistische Astrophysik, München, Dezember 1994
- [11] Taylor, E.F., J.A. Wheeler: Physik der Raumzeit - Eine Einführung in die spezielle Relativitätstheorie, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford 1994
- [12] Mößbauer, R.: Vorwort zu R.P. Feynman, Vom Wesen physikalischer Gesetze, Piper-Verlag München, Zürich 1990