

# PLUS LUCIS

# 2/99

---

VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES PHYSIKALISCHEN UND CHEMISCHEN UNTERRICHTS  
ÖSTERREICHISCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT - FACHAUSSCHUSS LEHRER AN HÖHEREN SCHULEN

Chemische Unterrichtsprinzipien

Hubble-Weltraumteleskop

Thirring-Lense-Effekt

Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?

Physik und Sicherheit im Verkehr

Blockpraxiserinnerungen

Freihandexperimente

Bücher



# Physik Chemie

# Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschuß LHS der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft.

Erscheint drei- bis viermal jährlich.

Medieninhaber und Herausgeber: Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts, p. Adr. Institut für Theoretische Physik der Universität Wien, Strudlhofgasse 4, 1090 Wien.

Redaktionsteam dieser Ausgabe: H. Kühnelt, W. Haslauer, W. Rentzsch und Helga Stadler.

Preis des Einzelhefts: S 70,-, für Mitglieder S 40,- (ist im Mitgliedsbeitrag enthalten). Die jährliche Abonnementgebühr für Nichtmitglieder beträgt S 200,-

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes:

Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und Chemielehrer, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Beiträge werden erbeten an:

Dr. H. Kühnelt, Institut für Theoretische Physik der Universität Wien, Strudlhofg. 4, 1090 Wien, Telefon: (01) 4277-51515. Fax: (01) 4277-9515 e-mail: Helmut.Kuehnelt@univie.ac.at

HOL W. Haslauer, Wienerstr. 21, 3250 Wieselburg

Mag. H. Stadler, Institut für Theoretische Physik der Universität Wien, Strudlhofg. 4, 1090 Wien Telefon: (01) 4277-51552

Es wird gebeten, Beiträge nach Möglichkeit auf Diskette (MS-DOS, Windows oder Macintosh) einzureichen. Bevorzugtes Dateiformat: MS-Word.

# Inhalt

**Vorwort: Natur als Spektakel**..... 1

## Fachdidaktik

Chemische Unterrichtsprinzipien..... 2

Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?..... 18

Alles, was fallen kann, fällt - oder auch nicht ... .. 23

Physik und Sicherheit im Verkehr

Die letzte Sekunde ohne Gurt..... 28

Gurt für die Stadt? Helm beim Radfahren?..... 28

Just for fun!/?..... 29

## Aus der Praxis

Blockpraxiserinnerungen..... 30

## Aus der Forschung

Das Hubble-Weltraumteleskop

Neue Perspektiven für die Astronomie – Teil 2..... 7

Der Thirring-Lense-Effekt - nach 80 Jahren

jetzt im Experiment?..... 14

## Ankündigungen

ÖPG 2000 - Projektwettbewerb für Schulen..... 31

ÖPG - Programmübersicht der Haupttagung 1999..... 35

Elektrische Kabinettstücke..... 36

Zauberwelt des Wassers..... 37

## Freihandexperimente

Ring of Fire..... 32

Feuerträger..... 32

Modell eines Amperemeters..... 32

Modell zur Veranschaulichung der Wirkungsweise

eines Verbrennungsmotors..... 33

Stehende Wellen im Gartenschlauch

Ein Kundtsches Rohr mit minimalen Mitteln..... 34

**Bücher**..... 38

Umschlagbild: Schülerinnen der 4. Klasse der Höheren Internatsschule des Bundes in Wien III kreierte im fächerübergreifenden Unterricht Brillen zur Beobachtung der Sonnenfinsternis vom 11. 8. 1999. (Photo: Dr. Ilse Fabian)

Information:

Der Jahrgang 1998 von PLUS LUCIS umfaßte die Hefte 1/98 und 2/98.

# Natur als Spektakel

Die Welt steht noch, trotz eifrig ausgegrabener obskurer Profezeiungen des Nostradamus ist sie am 11. August weder besser noch schlechter geworden. Aber halt, vielleicht wird bald das Erdbeben in der Türkei von manchen als Spätfolge der Sofi 99 angesehen? Schließlich soll es noch viel subtilere Effekte gegeben haben. Die Tiere sollen sich verwundert ob des kurzen Tages zur Ruhe begeben haben, und ein Foucaultsches Pendel soll in Kremsmünster die nahende Finsternis geahnt haben.

Bemerkenswert, was "die Wissenschaft" voraussagen kann - und wo sie scheitert! Pünktlich trafen die verschiedenen Phasen der Verfinsterung ein - nur die NASA soll sich verrechnet haben. Pünktlich ging mit einwöchiger Vorankündigung das Schönwetter zu Ende. Aber bei der Kurzfristprognose gab es Probleme. Auch die Hoffnung, der Alpenhauptkamm werde sich als Wetterscheide erweisen, wurde diesmal enttäuscht. Treffend auch die Stauprognose.

Erfreulich war das große Interesse an dem Naturspiel. Viele Menschen kamen nach Österreich, um die seltene Chance wahrzunehmen, selbst die Österreicher waren nicht alle auf Urlaub im sonnigen Süden und ließen sich - im wahrsten Sinne - mobilisieren. Ironie jedoch, daß an den inszenierten Rummelplätzen die Sonne mehr durch dicke Wolken als durch den Mond verdunkelt war. Umso größer der Eindruck bei jenen, die Glück hatten, ein Loch in der Wolkendecke ergatterten und nicht in einem Menschmeer eingeklemt waren, das darauf wartete, nach massenmedialer Vorschrift die wiederkehrende Sonne mit Sekt zu begrüßen. Das Glück hatte ich auf einem oststeirischen Aussichtsberg, nicht in völliger Einsamkeit, doch Italiener, Franzosen, Holländer als Nachbarn zu finden, die die Reise wegen Sofi unternahmen, freut und beeindruckt.

Vielleicht wird so mancher künftig den normalen Himmelserscheinungen, Sonnenuntergängen, bemerkenswerten Himmelsphänomenen, sternklaren Nächten (mit und ohne Meteoritenfall) fern vom Licht der Großstadt mehr Aufmerksamkeit schenken! Vielleicht ergibt sich sogar ein Impuls für einen aufgewerteten naturwissenschaftlichen Unterricht!

Verwirrend waren allerdings die Zahlenangaben. Wie schnell bewegt sich der Mondschaten über die Erde? Zweifache Schallgeschwindigkeit, 6000 km/h? Stimmt vielleicht beides? Und warum läuft er von West nach Ost? In eher wenig gelückten Graphiken wurde versucht, die Neigung der Mondbahn zur Ekliptik und ihre Knoten zu veranschaulichen - mit welchem Erfolg? -, doch fragen Sie mal Schüler oder Erwachsene, wie die Mondbahn im heliozentrischen System aussieht! Dabei lassen sich nette Abschätzungen durchführen, die ohne (auch mit) Taschenrechner Verständnis vertiefen.

Wären Erde und Mond im Weltall allein, könnte der Mond tatsächlich eine Kreisbahn um den gemeinsamen Schwerpunkt ausführen. Bei einem dem mittleren Mondabstand von 380000 km entsprechenden Bahnradius und einer Umlaufdauer (siderischer Monat) von 27,32 Tagen ergibt sich eine Geschwindigkeit auf der Mondbahn von 3600 km/h. Auf der Sonnenseite seiner Bahn bleibt er hinter der Erde zurück, oder von der Erde aus betrachtet bleibt er hinter der Sonne zurück, bewegt sich also nach Osten. Durch seine Erdnähe ist die Schattengeschwindigkeit senkrecht zum Abstandsvektor Erde-Sonne praktisch seine Bahngeschwindigkeit. Die Erdrotation erfolgt

ebenfalls nach Osten. Auf der geographischen Breite von Österreich beträgt die Geschwindigkeit der Oberfläche etwa 1100 km/h, so daß der Schatten hier - zu Mittag - etwa mit 2500 km/h wandert, in Asien (Sonnenuntergang) wegen der Krümmung der Erdoberfläche schneller. (Für feinere Details bräuchte man die sphärische Trigonometrie.)

Interessant, und für die Schüler eine kleine Übung, ist es, Erd- und Mondbahn im heliozentrischen System zu zeichnen, natürlich nicht im richtigen Maßstab. Da der Mond auf seiner Bahn etwa mit 1/30 der Geschwindigkeit umläuft, mit der das System Erde-Mond um die Sonne läuft, bewegt er sich um die Sonne auf einer leicht wellenförmigen Bahn, überholt die Erde außen und bleibt innen zurück. Ähnlich bewegt sich der Erdmittelpunkt relativ zum Schwerpunkt des Systems.

Was hat der Sommer sonst noch gebracht? Einiges erfreuliches! Der zweite Lehrgang Pädagogik und Fachdidaktik für LehrerInnen der Naturwissenschaften ist erfolgreich abgeschlossen. 30 höchst engagierte und begeisterte Lehrerinnen und Lehrer aus AHS, HS und Pädak werden in Kürze ihr Abschlußzeugnis erhalten. Mit Ausdauer und viel Einfallsreichtum wurden die Studien erarbeitet, die Forschungsarbeiten zu Aspekten des eigenen Unterrichts darstellen. Während der drei Seminare des zweijährigen Lehrgangs haben die Teilnehmer vielfältigste Beiträge meist als interdisziplinäre Gruppen geleistet. Es würde sich lohnen, diese zu veröffentlichen. Die Studien erscheinen in der Schriftenreihe des IFF.

Sommerakademien geben interessierten und begabten Jugendlichen Gelegenheit, sich im Kreise Gleichgesinnter intensiver mit Themen ihres Interesses auseinander zu setzen. Drei von sieben Kursen der ersten niederösterreichischen Sommerakademie waren naturwissenschaftlichen Themen gewidmet, das Interesse war größer als die Zahl der Plätze - und kein Teilnehmer bedauerte den Entfall einer Ferienwoche. Warum bieten die Unis nicht in den Ferien Schnupperstudien, Sommerschulen für Interessierte an?

Der Lehrplanentwurf 99 ist in Begutachtung. Zum AHS-Physiklehrplan haben die LandesAGs wiederholt ablehnende Stellungnahmen abgegeben, die im Entwurf keine Berücksichtigung gefunden haben. Zum allgemeinen Teil gibt es aus Oberösterreich sehr kritische Stimmen (s. [http://www.pi-linz.ac.at/ahs/zeitung/ahaes\\_3/ahaes3.pdf](http://www.pi-linz.ac.at/ahs/zeitung/ahaes_3/ahaes3.pdf)). Der Auftrag nach Entrümpelung und schlanken Lehrplänen führt in die Unverbindlichkeit. (Das britische National Curriculum zählt nur kurze Ziele auf, den wahren Lehrplan diktieren die Testagenturen, die dicke Kataloge ihrer Fragen verkaufen. Externe Evaluation könnte als Folge schlanker Lehrpläne kommen.)

Doch unabhängig vom Lehrplan: Verstärkt müssen die Ziele, Inhalte und Methoden des naturwissenschaftlichen Unterrichts (nicht nur) von allen Lehrenden durchdacht werden, um die Qualität des Unterrichts positiv weiterzuentwickeln. Kollegiale Weiterbildung und Fortbildung mit externer Unterstützung muß verstärkt werden!

**Fortbildungswoche 2000:** Themenvorschläge, Angebote, neue Ideen - schreiben Sie uns!

Viel Erfolg im neuen Schuljahr wünscht Ihnen

Ihr Helmut Kühnelt

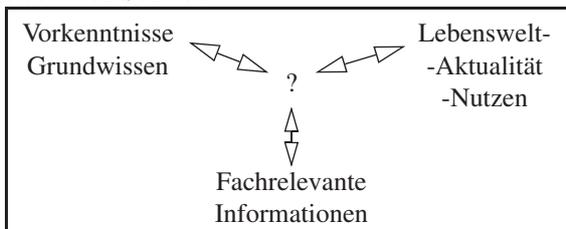
# Chemische Unterrichtsprinzipien

Michael A. Anton

Im Rahmen der Lehrerbildung wird eine Fülle von fachdidaktisch und pädagogisch relevanten Begriffen eingeführt und praxisbezogen erläutert. Hierzu zählen solche wie "Chemie als eine Naturwissenschaft", "Methodik des fachwissenschaftlichen Erkenntnisgewinns", "Lehrpläne und Lehr-Lern-Inhalte", "Ziele des Unterrichtens", "Unterrichtsformen", "Unterrichtsmethoden", "Unterrichtshilfen", "Unterrichts(erfolgs)kontrollen" und nicht zuletzt "Unterrichtsprinzipien". Kein Zweifel, dieses letztgenannte Thema erscheint von allen das am wenigsten Griffige zu sein. Es sieht so aus, als könne man hier nur "schwafeln" und in Gemeinplätzen referieren. Oft wird diesem Begriff auch die nötige pragmatische Umsetzung abgesprochen und er der ausgesprochenen Praxisferne bezichtigt. In jedem Fall lassen sich aber aus diesen Kritikpunkten Argumente für ein Ignorieren herleiten!

Im Folgenden soll nun gezeigt werden, dass es sich bei den "Unterrichtsprinzipien" nicht um eine unverbindliche Laune des Theoretikers handelt. Vielmehr beschreibt dieser Begriff den Rahmen für die besonders sinnvolle, weil schüler- und sachorientierte Flexibilität bei der Wahl aus den Beispiel-pools der anderen Begriffe (s.o.).

Im vorgestellten Modell der Unterrichtsprinzipien geht es primär um eine besonders bedeutungsadäquate Zuordnung von typischen Aspekten der chemischen Lehr-Lern-Inhalte, welche in der Schule im Fach Chemie den "Stoff" ausmachen. Gemeint sind die *fachwissenschaftliche Relevanz* (i.d.R. Notwendigkeit für das chemische Verständnis), die *Beziehbarkeit auf Vorkenntnisse* und jeweils vorhandenes fachliches Grundwissen und die unmittelbare *lebensweltliche Aktualität* bzw. Nutzbarkeit für den Schüler.



Häufig werden die drei Aspekte nur fakultativ und mit zu geringer Deutlichkeit aufeinander bezogen, meist gelingt nur ein oberflächlicher Zweierbezug. Stets verursacht eine unvollständige Bezugnahme jedoch Defizite im Bereich der affektiven Akzeptanz und der kognitiven Anwendung der Inhalte durch den Schüler und unterminiert - fast möchte man sagen traditionsgemäß - den Bildungsanspruch unseres Faches. Vgl. hierzu die Ausführungen von J. A. Stöckhardt: *Die Schule der Chemie oder Erster Unterricht in Chemie*; Braunschweig 1881, hier: Vorwort zur ersten Auflage 1846 (!):

*Die Chemie ist, abgesehen von ihrer Nützlichkeit, die Niemand bestreiten wird, eine so schöne Wissenschaft: sie*

Dr. Michael A. Anton, Ludwig-Maximilians-Universität München, Didaktik und Mathematik der Chemie, Butenandt-Str. 5-13, 81377 München-Großhadern, Fon: 0049-(0)89-2180-7396; Fax: -7856, [mao@cup.uni-muenchen.de](mailto:mao@cup.uni-muenchen.de)  
Workshop und Diskussionsvortrag (25.2.99)

*macht uns erst recht heimisch in unserer allernächster Nähe; sie giebt uns den Schlüssel zu den allgewöhnlichsten Naturveränderungen, zu den zahllosen Veränderungen, die ohne Unterbrechung um uns her vor sich gehen; sie zeigt auch im Kleinsten das Walten einer ewigen Ordnung und Weisheit; sie bildet das Beobachtungsvermögen und den Scharfblick so des Auges wie des Geistes. Und doch wird sie immer noch nicht als ein allgemeines Bildungsmittel anerkannt, noch nicht an allen Gymnasien, in allen Seminaren gelehrt! Eine Wissenschaft, die uns Aufschluss giebt über die gewöhnlichsten Erscheinungen in der Natur, sollte nicht jedem nach Bildung strebenden Menschen von hohem Interesse sein? Eine Wissenschaft, die uns zeigt, dass auch im Kleinsten eine ewige Weisheit, Ordnung und Gesetzmässigkeit herrscht, sollte nicht auch einen wohlthätigen Einfluss auf das moralische Gefühl des Menschen ausüben? Eine Wissenschaft, welsche das Beobachtungs- und Urtheilsvermögen des Menschen schärft, sollte nicht auch um des pädagogischen Nutzens willen, als formales Bildungsmittel, Eingang in höheren Bildungsanstalten verdienen? Kann ein Geistlicher, ein Schulmann, ein Gebildeter überhaupt, unwissend bleiben in den gemeinsten Wahrheiten, die in wenigen Jahrzehnten Eigenthum, wenn auch nicht aller, doch sehr vieler Handwerker uns Landleute sein wird?*

Wir gehen davon aus, dass das obige Bild anders gezeichnet werden muss. Neue Beziehungen zwischen den fachdidaktischen Kriterien erleichtern die Verwirklichung der zurecht unablässig proklamierten Lehr- und Lernbarkeit unserer chemischen Bildungsinhalte.

"Wie gesagt hat das alles etwas mit Chemie zu tun und ist deshalb auch schwierig zu erklären" (Studentin der Physikdidaktik in ihrer Zulassungsarbeit über 'Physikalische Phänomene in der GS', hier zum Thema 'Versuche mit Rotkoh!', München 1998). Vielmehr erwachsen die unterrichtlichen Probleme aus den sehr komplexen Inkongruenzen zwischen ihrem Vermittlungsanspruch und den lernpsychologischen Voraussetzungen des Mittelstufenschülers. In der neuen Übersicht (siehe S. X) werden die erwähnten Beziehungen verdichtet. Von unten nach oben gelesen, sind sie wie folgt zu interpretieren.

Fachinhalte stoßen bei der Vermittlung im Rahmen des Schulunterrichts stets auf analogisierbare Vorkenntnisse. Darunter verstehe ich eine individuell erworbene, sehr pragmatisch bewertete und bewährte Wissensstruktur, die von Schüler zu Schüler in Umfang und Systematik extrem variiert. Diese Deutungssysteme wahrgenommenen Wirklichkeiten oder auch subjektiven Theorien von Jugendlichen der Primarstufe und der Sekundarstufe I, die mit dem Fach Chemie (nicht mit der Chemie!) neu und erstmals in Kontakt kommen, zeichnen sich durch einen besonders hohen Bewährungsgrad aus. Die Vorstellungen von sauren Lösungen, von Werkstoffen, von Verbrennungsvorgängen sind durch vielfache Wahrnehmungen über Sinne und Emotionen als persönliche Erfahrungen vielfach konsolidiert.

Das Ziel des Fachunterrichts besteht in der Relativierung, fallweisen Richtigstellung und fachsystematischen Ordnung von Inhalten, die, grob formuliert, unter der Thematik (Bezugssy-

stem) "Stoffartumwandlungen" subsumierbar sind. In jedem Fall erfahren diese subjektiven Vorkenntnisse einen mehr oder weniger drastischen Bedeutungswandel, der in seiner Begründbarkeit stets *frag-würdig* ist.

Die fachdidaktische Herausforderung besteht in der Integration dieses Grund- und Aufbauwissens in den chemischen "Vorkenntnisstand". Gelingt dies nicht, so wird es neben den Vorkenntnissen abgespeichert und schlimmstenfalls ausschließlich in Prüfungssituationen reproduziert bzw. reorganisiert.

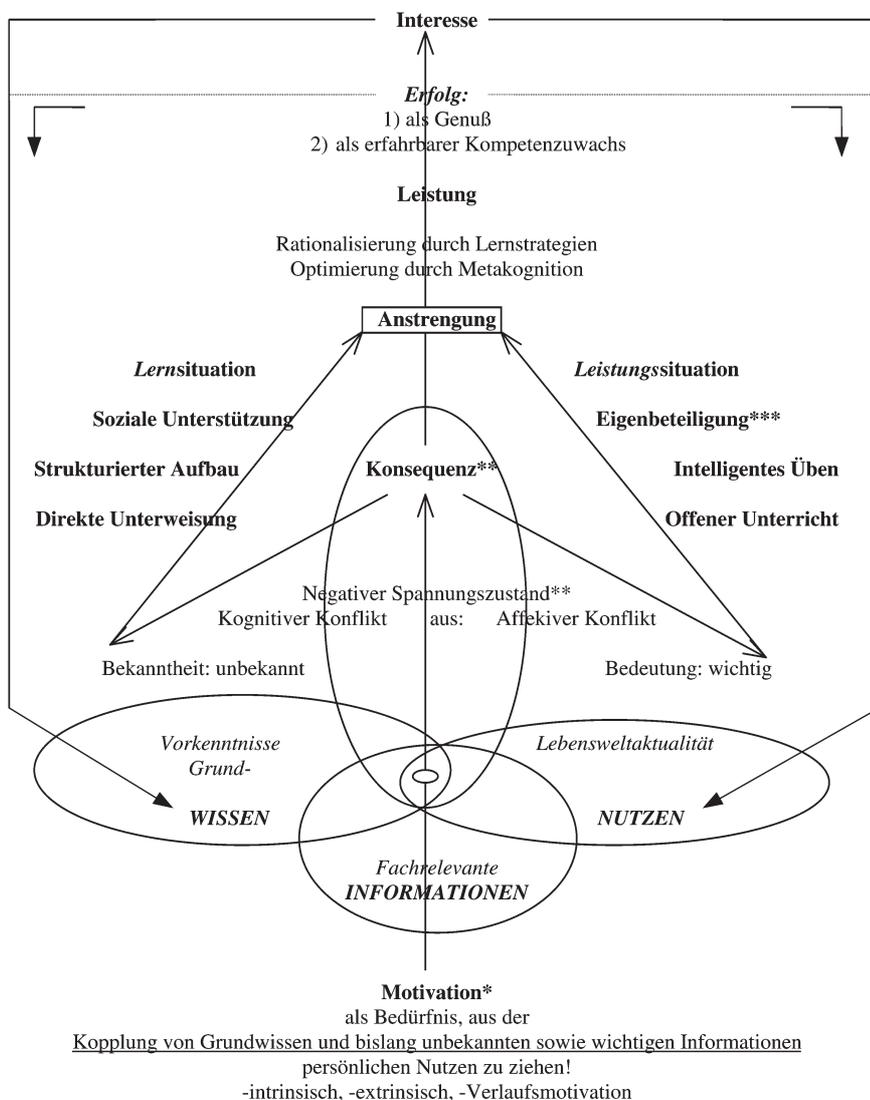
Unsere Bemühungen richten sich deshalb auf die nachhaltige Sicherstellung von Vorbedingungen für das Lehren und Lernen, welche den Bedeutungswandel als hilfreich erleben lassen, die Integration unterstützen und die Separation weniger wahrscheinlich werden lassen.

Zu diesen Konditionen zählen die klare Klassifizierung fachspezifischer Informationen hinsichtlich Bekanntheit und Bedeutung für die aktuelle *und* zukünftige Lebenssituation des Schülers. Der Nutzen erschließt sich allerdings nicht auf Anhieb, was für Lehrer und Schüler gilt. Es erfordert z.T. gewal-

tige fachdidaktische und lernpsychologische Anstrengung, die bei der Erstellung von Lehrplänen wie auch von schultyp- und jahrgangsstufen- sowie klassenspezifischen Stundenbildern zu leisten sind [1]. Gelingt aber die Kombination von "unbekannt" und "wichtig", so kann damit ein negativer Spannungszustand erzeugt werden. Er steht für "Das was ich da noch nicht weiß, möchte ich wissen!". Mit ihm erwächst im Idealfall das Bedürfnis, aus der Kopplung von Vorkenntnissen bzw. später von Grundwissen mit unbekanntem und bedeutsamen Informationen persönlichen Nutzen zu ziehen. Ein Nutzen ist das Erzielen guter Beurteilungen [2]. Eine wünschenswerte Konsequenz ist die Befriedigung dieses Bedürfnisses. Dies ist immer und ausnahmslos mit Anstrengungen verbunden, die besonders am Anfang keinesfalls vom Schüler *allein* erbracht werden können. Um sie in eine effiziente Leistung münden zu lassen, muss die Last auf mehrere Schultern verteilt werden, auf die des Schülers und auf die des Lehrers. Die konstruktivistische Lernleistung [3] des Schülers gelingt in dem Maße wie es der Lehrer versteht, seine mathetischen (Mathetik: Lehre vom Lernen) und didaktischen Leistungen zielgerecht einzubringen. Das Instrumentarium für die praktische Umsetzung

der hier beanspruchten "adaptiven Kompetenz" des Lehrers [4] kann analogisierend mit dem folgenden "Stand der Technik" beschrieben werden. Es handelt sich um einen situativ angepassten Form- und Methodenwechsel, insbesondere um die Trennung von Lern- und Leistungssituationen und damit auch schwerpunktmäßig von Umgangsformen mit Fehlern bei der direkten Unterweisung (Fehlerkorrekturen) bzw. beim offenen Unterrichten (Fehlervermeidung). Ferner handelt es sich um einen adaptiven Wechsel von sozialer Unterstützung bei der Vorstellung von feinstrukturierten Inhalten und schülermitverantworteter Eigenbeteiligung beim intelligenten Üben an systemischen Aufgabenstellungen. Ziel dieses Zusammenspiels ist einerseits die Selektion rationeller Lernstrategien für den einzelnen Schüler und andererseits deren Optimierung mit Hilfe metakognitiver Kompetenzen bis hin zu Problemlöseroutinen.

Nun könnte man behaupten, dass dieser Konnex eher zu den selbstverständlichen Arbeitszielen des Lehrers zählt, und dass letztlich die Anstrengungen als auch die ihnen folgende Leistung schulimmanente Sachverhalte darstellen. Dies stimmt aber nur teilweise. Die geschilderten Zusammenhänge funktionieren ganz besonders im Fach Chemie in mehr als 70 % des Unterrichts nur suboptimal. Nur etwa ein Drittel der Lehrerschaft läßt die adaptive Kompetenz fruchtbar werden. Das mag u. a. auch damit zusammenhängen, dass bei dieser Minderheit die erbrachte Leistung in ausreichend langen Genussphasen münden, mit denen Erfolg erlebt werden kann. Dies einmal kurzfristig als Eupho-



\*Vgl. auch: Rossa, E.: *Experimentieren im Chemieunterricht - bildend, sicher, umweltgerecht.*; in: NiU-Ch 14(1992)3,4-6, 5

\*\*Lehtinen, E.: *Institutionelle und motivationale Rahmenbedingungen und Prozesse des Verstehens im Unterricht*; in: Reusser, K.; M. Reusser-Weyeneth (Hrsg.): *Verstehen*, Bern 1994, S. 143ff

\*\*\* Vgl. auch: Rossa, E.: *Vom fremd- zum selbstbestimmten chemischen Experimentieren.* in: NiU-Ch 14(1992)3, 12-15, 15

rie, aufgrund einer Befriedigung eines motivationalen Bedürfnisses, als "kick", "flow" oder Hochgefühl und ein andermal als dauerhaften Kompetenzzuwachs im Rahmen eines domänenspezifischen Verstehens. Das bedeutet, dem Schüler wird bewußt gemacht, dass sich seine Anstrengungen und Leistungen (aber auch die seines Lehrers) zur Lösung des kognitiven und affektiven Konflikts erfolgreich gelohnt haben. Gerade hieraus entsteht langandauerndes Interesse. Diese Bereitschaft zur aktiven Problembewältigung ist gut dazu geeignet, gleichermaßen neue Konflikte (Fragen) zu provozieren wie an ihrer Auflösung tatkräftig mitzuwirken.

Hier schließt sich der Kreis. Er berücksichtigt nicht nur die neuen Erkenntnisse aus der Lernpsychologie, dass nämlich Interesse durch Leistung erzeugt wird und - zumindest für die Mittelstufenschüler - nicht umgekehrt (!), sondern auch, dass die hier beschriebenen Lehr-Lern-Beziehungen ihre Praktikabilität und Konsistenz auch dann beibehalten, wenn die Lehrerhilfen durch Eigeninitiative des lebenslang Lernenden substituiert werden. Und das ist ja unser aller Unterrichtsziel nach dem Motto: "Unsere Schüler sollen Erfolg haben - außerhalb und nach dem Ende der Schule!"

Diese neue Darstellung macht fachübergreifenden und fächerverbindenden Unterricht -wenn nötig- möglich, fordert ihn jedoch nicht durchgehend ein. Sie integriert ebenso das handlungsorientierende Unterrichten, also eine Lehr-Lern-Leistung, die das aktuelle und zukünftige Handeln und Entscheiden des aufgeklärten Laien begründend zu leiten vermag.

Das Besondere an dieser Darstellung liegt in der Gleichwertigkeit der drei Aspektpakete Wissen, Nutzen, Information. Der dazugehörige Realisierungsvorschlag, der sich durch die *Auswahl weniger Inhalte*, die *Zeitvorgabe* und die damit ermöglichte *Kleinschrittigkeit* sowie *Schülermitverantwortung* ergibt, widmet sich dem Thema:

#### • Einführung in die Elektrochemie

Analog lassen sich auch andere Themen bearbeiten:

- Saure und "fade" Lösungen und die Indikatoren
- Weiterverwendung von Kunststoffen und das Entdecken ihrer Eigenschaften
- Zivilisations- und kulturstiftende Wirkungen chemischer Reaktionen.

Das erste Beispiel war Inhalt des Workshops und sollte in diesem Rahmen einem besonders eingehenden praxisgeleiteten Betrachten und Begreifen unterzogen werden.

Das experimentelle Vorgehen gehorcht einer folgerichtigen und insbesondere kleinschrittig konzipierten Ermittlung von Wahrnehmungen und Deutungen. Hierzu wurde ein Motto zugrunde gelegt: **k.l.a.r.**

**k**.leinschrittig  
**l**ogisch  
**a**.ltruistisch  
**r**.ichtig

Es sei hier der Hinweis erlaubt, dass die vorgestellte Vorgehensweise *keinesfalls* die bestehenden Varianten in der Unterrichtsform und in der Unterrichtsmethode (-verfahren) *ersetzen* soll. Im Gegenteil, Ziel der Vorstellung ist die kritische Auseinandersetzung mit einer *Variante* in der prinzipiellen Konzeption von Chemieunterricht in der Sekundarstufe I (Jgst. 8, 9

u. 10) unter Beibehaltung der grundlegenden Orientierungspunkte:

- Oberste Bildungsziele
- Didaktik und Mathematik der Inhalte
- Bedürfnisse und Fähigkeiten der Schüler und Schülerinnen
- Berufliche Basisanforderungen an Absolventen
- Zeitgeist
- Visionen

Der durch eigene Anstrengung und mit didaktischer Hilfe erzeugte und mittels Reflexion erfahrbar gemachte Kompetenzzuwachs kann mit dem Bild zu den "Unterrichtsprinzipien" überzeugend veranschaulicht werden [5].

Im Diagramm auf der nächsten Seite, das den einen oder anderen sicher an die graphische Darstellung einer endotherm verlaufenden chemischen Reaktion erinnern mag, wird ein bereits gelerntes Grundwissen (geordnetes Fachwissen als objektive Theorie) sowie ein vorgefundener Vorkenntnisstand (ungeordnetes Fachverständnis als subjektive Theorie) zur Induktion von Fragehaltungen verwendet. Die damit eingeleitete Beschäftigung, z.B. mit den Ursachen für den Betrieb eines elektrischen Verbrauchers (Elektrische Eisenbahn) führt zu unterschiedlicher Lehrer- und Schülerbeteiligung. Sie ist jedoch in jedem Fall mit kognitiver Anstrengung verbunden, mit der Ergründung gesetzmäßiger Zusammenhänge und deren Anwendung, damit auch mit dem Lernen von Begriffen und deren Verwendung, mit dem Erleben von Beobachtungen und deren Deutung, mit dem "Erfinden" von Modellen und deren Verallgemeinerung sowie mit dem Entwickeln von Hypothesen und dem 'handling' von Ideen und Gerätschaften bei deren Überprüfung.

Im weiteren Verlauf dieser Auseinandersetzung werden schul- und jahrgangsstufentypische Ziele erreicht. Traditionsgemäß folgt nun ein Üben (z.B. Hausaufgabenstellung), eine Vorbereitung auf aktuelle Prüfungen (Extemporale, Schulaufgabe, Klausur, Abschlußprüfung) und/oder ein Neubeginn zur Durchnahme eines weiteren Inhalts.

Im vorgeschlagenen Fall wird ein "Rückbau" vorgeschaltet, d.h. der Lehrer geht mit den Schülern auf ein systematisierendes und anschließend auf eine systemisierendes Übersichts-niveau zurück. Auf ihm werden die gefundenen Antworten angewendet und getestet. Ziel ist es, das Aufbauwissen als solches zu identifizieren und seinen Nutzen für aktuelle und fallweise akute Problemlösungen aus dem persönlichen Lebensbereich gewinnbringend und genußvoll (!) anzuwenden. *"Interessen werden dort entwickelt, wo Kompetenzzuwachs erfahrbar ist"* (Baumert, Vortrag in Bremen am 16.9.96). Dieser Weg zum neu erworbenen Leistungsniveau ist nur nach vorangegangener Anstrengung möglich. Er erscheint erst als Kontrast gegenüber dem weniger ertragreichen Vorkenntnisstand und Grundwissen lohnenswert. Er erhellt die Tatsache, dass der Schüler nicht mehr derselbe ist wie vorher, was sich nicht auf die kognitiven Qualitäten reduzieren läßt.

Der Weg muss auch so gegangen werden, dass jederzeit die Option zu neuer Anstrengung erhalten bleibt und eine Vertiefung des Stoffes über den angepeilten Level hinaus erfolgen kann. Für den Normalfall geht jedoch ein aufgeklärter Laie aus dem Unterricht hervor, der dies an sich selbst registrieren und deshalb zu neuer Anstrengung bereit werden kann.

In der Graphik wird deutlich, dass der Niveauunterschied zwischen Grund- und Aufbauwissen dem Wissenszuwachs (im konstruktivistischen Sinne, also als selbsterworbene Wissensarchitektur) entspricht. Der Abstand zwischen dem Niveau höchster Anstrengung und dem Endniveau entspricht der gewonnenen Einsicht in die Methoden, die zum Erwerb dieser Erkenntnis geführt haben. Dies wird in dem Maße erleichtert, als die Methoden vom Schüler, etwa in Schülerübungen, exemplarisch selbst angewendet werden können.

Genau diese Zusammenhänge sollen mit Hilfe geeigneter Verdeutlichungen in der Lehrerbildung, hier besonders in Phase III ins Licht gestellt und der Kritik ausgesetzt werden.

### Ein Stromkreis soll mit den folgenden Elementen konstruiert werden:

---

Batterie Akku Graphitstab Glasstab  
 Salzlösung Messgerät Glühbirne Bleistift  
 Glimmlampe Krokodilklemmen Brennstoffzelle  
 Solarwaffel Netztrafo  
 Siliciumscheibe Elektromotor Kabel Drähte  
 Elektrische Eisenbahn

---

Frage: Warum funktioniert die eine Kombination und die andere nicht?

- Spannungsgefälle (Spannungsquelle)
- Kontinuierliche Elektronenwanderung (Stromkreis)
- Widerstände gegen einen raschen Spannungsausgleich (Verbraucher)

Fragen:

Welche Eigenschaften kennzeichnen eine Spannungsquelle?  
 Welche Eigenschaften kennzeichnen einen Leiter 1. Ordnung?  
 Welche Eigenschaften kennzeichnen einen Leiter 2. Ordnung?  
 Welche Eigenschaften kennzeichnen einen Verbraucher?

- Unterschied zwischen  $e^-$ -Mangel und  $e^-$ -Überschuß aufgrund stoffimmanenter Eigenschaften oder äußerem Zwang (Polarisation)

- Freibewegliche Ladungsträger:  $e^-$
- Freibewegliche Ladungsträger: Ionen
- Energieumwandlungsprozesse (Redox-Rkn., Reibung, ...)

Frage: Worin äußern sich diese Eigenschaften konkret und und im Detail, z.B. bei einer elektrochemischen Spannungsquelle?

Im weiteren Verlauf werden diverse Versuchsansätze realisiert, wobei die Frage zu beantworten ist: Welches Verhalten zeigen die Stoffe (Metalle, Nichtmetalle) im Medium Luft bzw. im Medium Wasser?

*Mg-Band, Cu-Blech, Fe-Nagel, Iod-Kristall, Ag-Blech, Chlor in deionisiertem Wasser.*

Im Fall Mg in Wasser kann sehr rasch eine positive Indikator-Reaktion ermittelt werden: Bromthymolblau verfärbt sich von grün nach blau. Eine Blaufärbung der Lösung durch gebildete Kupfer(II)-Kationen läßt sich bereits nach wenigen Stunden feststellen; sie kann durch Zugabe von wenig conc. Ammoniak erleichtert und beschleunigt werden. Bei der Zugabe von Natriumchlorid-Lösung zum Silberansatz ist keine Reaktion ( $AgCl-Nd.$ ) nachweisbar. Die Iodfarbe tritt bald auf; durch Zugabe von  $AgNO_3$ -Lösung lassen sich alsbald über die  $AgI$ -Bildung Iodid-Anionen nachweisen. Noch schneller gelingt der Chlorid-Nachweis im Chlorwasser.

Jedesmal kann direkt oder indirekt gezeigt werden, dass sich im Medium Wasser Elektronentransfer-Reaktionen abspielen. Edle Metalle wie Silber zeigen im beschriebenen Bedingungsrahmen keine Reaktion, womit der Begriff "edel" konkrete Bedeutung erlangt. Die Richtung des Elektronentransfers ist nicht immer gleich und nicht immer gleich stark. Metalle zeigen unterschiedlich deutliche Oxidationsleistungen, Nichtmetalle unterschiedliche Reduktionsleistungen. In jedem Fall bildet sich ein stoffimmanentes Halbzellen-Gleichgewicht heraus, dessen Lage vom resultierenden Verhalten der Atome und Kationen zueinander abhängt. Jeder Stoff besitzt bei standardisierten Bedingungen ein ihm eigenes Gleichgewicht.

Als Schlußfolgerung ergibt sich bei Anwendung der vorhandenen Grundwissensbereiche, dass die Metalle gegensätzliche Aufladung erfahren müssen. Der Fe-Nagel, das Cu-Blech müssen sich demnach aufladen. Metalle erhalten dabei eine negative Ladung, da sich die Elektronen in ihnen anreichern, solange die Kationen in Lösung gehen.

*Bei den Nichtmetallen ( $I_2$ ,  $Cl_2$ ) disproportionieren die Moleküle im Zuge ihrer Reaktion mit Wasser-Molekülen ( $Cl_2 + H_2O \rightarrow HCl + HOCl$ ). Aufgrund der Kompliziertheit beim Vergleich "Me-Nichtme" kann auf die Betrachtung der Nichtmetalle verzichtet werden. Andererseits bietet sich deren Integration in diesen Versuchsrahmen an, wenn die Herleitung der Lösungstensionsreihe und später der Spannungsreihe als ein weiteres Ziel anvisiert wird.*

Aus diesem Vorgang der Oxidationen kann allerdings noch keine Spannungsquelle hergeleitet werden. Es muss hierzu eine weitere Teilversuchsreihe gemacht werden.

*Kupfer-Blech in Silbernitrat-Lösung, Eisennagel in Magnesiumchlorid-Lösung, Zink in Kupfersulfatlösung, Chlorwasser in Kaliumiodid-Lösung, Chlorwasser in Kaliumbromid-Lösung, Zink-Granalie in verd. Salzsäure, Magnesiumband in verd. Schwefelsäure.*

Die jeweiligen Abscheidungs Vorgänge werden miteinander verglichen und geordnet. Es gilt, Metall-Kationen scheiden sich dann leicht als Atome ab, wenn sie sich anhand des zugrunde liegenden hohen Abscheidungsdrucks als besonders unedel erweisen: Kupfer an Zink, Silber an Kupfer.

*Die Analogie bei Nichtmetallen und beim System Metall und Säure ( $H_3O$ -Kationen) ist entsprechend der oben genannten unterschiedlichen Bedingungen fallweise zu beachten bzw. nicht mit einzubeziehen.*

Die Folgerungen sind eindeutig. Bei der Kombination von Atomen und Kationen (bzw. von Anionen und Molekülen) unterschiedlicher Metall-Elemente kommt es zu Redox-Vorgängen. Diese ergeben sich in ihrer Richtung und Stärke aus den elektrochemischen Eigenschaften der beteiligten Elemente. Einige Halbzellenkombinationen zeigen sehr effiziente Reaktionen, andere wiederum nicht. In jedem Fall muss jedoch ein "Kurzschluss angenommen werden. D. h. die Elektronen gehen unmittelbar vom negativierten Metall zum gelösten Kation und die Solvatisierung der entstehenden Kationen des weniger edlen Metalls geschieht im Austausch zur Desolvatisierung der Kationen des edleren Metalls aus der Lösung. Diese Vorgänge sind auch durch ihre Energetik charakterisierbar. Edlere Metalle sind als Atome stabiler denn als Kationen. Unedlere Metalle sind als Kationen energieärmer. Der begehrte Zustand wird entlang eines Energiegefälles spontan eingestellt, wenn die Gelegenheit des Elektronentransfers aufgrund eines Kontakts gegeben ist.

Die jetzt aufkeimende Idee besteht in der experimentellen Konstruktion eines längeren Weges für die Elektronen und zusätzlich eines Abschnittes, innerhalb dessen die Energie, welche durch den Stabilitätsgewinn umwandelbar wird, auch gewinnbringend umgewandelt werden kann. Die so konzipierte Versuchsanordnung entspricht im einfachsten Fall dem Entwurf des Daniell-Elements. *In je ein Becherglas wird eine molare Lösung von Zinksulfat bzw. Kupfersulfat gegeben. Zinkstab und Kupferstab werden zugehörig eingetaucht, mit einer leitenden Verbindung (Kabel mit Krokodilklemmen) über einen Elektromotor oder ein Glühlämpchen oder ein Messgerät*

*(Ampere- oder Voltmeter) miteinander verbunden. Am Verbraucher rührt sich nichts. Die Fehlersuche führt zur nötigen Verbindung der beiden Becherglasinhalte über einen Stromschlüssel (KCl-Lösung).*

Jetzt ist Stromfluss interpretierbar: über den laufenden Motor, das glimmende Lämpchen, den Zeigerausschlag. Mit diesem Schritt ist die elektrochemisch funktionierende Spannungsquelle entdeckt und es kann an ihrer Optimierung gearbeitet werden. Hierbei ist beim Arbeiten vor Ort sehr wichtig, diesen Abschnitt gebührend herauszuarbeiten. Ziel ist es ja, Sie erinnern sich, Kompetenzzuwachs erlebbar zu machen.

Im weiteren Verlauf werden anhand von Teilversuchsfolgen Lösungen und Elektroden ausprobiert, die in ihrer Kombination immer noch bei ca. 1,0 bis 1,5 V Spannung liegen, die aber hinsichtlich Materialkosten und Verschleißbarkeit ("Trockenelement") wirtschaftlich interessanter und alltags-tauglicher sind als das gebildete galvanische Element aus Zink und Kupfer oder gar ein anderes aus Zink und Gold.

*Auf diesem Wege wird durch den Austausch von  $CuSO_4$ -L. durch  $NH_4Cl$ -L., dann von  $ZnSO_4$ -L. durch dieselbe L. und abschließend von Kupfer durch Kohlenstoff das Leclanché-Element kreiert. Das Aufsägen einer Taschenlampen-Batterie läßt diese Bauteile tatsächlich erkennen. Die Diskussion für die Anwesenheit von Füllmaterial und Braunstein kann anschließend folgerichtig begründet werden.*

Am Ende dieses Schrittes kann erneut der Kompetenzzuwachs, bezogen auf das trial-and-error-Verhalten am Anfang verdeutlicht werden.

Der Weg durch die Elektrochemie ist allerdings noch nicht zu Ende. Die Diskussion um größere Spannungen, wiederverwendbare Akkus und letztlich die elektrochemische Nutzung von Lichtenergie führen fast automatisch zu einem analogen kleinschrittigen Bearbeiten der Problemlage.

So kann jetzt mit Hilfe der Batterie Wasser (verd. Sre) im Hofmannschen Zersetzungsapparat in Wasserstoff und Sauerstoff elektrolysiert werden. Beide Gase können als Knallgasreaktion wiedervereinigt werden oder gewinnbringend in eine Brennstoffzelle eingebracht werden. Die didaktische Reduktion des Halbleiterproblems und die Erklärung des Verhaltens von dotiertem Si in Solarwaffeln führen zu einem Schlußversuch.

*Auf deduktivem Wege wird der "Hofmann" mit einer 4.5 V-Waffel bei Sonnenschein betrieben.*

Die Lichtquelle Sonne ist auch im Modellversuch dem Licht des OH-Projektors vorzuziehen!

- [1] Haas, A.: *Unterrichtsplanung im Alltag*, Roderer, Regensburg 1998
- [2] Vgl. Anton, M. A.: *Chemieakzeptanz und Didaktik. Wie hat Chemieunterricht Zukunft?*; in: Chem. Sch. 45 (1998) 3, 180-183, 180.
- [3] Vgl. Mandl, H.; G. Reinmann-Rothmeier: *Unterrichten und Lernumgebungen gestalten*; Forschungsbericht Nr. 60, Empir. Päd. u. Päd. Psychol., LMU-München 1995.
- [4] Vgl. Anton, M. A.: *Die Reaktionsenthalpie - Woher kommen die Zahlenwerte?*; in: Chem. Sch. 45 (1998) 4, 207-211, 211.
- [5] Vgl. auch: Anton, M. A.: *Die "Selbstverständlichkeit" der Chemie und die "Unverständlichkeit" des Chemieunterrichts - zur Überwindung eines Dilemmas*; in: Chem. Sch. 45 (1998) 6, 384-385.

# Das Hubble-Weltraumteleskop

## Neue Perspektiven für die Astronomie – Teil 2

Karl-Heinz Lotze

### Anfangs- und Endstadien der Sternentwicklung

Wir verlassen nun das Reich der extragalaktischen Nebel und begeben uns in unser Milchstraßensystem. Dort existiert eine große Anzahl galaktischer Sternhaufen und Nebel, die man in ihrer Vielfalt unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Sterne zuzuordnen gelernt hat.

Beginnen wir mit den H II-Gebieten ionisierten Wasserstoffs wie dem Adlernebel M16 im Sternbild Schlange (Abb. 18) und dem Lagunennebel M8 im Sternbild Schütze (Abb. 19). In der Nachbarschaft dieser H II-Regionen befinden sich Molekülwolken, in denen bei Temperaturen von nur 30 K der Wasserstoff molekular vorliegt. In diesen Molekülwolken entstehen heute noch Sterne [PFA] - wenn auch, wie wir inzwischen wissen, nicht mehr so häufig wie im frühen Universum.



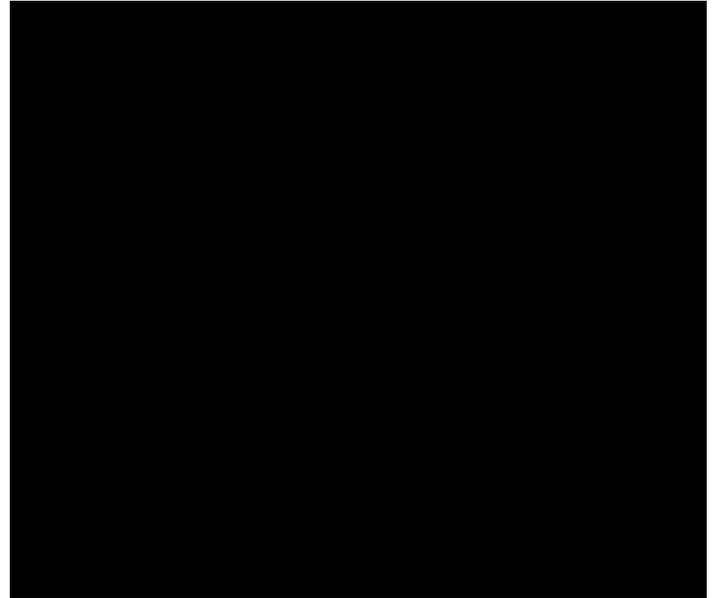
In den H II-Gebieten selbst beträgt die Temperatur 10000 K, so daß Wasserstoff nicht molekular vorkommen kann. Es würden nicht nur die Moleküle durch die UV-Strahlung benachbarter junger, heißer Sterne dissoziiert. Atomarer Wasserstoff wird sogar ionisiert, und es sind gerade die scharfen Ionisationsfronten, die beiden Abbildungen ihr geradezu plastisches Aussehen geben. Der ionisierte Wasserstoff ist grün codiert; rot steht für einfach ionisierten Schwefel und blau für doppelt ionisierten Sauerstoff.

Die Gassäulen des Adlernebels sind besonders dichte Wolken molekularen Wasserstoffs, die aus einer dunklen Molekülwolke herausragen und der Photoerosion durch UV-Strahlung bislang widerstanden haben. Die längste von ihnen mißt etwa 1 Lichtjahr, und wir sehen sie aus einer Entfernung von 7000

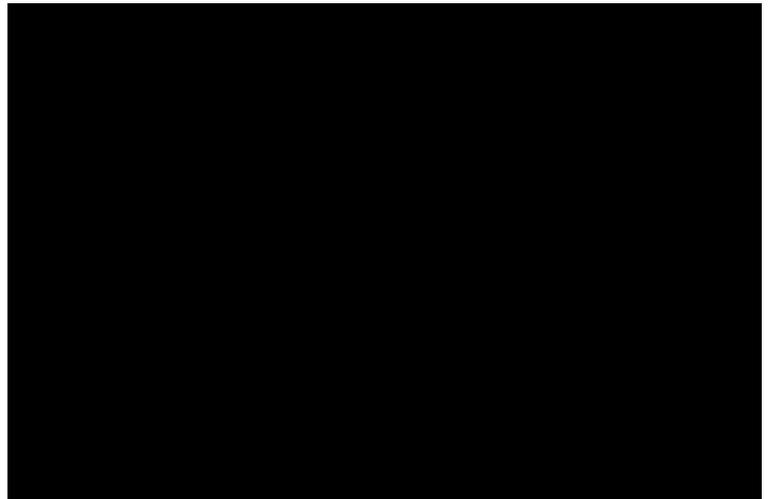
---

Doz. Dr. Karl-Heinz Lotze, Friedrich-Schiller-Universität Jena, AG Physik- und Astronomiedidaktik, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena  
Nachdruck aus *Praxis der Naturwissenschaften - Physik 3/47 (1998)* mit freundlicher Genehmigung des Aulis Verlags Deubner & Co, Köln

Lichtjahren. Im Innern ist die Dichte des Gases so hoch, daß Sterne entstehen können. Auch die "verdampfenden" Gasglobulen an den Spitzen der Säulen könnten Sternembryos beherbergen.



Bei dem 5000 Lichtjahre entfernten Lagunennebel geht ein Teil der ionisierenden Strahlung von dem Stern in der Bildmitte mit der Bezeichnung Herschel 36 aus. Die vertikalen Kämmen im unteren rechten Bildteil, die nur etwa 5 Lichttage (!) breit sind, machen das Hineinströmen von Sternwinden in die kühleren Teile der Wolke sichtbar. Die meisten der neu entstandenen Sterne kann man hingegen optisch nicht nachweisen, da ihr Licht von mikroskopischen Staubteilchen absorbiert wird.



Wie die Abbildung der großen Molekülwolke OMC-1 im Orion-Nebel durch die NIC-MOS-Kamera zeigt (Abb. 20), werden im infraroten Spektralbereich sogar ein offener Sternhaufen und der durch seine Sterne aufgeheizte interstellare

Staub erkennbar. Im Zentrum der Aufnahme, deren Diagonale eine Strecke von knapp 5 Lichtmonaten darstellt, befindet sich ein massereicher junger Stern - ein sogenanntes Becklin-Neugebauer-Objekt. Die wolkigen Gebiete um das helle Objekt im rechten Bild stellen molekularen Wasserstoff dar.

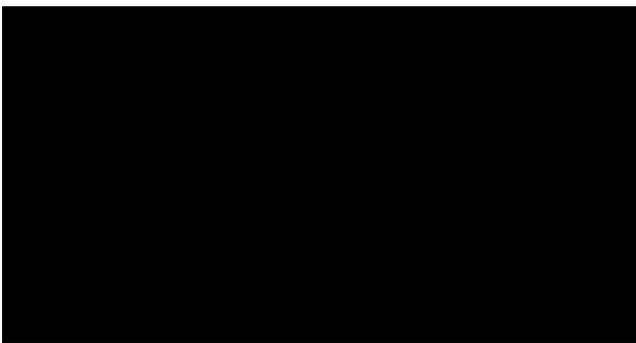


Abb. 21: Von der Kante gesehene protoplanetare Scheibe um einen jungen, im Orion-Nebel entstandenen Stern

Der Orion-Nebel beherbergt in einer Entfernung von 1500 Lichtjahren das uns nächstgelegene Sternentstehungsgebiet. Daher war es auch möglich, gleich mehrere junge Sterne mit zirkumstellaren Scheiben zu beobachten, aus denen Planeten hervorgehen könnten. Abb. 21 zeigt eines von insgesamt sechs bekannten Beispielen. Die von der Kante gesehene protoplanetare Scheibe aus Gas und Staub hat etwa den 17fachen Durchmesser des Sonnensystems, wenn man letzteren als den doppelten Abstand des Pluto von der Sonne definiert. In der Bildmitte ist das Streulicht des erst etwa eine Million Jahre alten Zentralsterns sichtbar. Es ist auch mit dem HST nicht möglich, Klumpungen innerhalb dieser Scheibe nachzuweisen, die auf bereits entstandene Planeten hindeuten könnten. So kann man zwar nicht sagen, daß das HST Planeten um junge Sterne nachgewiesen hätte, es hat aber Gebiete ausgemacht, wo Bedingungen herrschen, unter denen Planeten entstehen können und vielleicht auch unser Sonnensystem vor 4,5 Milliarden Jahren entstanden ist.

Wenn in einem Protostern die Fusion von Wasserstoff zu Helium beginnt, tritt ein - zumindest für sonnenähnliche Sterne - mehrere Milliarden Jahre lang anhaltender Gleichgewichtszustand ein. Der Schweredruck mit seiner Tendenz, den Stern unter seinem eigenen Gewicht kollabieren zu lassen, wird durch den hydrostatischen Druck aus dem Sterninnern ausbalanciert. Spektakuläre Bilder kann man aus dieser ruhigen Phase der Sternentwicklung nicht zeigen, jedoch verdanken wir gerade ihr unsere eigene Existenz.

Ist das Zentralgebiet eines Sterns mit Helium angereichert und der Wasserstoff dort verbraucht, findet das Wasserstoffbrennen in einer über dem Kern liegenden Schale statt. Gleichzeitig schrumpft der Heliumkern und heizt sich auf, bis Helium in Kohlenstoff und Sauerstoff umgewandelt wird. Äußerlich wird der Stern zu einem Roten Riesen, bei dem ein extrem dichter, kleiner Kern von einer sehr dünnen, kühlen und ausgedehnten Hülle umgeben ist. Viele Rote Riesen stoßen die ohnehin nur lose gebundene Hülle ab; es entsteht ein sogenannter Planetarischer Nebel. Der Kern des ehemaligen Roten Riesen ist nun selbst ein Stern, der, wenn er seinen Kernbrennstoff verbraucht hat, zu einem Weißen Zwerg wird. Die Planetarischen Nebel sind zwar nicht in ihrer äußeren Form den H II-Gebieten vergleichbar, haben aber mit ihnen gemeinsam, daß

ihr Wasserstoffgas durch die UV-Strahlung des Zentralsterns ionisiert und zum Leuchten angeregt wird.

Obwohl diese Phase der Sternentwicklung mit einer Dauer von einigen tausend Jahren sehr viel kürzer ist als die der Fusion von Wasserstoff zu Helium, ist sie doch viel zu lang, als daß man die Entstehung eines einzelnen Planetarischen Nebels verfolgen könnte. Es bleibt also nur die Hoffnung, verschiedene Objekte zu finden, deren unterschiedliche Entwicklungsstadien sich schließlich zu einem Gesamt-Szenarium zusammenfügen lassen. Wir wählen zwei Beispiele aus, die bemerkenswert viele Details zeigen.

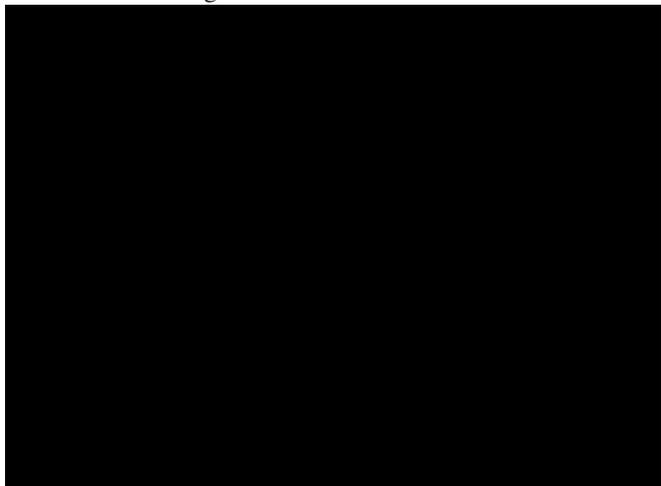


Abb. 22: PRC 96-05 Der Planetarische Nebel NGC 7027

Der Planetarische Nebel NGC 7027 befindet sich im Sommersternbild Schwan und ist 3000 Lichtjahre entfernt. Die äußeren schwachen, konzentrischen Schalen in Abb. 22 deuten darauf hin, daß das Abstoßen der Sternatmosphäre anfangs langsam, sphärisch und schubweise geschieht. Bei den gelb-orange dargestellten Staubwolken ist die sphärische Symmetrie bereits verloren gegangen. Schließlich sieht man den Zentralstern, der schon viele Eigenschaften eines Weißen Zwergs hat.

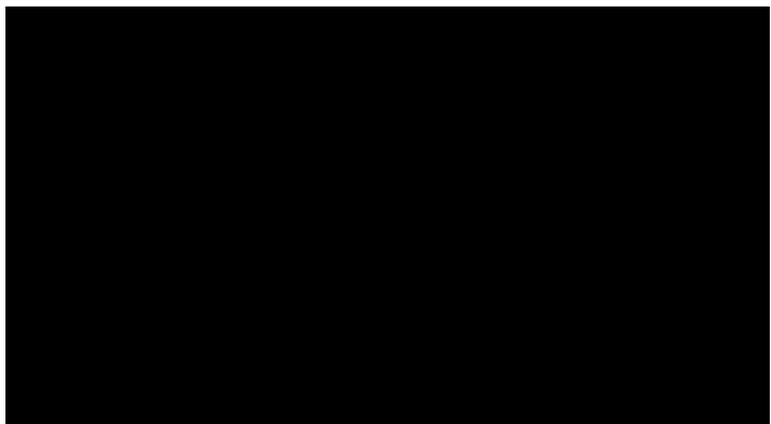


Abb. 23: PRC 97-11 Der Planetarische Nebel CRL 2688 in je einer Aufnahme mit der Weitwinkelkamera WF/PC2 (li) und der Infrarotkamera NICMOS (re). Der Abstand zwischen den Enden der diametral entgegengesetzten Jets im rechten Bild ist so groß wie der 200fache Durchmesser des Sonnensystems

Die konzentrischen Schalen des Planetarischen Nebels CRL 2688 (Abb. 23 links) verraten noch deutlicher die Episodenhaftigkeit des Abblasens der Sternhülle. Aus dem Winkeldurchmesser der Schalen, ihrer gemessenen Expansionsgeschwindigkeit von 20 km/s und der Entfernung des Nebels von

3000 Lichtjahren folgt, daß die Schübe in Abständen von 100 bis 500 Jahren erfolgt sind. Damit überblicken wir in diesem einen Bild, den Jahresringen von Bäumen vergleichbar, etwa 10000 Jahre der Geschichte eines alternden Sterns. Der Blick auf den Zentralstern selbst wird durch Staub behindert. Die bemerkenswerten gekreuzten "Speichen", die wie ein Leuchtfeuer von dem Stern ausgehen, könnten Sternlicht sein, das durch Löcher in dem Staub-Cocoon nach außen dringt oder aber von Materieströmen reflektiert wird, die der Stern aussendet. Daß solche "Jets" existieren, beweist die farbcodierte Infrarotaufnahme mit der NICMOS-Kamera (Abb. 23 rechts). Die blau gefärbten Partien kennzeichnen an Staub reflektiertes Sternlicht, die rot gefärbten Wärmestrahlung von molekularem Wasserstoff aus der Hülle des ehemaligen Roten Riesen.

Wie wir wissen, hängt das Schicksal alternder Sterne von ihrer Masse ab, und nicht alle Sterne verlieren ihre Hüllen in Gestalt Planetarischer Nebel, um selbst als Weiße Zwerge zu enden [KIP]. Bevor wir auf andere Endstadien der Sterne eingehen, wollen wir uns kurz den Kugelsternhaufen zuwenden, die wir als die ältesten Objekte im Universum bereits erwähnt haben.

R. Feynman [FEY] schrieb über Kugelsternhaufen wie z.B. 47 Tucanae (Abb. 24): "Dieser große weiße Fleck ... sieht nur so aus, weil das Auflösungsvermögen der Instrumente versagt. In Wirklichkeit besteht er aus lauter winzig kleinen Pünktchen, wie andere Sterne auch, die, säuberlich voneinander getrennt, sich selbst dann nicht berühren, wenn sie sich in diesem großen Kugelhaufen hin- und herbewegen. Er gehört zu den schönsten Dingen am Himmel und steht der Meeresbrandung oder den Sonnenuntergängen an Schönheit in nichts nach."

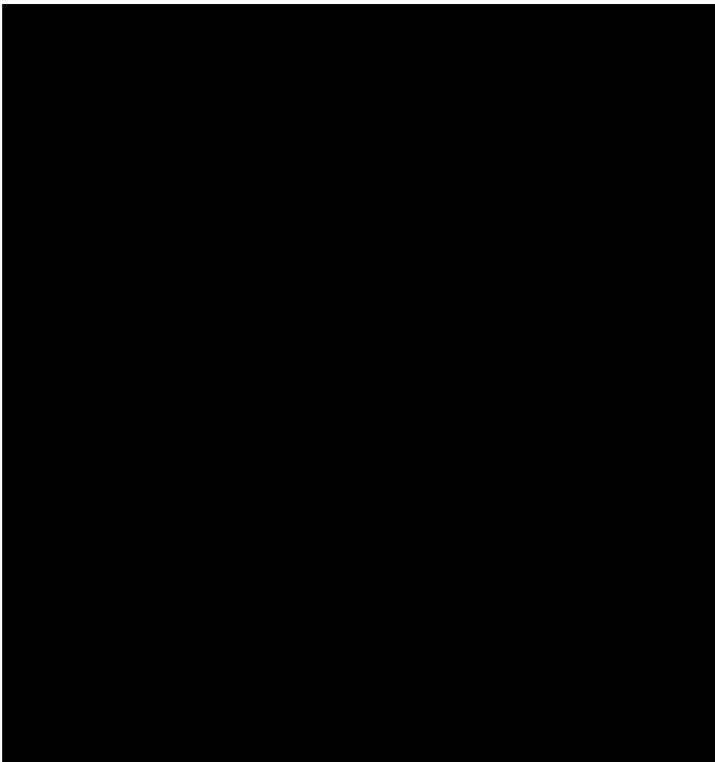


Abb. 24: Der Kugelsternhaufen 47 Tucanae in einer Aufnahme der Europäischen Südsternwarte in Chile. Er befindet sich im Sternbild Tukan und ist 15 000 Lichtjahre entfernt.

Das HST ist in der Lage, die "weißen Flecke", also die Zentralregionen der Kugelsternhaufen in einzelne Sterne aufzulösen. Während der typische Abstand zwischen den Sternen der Son-

nenumgebung etwa 15 Lichtjahre beträgt, sind die Sterne im Innern der Kugelhaufen im Mittel nur 3 Lichttage (!) voneinander entfernt. Da ein Kugelsternhaufen eine sehr dichte Ansammlung alter Sterne ist, überrascht es nicht, daß unter diesen Weiße Zwerge gefunden wurden. Jedoch entstehen unter den Bedingungen, die im Zentrum der Kugelhaufen herrschen, auch ganz neue Klassen von Sternen. So wurden in dem dichten Kugelhaufen M15, der in 30000 Lichtjahren Entfernung im Sternbild Pegasus steht, 15 sehr heiße Sterne mit Oberflächentemperaturen von 30000 K gefunden. Die meisten davon befinden sich in einer gedachten Kugel mit einem Radius von nur knapp einem halben Lichtjahr (Abb. 25). Während Rote Riesen ihre äußeren Hüllen von selbst abblasen, scheinen sie diesen Sternen durch die Gezeitenwirkung anderer, vorbeiziehender Sterne entrissen worden zu sein. Dadurch liegen ihre Zentralgebiete, in denen die Energie erzeugt wird, frei. Sie entwickeln sich fortan anders, als wenn sie ihre Hüllen behalten hätten.

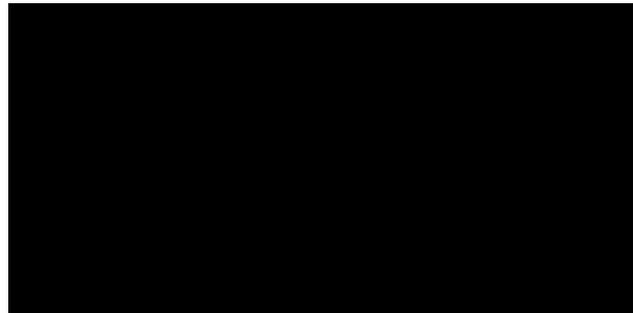
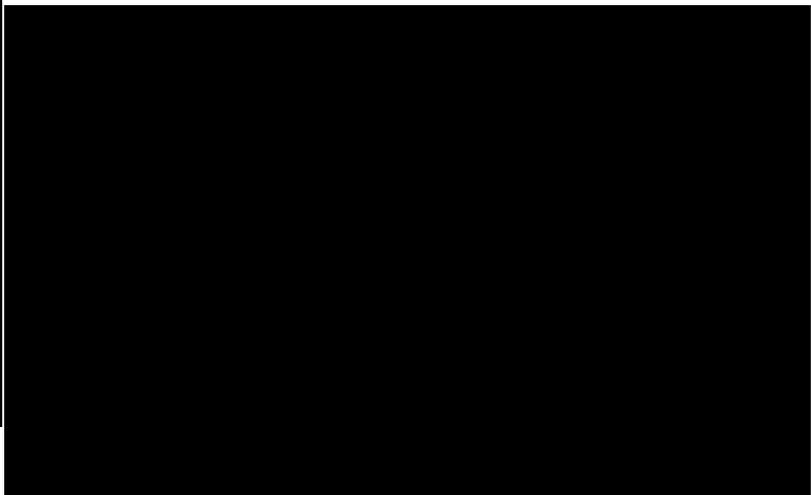


Abb. 25: Das Zentrum des Kugelsternhaufens M15

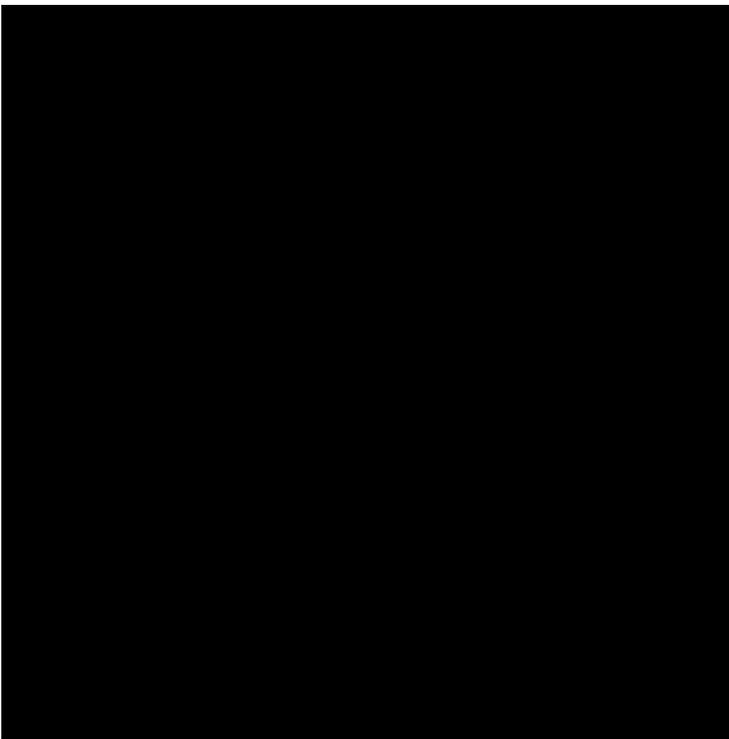
Und noch eine Klasse von Sternen wurde in den Kugelhaufen M15 und 47 Tucanae gefunden: die sogenannten "blue stragglers". Unter den vielen, erwartungsgemäß alten Sternen des Kugelhaufens leuchten sie im blauen Licht junger Sterne. Dadurch, daß zwei Sterne beim Stoß oder als Komponenten eines Doppelsterns miteinander verschmelzen, entsteht ein Stern größerer Masse. Dieser Massengewinn ermöglicht dem Stern ein "Zurückstellen seiner Lebensuhr", denn nun sind nukleare Fusionsprozesse wieder möglich, die in den bereits gealterten Sternen vor der Verschmelzung nicht mehr hätten ablaufen können.



Aufnahme der Europäischen Südsternwarte vom 27.2.1987

Wir kommen nun zu den Endphasen der Individualentwicklung massereicherer Sterne, die sich in einer Supernova-Ex-

plosion ihrer äußeren Hülle entledigen. Das seit Jahrhunderten eindrucksvollste Ereignis dieser Art wurde am 23. Februar 1987 in der Großen Magellanschen Wolke entdeckt [SEG]. In der Nähe des Tarantelnebels leuchtete eine Supernova auf (der helle Stern im unteren Bildteil von Abb. 26), die seither die Bezeichnung SN1987A trägt. Die Vorgängersterne von Supernovae durchlaufen eine Folge von Kontraktionen und Kernreaktionen, wobei immer schwerere Elemente bis zum Eisen fusioniert werden. Danach kollabiert der Eisenkern, bis sich ein stabiler Neutronenstern mit der Dichte von Kernmaterie bildet. In diesem Stadium wird die Implosion des Sterns gestoppt, und es entsteht eine nach außen gerichtete Schockwelle, die die Hülle des Sterns abbläst. SN1987A ist zwar kein typischer Vertreter dieser sogenannten Supernovae vom Typ II, da bislang der Neutronenstern-Überrest nicht gefunden wurde. Auch war diese Supernova etwa einhundertmal schwächer als andere dieses Typs, die für kurze Zeit heller sein können als die ganze Galaxie, die sie beherbergt. Dafür ist sie uns aber so nahe, daß die Explosionsdynamik im Detail verfolgt werden kann (Abb. 27).



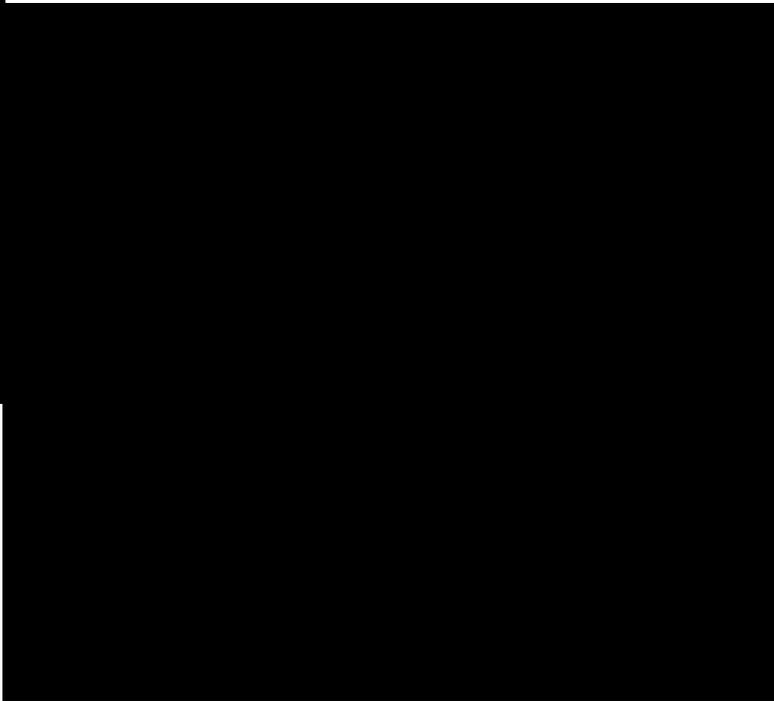
*Abb. 27: PRC 97-03 Die Supernova SN1987A mit ihrem Ringsystem in einer Aufnahme vom September 1994 und (darunter) die Gestaltentwicklung des infolge der Explosion entstehenden "Supernova-Überrestes"*

Die Supernova SN1987A ist von einem hellen Ring umgeben, dessen Materie bereits etwa 10000 Jahre vor der Explosion vom Vorgängerstern in einer Spätphase seiner Entwicklung ausgestoßen wurde. Durch die UV-Strahlung des Supernova-Ausbruchs wurde der Ring zum Leuchten angeregt. Daß er als Ellipse erscheint, zeugt davon, daß der in Wirklichkeit kreisförmige Ring gegen die Tangentialebene geneigt ist, die man sich am Ort der Supernova an die Himmelssphäre gelegt denken kann. Durch diese Schräglage und die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes bedingt, wurde die dem irdischen Beobachter zugewandte Ringpartie zuerst und die von ihm abgewandte erst später sichtbar, obwohl "vor Ort" alle Teile des Rings gleichzeitig von der UV-Strahlung des Zen-

tralsterns erreicht wurden. Aus dem allmählichen Sichtbarwerden des Rings und den Winkelmaßen seiner großen und kleinen Achse kann man schon mit elementaren Mitteln die Entfernung zur Supernova SN1987A zu 170000 Lichtjahren bestimmen [HSTX].

In den 10 Jahren nach der Supernova-Explosion haben sich die dabei ausgestoßenen Gasmassen etwa 2 Lichtmonate vom Zentrum entfernt. Es ist erkennbar (Abb. 27 unten), daß die Gasmassen bipolar in Richtung der kleinen Achse des hellen Ringes auseinanderfliegen, so daß die Achse der dadurch entstehenden "Hantel" auf der Ringebene senkrecht steht wie auch die des Doppelkegels, den man erhält, wenn man die beiden anderen, schwächeren Ringe mit dem Zentralstern verbindet. Weitere interessante Aufschlüsse über die Dynamik der Supernova-Explosion werden sich ergeben, wenn voraussichtlich im Jahre 2002 die Explosionswolke den inneren Ring einholen wird.

Supernova-Explosionen sind für den chemischen Aufbau des Universums von großer Bedeutung. Wir wissen, daß in den "ersten drei Minuten" der kosmischen Entwicklung nur die Elemente Wasserstoff und Helium mit ganz geringen Beimengungen von Lithium und Beryllium synthetisiert werden konnten. Alle schwereren Elemente, insbesondere auch die für die Entwicklung organischen Lebens entscheidenden, sind in den Sternen entstanden und beim Ausstoßen von Planetarischen Nebeln und Supernova-Überresten an den interstellaren Raum zurückgegeben worden. Dadurch erhält der poetische Satz "Wir sind nur Sternenstaub" eine physikalische Bedeutung. Alle uns umgebende Materie, auch der Stoff, aus dem wir selbst sind, hat schon mindestens einmal den Lebenszyklus der Sterne durchlaufen.



*Abb. 28: Ausschnitt aus dem als Cygnus-Bogen bekannten Supernova-Überrest*

Wie dies im einzelnen geschehen kann, zeigt ein kleiner Ausschnitt aus dem als Cygnus-Bogen bekannten Überrest einer Supernova-Explosion, die sich in einer Entfernung von 2600 Lichtjahren vor etwa 15000 Jahren im Sternbild Schwan ereignet hat (Abb. 28). Die von der Supernova ausgehende Schockwelle trifft auf interstellares Gas, verdichtet dieses,

heizt es auf und regt es zum Leuchten an. Es entsteht die relativ scharfe Schockfront, die das Bild entlang der von links unten nach rechts oben verlaufenden Diagonale durchzieht. Der von oben nach unten verlaufende blaue Strahl ist sehr wahrscheinlich von der Supernova ausgeschleudertes Gas, das mit einer Geschwindigkeit von etwa 1400 km/s in die durch das interstellare Medium gebremste Schockfront hineinrast. In den dabei entstehenden lokalen Verdichtungen können sogar, von außen angeregt, neue Sterne entstehen. Ob auch unsere Sonne so entstanden ist, wissen wir nicht. Jedenfalls enthält sie aber zu viel an schweren Elementen, als daß sie der ersten Stern- generation angehören könnte.

Eine Supernova-Explosion in unserem Milchstraßensystem wäre ein astronomisches Ereignis ersten Ranges. Wann sich ein solcher Ausbruch ereignen wird, wissen wir nicht, aber die "Hoffnungen" ruhen auf dem mit 80 Sonnenmassen besonders massereichen Stern Eta Carinae, dem Zentralstern des Carina- Nebels NGC 3372 (am oberen Bildrand von Abb. 29). Dieser Stern ist bereits Edmund Halley 1617 aufgefallen. Nach einem Ausbruch im Jahre 1843 war er nach Sirius der zweithellste Stern am Himmel, ist dann aber wieder verblaßt. Wie wir seit den Beobachtungen mit dem HST wissen, hat die Explosions- wolke von damals ebenfalls jene bipolare Struktur, der wir schon mehrfach begegnet sind. Es ist nicht nur bemerkens- wert, daß sich in nur 150 Jahren beobachtbare Veränderungen eines Sterns vollziehen; das wird durch die große Masse im Prinzip verständlich. Eine ausgefeilte Bildverarbeitungste- chnik hat es nun sogar ermöglicht, Veränderungen sichtbar zu machen, die binnen 17 Monaten (!) ablaufen. Abb. 30 ist durch Überlagerung zweier Aufnahmen des HST vom April 1994 und September 1995 entstanden. Die Sternmaterie auf der äl- teren Aufnahme ist schwarz, die auf der jüngeren weiß darge- stellt. Obwohl Eta Carinae 8000 Lichtjahre entfernt ist, sind die kleinsten abgebildeten Strukturen nur etwa so groß wie das Sonnensystem. Man erkennt auch deutlich, daß sich - wie zu erwarten - die ausgeschleuderte Materie in der Nähe des Sterns schneller bewegt als die in größerer Entfernung.

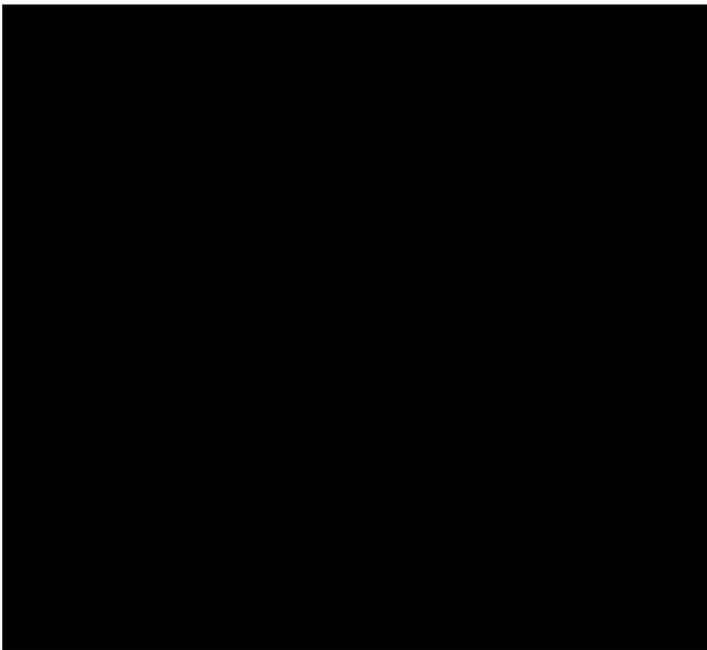


Abb. 29: Der Carina-Nebel NGC 3372 mit dem hellen Stern Eta Carinae



Abb. 30: PRC 96-23b Superposition zweier Aufnahmen des Sterns Eta Carinae vom April 1994 und September 1995

Angesichts der großen Masse ist die Vermutung nicht abwe- gig, daß die Supernova-Explosion, zu der es dereinst vielleicht kommt, statt eines Neutronensterns ein Schwarzes Loch hin- terlassen wird.

### Die äußeren Planeten des Sonnensystems

Wir beschließen unseren Streifzug durch Astronomie und Astrophysik anhand von Aufnahmen des Hubble-Weltraumte- leskops mit einem - im Vergleich zu den vorangegangenen Ab- schnitten - kurzen Blick auf die äußeren Planeten des Sonnen-



Abb. 31: PRC 97-09a Der Mars in Opposition zur Sonne im März 1997

Den größten Teil unserer Kenntnisse über vergleichende Pla- netologie, die Physik und Chemie der Oberflächen und Atmo- sphären der Planeten und ihrer Satelliten sowie über die Ent- stehung des Sonnensystems [GUR] verdanken wir naturgemäß künstlichen Raumflugkörpern wie z.B. den Voyager-Sonden, die eigens zum Zwecke der Planetenerforschung das Sonnen- system durchfliegen oder auf seinen Planeten landen. Der Vor- teil des HST besteht darin, daß es während der 15 Jahre seiner Betriebsdauer Langzeitbeobachtungen und Beobachtungen im

ultravioletten und infraroten Spektralbereich von Wetter- und Oberflächenerscheinungen der Planeten und ihrer Satelliten durchführen kann. Wir beschränken uns im folgenden darauf, wenige Aufnahmen der Planeten Mars, Jupiter und Saturn zu kommentieren, die das HST aus besonderen Anlässen gewonnen hat.

Am 17. März 1997 kam der *Mars* in Opposition zur Sonne und näherte sich der Erde bis auf 98,6 Millionen Kilometer. Was die Entfernung angeht, war diese Opposition nicht besonders günstig. Dennoch gelang mit dem HST wenige Tage vorher, am 10. März 1997, eine der schärfsten Marsaufnahmen, die je aus Erddistanz gewonnen wurden (Abb. 31). Zu dieser Zeit wechselten auf der Nordhalbkugel des Planeten die Jahreszeiten vom Frühling zum Sommer. Auffällige Strukturen auf der Marsoberfläche sind die zu dieser Zeit kleine Polkappe aus Wassereis im Norden und die Syrtis Major Planitia genannte dunkle Struktur in der Bildmitte. Das riesige Hellas-Bassin im Süden ist ebenso wie große Vulkane, die sich am östlichen (rechten) Rand des Bildes befinden, von Wolken eingehüllt.

Regelmäßige Aufnahmen der Marsoberfläche im Frühjahr 1997, bei denen dem Auftreten von Staubstürmen besondere Beachtung geschenkt wurde, halfen, den Landeplatz der Pathfinder-Sonde zu überwachen.

mentierten ihn, so daß sich die Bruchstücke auf individuellen Kepler-Bahnen bewegten und zusammen den Anblick einer am 17. Mai 1994 über 1,1 Millionen Kilometer langen Perlenkette boten (Abb. 32). Das Perlenkettensphänomen spiegelte sich natürlich in der Jupiteratmosphäre wider, denn während die Bruchstücke des Kometen nacheinander einschlugen, drehte sich der Planet um seine Achse. Das erste der vier Bilder von Abb. 33 (von unten nach oben) wurde fünf Minuten nach dem Einschlag des auf Abb. 32 mit G bezeichneten Fragments am 18. Juli 1994 aufgenommen, das zweite eineinhalb Stunden später. Im dritten Bild sehen wir, wie drei Tage später die Strömungen in der Jupiteratmosphäre das Erscheinungsbild der Einschlagstelle verändert haben. Inzwischen ist (rechts von G) auch das Fragment L in die Atmosphäre eingedrungen. Das vierte Bild schließlich stammt vom 23. Juli 1994.

Im Jahre 1995 hat die Erde zweimal die Ringebene des *Saturn* gekreuzt: am 22. Mai von Nord nach Süd und am 10. August in umgekehrter Richtung. Jedesmal wenn dies geschieht (unter wechselnden Sichtbarkeitsbedingungen etwa aller 15 Jahre), ist für kleine Teleskope das Ringsystem "verschwunden" und wird in großen von der Kante gesehen. Letzteres ist auf der oberen, vom 6. August 1995 stammenden Aufnahme (Abb. 34) der Fall. Dem aufmerksamen Betrachter fällt der Ringschatten auf, der zum Rand des Planeten hin leicht nach unten gekrümmt ist, da sich die Sonne noch oberhalb der Ringebene befindet. Links oben steht, deutlich als Scheibchen erkennbar, der größte Saturnsatellit Titan. Der fast genauso große Fleck auf dem Saturn ist dessen Schatten. Die vier Trabanten auf der anderen Seite des Planeten sind (von links nach rechts) Mimas, Tethys, Janus und Enceladus. Bei der unteren Aufnahme vom 17. November 1995 blicken wir von oben auf das Ringsystem und ahnen bereits wieder dessen Teilung in mehrere Ringe. Tethys steht nun links von Saturn. Der andere Satellit, Dione, wirft einen langen, schmalen Schatten auf das Ringsystem, das die Sonne bald von unten bescheinen wird.

Das herausragende den *Jupiter* betreffende Ereignis war zweifellos der Zusammenstoß des Kometen P/Shoemaker-Levy 9 (1993e) mit dem Riesenplaneten am 16. Juli 1994. Bei seiner Annäherung an Jupiter "spürte" der Komet das sich über seine Längsausdehnung ändernde Gravitationsfeld des Planeten. Die Gezeitenkräfte zogen den Kometen auseinander und frag-

Abb. 34: PRC 96-16 Anblick des Ringsystems des Saturn und einiger seiner Satelliten, während bzw. kurz nachdem die Erde 1995 die Ringebene von Süden nach Norden kreuzte.

Selbstverständlich wurden auch über die anderen Planeten neue Erkenntnisse mit Hilfe des HST zutage gefördert. Der *Uranus* galt lange Zeit als "langweiliger" Planet, weil es von der Erde aus nicht gelang, Wolken in seiner Atmosphäre zu beobachten. Die NICMOS-Kamera hat nun im nahen Infrarot sechs riesige Wolkenfelder entdeckt, von denen jedes die Größe eines irdischen Kontinents hat.

Mehr als sechzig Jahre nach der Entdeckung des Pluto gelang es mit der Schwachlichtkamera erstmals, aus einer Entfernung von knapp fünf Milliarden Kilometern Oberflächendetails auf dem *Pluto* zu erkennen, dessen Durchmesser ja nur zwei Drittel von dem des Erdmondes beträgt. Die schon lange gehegte Vermutung, daß auch der Pluto einen Satelliten, Charon, hat, konnte mit dem HST noch vor der Installation der COSTAR-Optik bestätigt werden.

### Danksagung

Der Verfasser dankt Herrn stud.phys. Thomas Lotze für die Computerbearbeitung vieler der Abbildungen und seine Hilfe bei der Endfassung des Textes.

### Quellennachweis der Abbildungen

Abb. 1: Caltech Archives, Abb. 3: Harvard Archives, Abb. 13: [FRE], Abb. 15: [MEL]  
Abbn. 24, 26, 29: European Southern Observatory. Slide Sets "Objects in the Southern Sky" and "Supernova 1987A in LMC", ESO, Garching 1987 (<http://www.eso.org>)

Alle übrigen Abbildungen: Space Telescope Science Institute, Baltimore, Maryland, operated by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA), Inc., for NASA (<http://opposite.stsci.edu/>)

### Literatur

[BH] Lotze, K.-H., *Praktische Schülerübungen mit Originaldaten des Hubble-Weltraumteleskops, Projekt Nr. 3: Ein Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie M87*, Praxis der Naturwissenschaften / Physik 48(1998)(1) 28-35

[FEY] Feynman, R.P., *Vom Wesen physikalischer Gesetze*, Piper-Verlag München, Zürich 1990

[FRE] Freedman, W.L., Madore, B.F., Mould, J.R. et al., *Distance to the Virgo Cluster Galaxy M100 from Hubble Space Telescope Observations of Cepheids*, Nature 371(1994) 757-762

[GEN] Eckart, A., Genzel, R., *Erster schlüssiger Beweis für ein massives Schwarzes Loch?*, Physikalische Blätter 54(1998)(1) 25-30

[GUR] Gürtler, J., *Das neue Bild vom Sonnensystem*, Praxis der Naturwissenschaften / Physik 45(1996)(7) 27-31

[HSTX] Lotze, K.-H., *Praktische Schülerübungen mit Originaldaten des Hubble-Weltraumteleskops, Projekt Nr. 1: Die Entfernung der Supernova SN1987A*, Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU), 51 (1998) (4) 218-222

[KIP] Kippenhahn, R., *Vom Lebenslauf der Sterne*, Nova Acta Leopoldina, Neue Folge, No 260, Bd. 57, Halle / S. 1984

[LO1] Lotze, K.-H., *Kosmologie mit dem Hubble-Weltraumteleskop*, Physik in unserer Zeit (in Vorbereitung)

[LO2] Lotze, K.-H., *Praktische Schülerübungen mit Originaldaten des Hubble-Weltraumteleskops, Projekt Nr. 2: Die Entfernung der Galaxie M100*, Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU), (in Vorbereitung)

[LO3] Lotze, K.-H., *Lichtablenkung, Gravitationslinsen und Einsteinsche Ringe*, Die Sterne 67(1991)(6)297-316

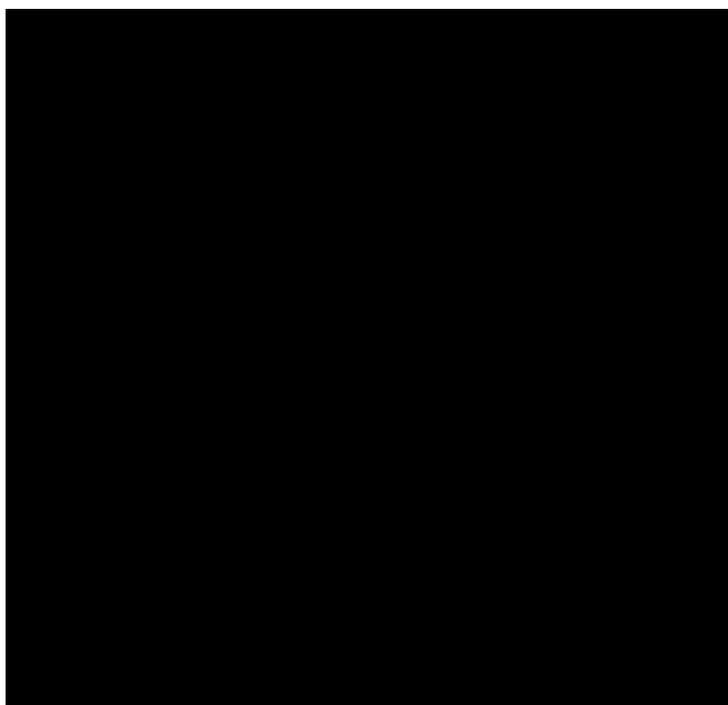
[MEL] Mellier, Y., Fort, B., Soucail, G. (Hrsg.), *Gravitational Lensing*, Lecture Notes in Physics Vol. 360, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1990

[OST] Osterbroek, D.E., Gwinn, J.A., Brashear, R.S., *Edwin Hubble und die Expansion des Universums*, Spektrum der Wissenschaft (1993)(9)78-83

[PFA] Pfau, W., *Die Entstehung und frühe Entwicklung von Sternen*, Praxis der Naturwissenschaften / Physik 45(1996)(7)23-26

[SEG] Seggewiß, W., *Die Supernova des Jahres 1987*, Praxis der Naturwissenschaften / Physik 47(1998)(3) 19-28

[TAM] Tammann, G.A., *Wie alt ist das Universum?*, Praxis der Naturwissenschaften / Physik 47(1998)(3) 2-5



HCG87 (Hickson Compact Group 87) in einer HST-Aufnahme.

Die drei großen Galaxien zeigen Spuren gegenseitiger Wechselwirkung: die Galaxie unten ist für eine Spiralgalaxie im Zentrum stark deformiert. In der Galaxie links oben findet intensive Sternbildung statt, was bei galaktischen Kollisionen häufig ist. (Quelle: HST, 20. 7. 1999)

# Der Thirring-Lense-Effekt - nach 80 Jahren jetzt im Experiment?

Helmut Rumpf und Helmuth Urbantke

## Mach - Einstein - Thirring

So uneindeutig die genaue Aussage des sogenannten "Machschen Prinzips" auch scheinen mag, so anregend war das Prinzip doch für die Aufstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) durch A. Einstein und für viele weitere Untersuchungen dazu. Das wohl bedeutendste "Ergebnis" des Machschen Prinzips ist, daß Einstein nach einem ausgedehnten Briefwechsel mit dem holländischen Astronomen W. de Sitter über das Machsche Prinzip zur relativistischen Kosmologie geführt wurde, die heute unser Bild des Universums prägt. Ein anderes "Ergebnis" der Auseinandersetzung mit dem Machschen Prinzip ist die theoretische Entdeckung des Thirring-Lense-Effektes (1918) im Rahmen der ART, der nun - nach 80 Jahren! - wie es scheint tatsächlich beobachtet werden kann.

Wegen der Uneindeutigkeit des Inhalts des Machschen Prinzips, dessen Diskussion ein ganzes Buch füllen könnte, wollen wir hier keine Ideen aus dem unmittelbaren Dunstkreis des Machschen Prinzips heranziehen, um zum Thirring-Lense-Effekt zu gelangen, sondern nur weiter unten einen Teilaspekt kurz streifen. Vielmehr können wir direkt vom bekannten Äquivalenzprinzip ausgehen, nach welchem Schwerfelder in nicht zu großen Raumgebieten und Zeitintervallen durch Übergang zu geeignet beschleunigten Bezugssystemen wegtransformierbar oder auch im schwerefreien Raum simulierbar sind. Illustriert wird dies gerne anhand der Einsteinschen Gedankenexperimente mit frei fallenden Aufzügen, oder heutzutage durch wirkliche Experimente in ballistisch fliegenden Satelliten. Das Schwerfeld, das bei solchen translativen Beschleunigungen der Bezugssysteme wegtransformiert wird, ist das Newtonsche, beschreibbar durch das (konservative) Schwerefeld. Nun fragen wir: welche Schwerefeldwirkungen werden durch rotative Beschleunigung eines Bezugssystems (Eigendrehung) lokal simuliert bzw. wegtransformiert? Die auftretenden Scheinkräfte sind

1. die nur ortsabhängige Zentrifugalkraft (Kraftfeld) und
  2. die (auch geschwindigkeitsabhängige) Corioliskraft.
- Die Frage lautet also genauer: welche Schwerfelder verursachen geschwindigkeitsabhängige Kräfte von der Art der Corioliskraft, oder - formal-mathematisch - der Lorentzkraft? Man spricht hier auch von *gravimagnetischen* Kräften zum Unterschied von *gravielektrischen* (= Newtons Schwerefelder).

Derartige Schwerewirkungen treten in der Newtonschen Theorie überhaupt nicht auf und sind ein Spezifikum der ART mit ihrer "tensoriellen" statt skalaren Beschreibung des Schwerfeldes. Wo sind solche Felder nun anzutreffen? Die Antwort ist: sie werden von *rotierenden* Massenverteilungen verursacht, also vom Vorhandensein einer *Massenströmung*. Ist dabei insbesondere diese Strömung stationär, sodaß die Massendichteverteilung zeitlich konstant bleibt, so wäre nach

## Das Machsche Prinzip

Ernst Mach (1838-1916) formulierte 1883 die Hypothese, daß die Trägheitskräfte durch die Gesamtheit der im Universum vorhandenen Materie verursacht werden. Dementsprechend sollte in einem Gedankenversuch die Trägheit eines Körpers verschwinden, wenn sämtliche übrige Materie entfernt wird. Entsprechend dem Newtonschen Eimerversuch kennzeichnet die parabolische Wölbung der Oberfläche eines mit Wasser gefüllten, rotierenden Eimers ein gegen den absoluten Raum rotierendes Bezugssystem. Da es aber nach Mach keinen absoluten Raum gibt, entsteht die Zentrifugalkraft als Ursache der Wölbung aufgrund der Rotation relativ zu den Fixsternen. Die umgekehrte Situation, nämlich die Rotation der Fixsterne um den ruhenden Eimer, ist nach Mach weder gedanklich noch experimentell vom Newtonschen Eimerversuch unterscheidbar, deshalb muß die Wasseroberfläche auch hier gewölbt sein. Das Machsche Prinzip war einer der Ausgangspunkte der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Newton dasselbe Schwerfeld zu erwarten wie bei einer Situation ohne Massenströmung, aber gleicher Dichteverteilung. Nach der ART hingegen sollte es die genannten Zusatzkräfte geben.

Rechnerisch hat das H. Thirring in seiner Originalarbeit 1918 nachgewiesen, wobei er der Fragestellung eine "Machsche" Einkleidung gibt, wie eingangs erwähnt: Beweist das Auftreten von Scheinkräften in rotierenden Bezugssystemen die Existenz eines absoluten Raumes, relativ zu welchem die Rotation stattfindet (Newtons Standpunkt - vgl. seinen Eimer-Versuch), oder ist die Rotation relativ zu fernen Massen zu verstehen, wie Mach vorschlägt?

Im zweiten Fall müßten dieselben Kräfte auch auftreten, wenn man das Bezugssystem als ruhend, die fernen Massen dagegen als rotierend annimmt (Relativität der Trägheit(skräfte)). Diese letztere Situation setzt nun Thirring im Rahmen der ART an und bestätigt das Auftreten der genannten Kräfte als Auswirkungen der Gravitation der fernen Massen, die er durch eine große, dünne rotierende Kugelschale repräsentiert und deren Schwerfeld er nach der ART berechnet.

Nach der Newtonschen Theorie wäre das Schwerfeld in dieser "Innenraumsituation" Null. Das Auftreten gravimagnetischer Kräfte in der beschriebenen Situation im Einklang mit Machs Ideen wurde von Einstein bereits 1913 in einer Vorläufer-Version der ART festgestellt<sup>1)</sup> - vgl. seinen Vortrag "Zum gegenwärtigen Stand des Gravitationsproblems" anlässlich der 85. Naturforscherversammlung zu Wien, abgedruckt in Phys. Z. 14 (1913) 1249; insbes. p.1261: "Auch dieses Resultat ist

<sup>1)</sup>Wir danken Herrn Prof. W. Pfister (Universität Tübingen) für diesen Hinweis.

im Sinne der Auffassung von der Relativität der Trägheit [Machsches Prinzip] vorauszusehen und längst vorausgesehen worden. Es ist bemerkenswert, dass die Theorie [d.i. die Vorläuferversion!] auch in diesem Punkte jener Auffassung entspricht; leider ist der zu erwartende Effekt so gering, dass wir nicht hoffen dürfen, ihn durch terrestrische Versuche oder in der Astronomie zu konstatieren".

In Zusammenarbeit mit dem Astronomen (und späteren Mathematiker) J. Lense wandte sich Thirring in einer Folgearbeit der Frage nach *beobachtbaren* Konsequenzen der genannten Kräfte zu, wobei nun weniger an Mach als an realisierbare Situationen gedacht wurde. Dementsprechend wurde die große rotierende Kugelschale durch einen rotierenden Himmelskörper ersetzt und der Einfluß von dessen Schwerefeld auf die Bahn von (kleineren) Körpern studiert, die den Himmelskörper umlaufen ("Außenraumsituation"). Die Bahnstörungen, die gegenüber der Umlaufung eines nichtrotierenden Zentralkörpers auftreten, wurden unter dem Namen Lense-Thirring-Effekt oder, historisch richtiger<sup>2)</sup>, Thirring-Lense(TL)-Effekt zusammengefaßt. Die relativistische Bahnstörung im nichtrotierenden Fall besteht bekanntlich in einer Drehung der Perapsis (Perihel, -gäum, -jovium, -astron etc.), während die Bahnebene noch erhalten bleibt. Im rotierenden Fall werden weitere Bahnelemente gestört: Exzentrizität, Neigung der Bahnebenen, Länge des aufsteigenden Knotens. Selbst die säkulären Störungen unter ihnen erweisen sich als numerisch klein, am größten für gewisse Jupiter- und Saturnmonde, und bei den damaligen Meßgenauigkeiten als unmeßbar. (Hoffnung geben hier einige durch die Voyager-Mission neu entdeckte Monde dieser Planeten).

Am Ende seiner ersten Arbeit bestimmte Thirring die Winkelgeschwindigkeit jenes lokalen Koordinatensystems, in dem der Effekt des gravimagnetischen Feldes gemäß dem Äquivalenzprinzip wegtransformiert ist. Angesichts der erwähnten Ungenauigkeiten bei der Beobachtung der vorhergesagten Bahnstörungen schlug 1959 L. Schiff vor, ein Präzisionsexperiment, in dem die Thirring'sche Winkelgeschwindigkeit in der Außenraumsituation direkt mittels eines Gyroskops gemessen wird. (Im folgenden wird dieser Effekt als Thirring-Schiff-Effekt bezeichnet.) Trotz der unvorstellbaren Präzision, die dazu erforderlich ist, wurde dieses Projekt noch in den sechziger Jahren von W.M. Fairbank und C.W.F. Everitt in Angriff genommen. Dabei soll ein Satellit in eine Erdumlaufbahn gebracht werden, in dem mehrere frei rotierende Kreisel magnetisch "aufgehängt" sind. Deren Präzession soll gegenüber einem statischen Bezugssystem gemessen werden, bezüglich welchem die Erde stationär rotiert<sup>3)</sup>.

Während sich der Realisierung dieses einfachen Grundgedankens große technische und finanzielle Schwierigkeiten in den Weg stellten, die den Start des jetzt "Gravity Probe B" genannten Satelliten zumindest bis zum Jahr 2000 hinauszögern, gibt es nun Anzeichen dafür, daß durch die Fortschritte sowohl der astrophysikalischen Beobachtungsmethoden als auch der Sa-

tellitentechnik und -geodäsie der TL-Effekt im Sinn von Bahnstörungen der oben geschilderten Art tatsächlich gesehen wird.

## Laservermessung von umlaufenden Satelliten

### LAGEOS-Satellit

Die Satelliten LAGEOS (Laser Geodynamics Satellite, NASA, Start 1976) und LAGEOS II (NASA und Agenzia Spaziale Italiana, Start 1992) umkreisen die Erde in etwa 6000 km Höhe mit einer Bahnneigung von  $109,9^\circ$  bzw.  $52,65^\circ$  zum Äquator und einer Bahnexzentrizität von 0,004 bzw. 0,014. Sie sind nahezu baugleich (Kugeln von nur ca. 60 cm Durchmesser bei einer Masse von 406 kg), völlig passiv und mit aus Würfecken zusammengesetzten Reflektoren umhüllt, um Laserpulse, die von der Erde durch Teleskope gezielt zu den Satelliten gesandt werden, zum Ausgangsort zu reflektieren. (Ähnliche Reflektoren wurden während der Apollo-Missionen auch auf dem Mond deponiert.) Durch Messung der Laufzeit eines Laserpulses ist es möglich, die Satellitenentfernung bis auf wenige Millimeter genau zu bestimmen. Der ursprüngliche Zweck der Satelliten war die genaue Vermessung ihrer Bahn, um (geophysikalisch-lagerstättenkundlich bedeutsame) Unregelmäßigkeiten des Gravitationsfeldes der Erde zu bestimmen. Durch die kompakte Bauweise der Satelliten wird die Bahnstörung durch den Strahlungsdruck der Sonne und den Restluftwiderstand gering gehalten, sie muß aber dennoch berücksichtigt werden. Für die Messung des TL-Effektes wäre es ideal, wenn eine Satellitenbahn das Spiegelbild der anderen wäre, weil bei umgekehrter Bahnneigung die Newtonschen Effekte des nicht kugelsymmetrischen Erdkörpers (s.u.) dem Spiegelbild entsprechen würden, nicht jedoch der gravimagnetische Effekt der Erdrotation. Ein solcher Effekt könnte dann unmittelbar aus dem asymmetrischen Verhalten der beiden Bahnebenen abgelesen werden. Natürlich stellt auch die geringe Exzentrizität der Bahn des ersten Satelliten eine Erschwernis für den Nachweis der Verschiebung des Perigäums dar.

Auch das derzeit beste Modell des Gravitationsfeldes der Erde ("EGM-96"; an seiner Erstellung waren die LAGEOS-Satelliten selbst wesentlich beteiligt) enthält Unsicherheiten, die den TL-Effekt verdecken können. Die maßgeblichen Parameter sind das aus der Abplattung der Erde resultierende Quadrupolmoment  $J_2$  der Massenverteilung und das nächsthöhere gerade Multipolmoment  $J_4$ . Allein die Unsicherheiten in diesen beiden Momenten und ihrer zeitlichen Veränderung<sup>4)</sup> führen gemäß der Newtonschen Theorie auf säkuläre Effekte von der-

<sup>2)</sup>Wir danken Herrn Prof. F.W. Hehl (Universität zu Köln) für die Überlassung der Kopie eines Briefes von J. Lense an ihn, aus der dies klar hervorgeht. Es sei bemerkt, daß J. Lense in dieser Zusammenarbeit vor allem seine "handwerkliche" Kenntnis der himmelsmechanischen Störungsrechnung einbrachte, andererseits aber schon vorher mit der ART vertraut war.

<sup>3)</sup>Detaillierte technische Informationen über diesen Satelliten sind unter der Internet-Adresse <http://einstein.stanford.edu> abrufbar.

mit der Vorhersage der ART bis auf 10 %, mit einem Gesamtfehler von  $\pm 20$  %, gelungen zu sein.

Es soll aber nicht verschwiegen werden, daß es seitens Fachkollegen auch kritische Meinungen zur Fehlerabschätzung gibt.

### Präzedierende Akkretionsscheiben

Der TL-Effekt fällt für Erdsatelliten deswegen so schwach aus, weil die gravimagnetische Kraft proportional zur gravimagnetischen Feldstärke und zur Geschwindigkeit des Satelliten ist, und beide sind vergleichsweise klein. Es gibt jedoch eine Klasse von astrophysikalischen Objekten, für die diese Einschränkungen nicht gelten, nämlich Materie in der Umgebung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, die durch den Gravitationskollaps massereicher Sterne entstehen. Ist so ein kollabiertes Objekt Bestandteil eines Doppelsternsystems, so entzieht es seinem Partner Materie, die allerdings auf Grund der Drehimpulserhaltung nicht radial überströmen kann, sondern sich in Form einer Scheibe um das kollabierende Objekt anordnet. Diese sogenannte Akkretionsscheibe heizt sich auf Grund von Reibungsvorgängen so sehr auf, daß thermische Röntgenstrahlung emittiert wird. Die Scheibenbestandteile spiralen wegen der Reibung immer weiter nach innen und stürzen letztlich in das Zentralobjekt. Innerhalb der Scheibe durchlaufen sie aber eine quasistationäre Bahn, die durch den Gravimagnetismus wesentlich beeinflusst werden kann. Denn einerseits ist wegen der Nähe zum Zentralobjekt und der Stärke seines (zum Drehimpuls proportionalen) gravimagnetischen Dipolmoments das gravimagnetische Feld schon beträchtlich, und andererseits ist die Bahngeschwindigkeit nicht mehr klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit. Ist nun der innere Abschnitt der Akkretionsscheibe relativ zur Äquatorebene des Zentralobjekts geneigt, dann wird die Scheibe wegen des TL-Effekts um das Zentrum präzedieren und dieses, falls es sich um einen Neutronenstern handelt, möglicherweise periodisch verfinstern. Dies sollte sich in einer Periodizität des auf der Erde eintreffenden Röntgenstrahlungsflusses äußern. Gemäß der ART gibt es innerhalb von 3 Schwarzschildradien vom Zentrum keine stabile Kreisbahn mehr. Dieser Wert markiert daher im einfachsten Fall den Innenrand der Akkretionsscheibe; u. U. liegt er aber auch weiter außerhalb. (Der Schwarzschildradius ist proportional zur Masse des Zentralobjekts und beträgt ca. 3 km für 1 Sonnenmasse). Im Fall eines Neutronensterns von etwa 1,5 Sonnenmassen ist die Bahnfrequenz eines Teilchens am Innenrand ca. 1 kHz, und die TL-Präzessionsfrequenz sollte einige 10 Hz betragen.

Seit Ende 1995 steht mit dem NASA-Satelliten RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) erstmals ein Instrument zur Verfügung, das zeitliche Variationen des Röntgenspektrums mit der für den Nachweis der TL-Präzession erforderlichen Genauigkeit auflösen kann (sogar bis zu einer Zeitskala von 0,1 ms). Tatsächlich hat "Rossi" quasiperiodische Oszillationen mit typischen Frequenzen im kHz-Bereich entdeckt, die Phänomene in der Umgebung von kollabierten Objekten zugeschrieben werden. 14 dieser Objekte sind Neutronensterne in Doppelsternsystemen. Ihre Partner sind allerdings so schwer zu beobachten, daß eine Massenbestimmung bisher nicht möglich war. Typisch für das Fourierspektrum des Röntgenflusses von diesen Quellen ist das Auftreten von Doppelpeaks. Ihre Fre-

*Ein Netzwerk von Laser Ranging Stationen vermisst die Bahnen der LAGEOS-Satelliten auf besser als 1 cm.*

selben Größenordnung wie die auf Grund des Gravimagnetismus zu erwartenden (das gilt nicht für die höheren Momente), sodaß ein Nachweis des letzteren über diese Effekte ziemlich hoffnungslos erscheint. I. Ciufolini und seine Mitarbeiter an der Universität "La Sapienza" in Rom haben 1997 jedoch erkannt, daß die beiden Satelliten drei Meßgrößen (die Präzessionsgeschwindigkeit ihrer Bahnebenen und die Präzessionsgeschwindigkeit des Perigäums von LAGEOS II) bereitstellen, die sich durch die 3 Unbekannten  $J_2$ ,  $J_4$  und  $\mu$  ausdrücken lassen, wobei der dimensionslose Parameter  $\mu$  die Stärke des TL-Effekts mißt ( $\mu = 0$  für die Newtonsche Gravitation und  $\mu = 1$  in der ART). Es ist also im Prinzip nur ein System von 3 Gleichungen für 3 Unbekannte zu lösen. Allerdings muß zuvor eine Reihe von störenden Effekten eliminiert werden, die nichts mit EGM-96 zu tun haben. Zwei davon wurden bereits erwähnt, weitere sind kleine Variationen der Reflektivität der Satelliten auf Grund thermischer Effekte und der nicht konstanten Ausrichtung ihrer Rotationsachse, die Variation der Rotationsgeschwindigkeit der Erde und die Wanderung ihrer Pole, die Bewegung der Bodenstationen durch die Kontinentalverschiebung und die gravitativen Störungen durch Mond, Sonne und Planeten. Nach Berücksichtigung dieser Faktoren sind in der Tat die größten Fehlerquellen für die Bestimmung von  $\mu$  ausgeschaltet, und es verbleiben - zumindest theoretisch - nur noch die vergleichsweise kleinen Unbestimmtheiten der höheren Multipolmomente  $J_{2n}$  mit  $n \geq 3$ .

Die Präzession der Bahnebene kann für beide Satelliten mit einer Genauigkeit von etwa 1 Millibogensekunde/Jahr (mas/a) gemessen werden, während der TL-Effekt ca. 31~mas/a ausmachen sollte. Während des vierjährigen Beobachtungszeitraumes konnte auch das Perigäum von LAGEOS II mit einer Genauigkeit von ca. 25 mas verfolgt werden, was im Vergleich zu der gemäß dem TL-Effekt zu erwartenden Verschiebung von -57 mas/a ebenfalls günstig ausfällt. Man beachte, daß in der Höhe der Satelliten 1 mas einer Strecke von etwa 6 cm entspricht! Das Endresultat der Analyse von vier Jahren Beobachtung ist  $\mu_{\text{exp}} = 1,1 \pm 0,2$ , wobei die Fehlerangabe auf einer Abschätzung der verbleibenden Unsicherheiten, insbesondere bezüglich nichtgravitativer Störungen und der Bahnneigung der Satelliten, beruht. Damit scheint dem Team aus Rom der erste direkte Nachweis des TL-Effekts und seiner Übereinstimmung

<sup>3)</sup>Neben dem Effekt der Gezeiten und Jahreszeiten gibt es hier auch eine säkuläre Komponente.

quenz von ca. 1 kHz driftet mit der Zeit, aber der Frequenzabstand zwischen den beiden Peaks bleibt konstant. Im "magnetosphärischen Schwebungsfrequenzmodell" wird die höhere der beiden Frequenzen der Keplerbewegung von Inhomogenitäten am inneren Rand der Akkretionsscheibe zugeordnet und der Frequenzabstand mit der Rotationsfrequenz des Neutronensterns (entsprechend einer Rotationsperiode von ca. 3 ms) identifiziert. In einigen Fällen wird letztere Interpretation dadurch bestätigt, daß Röntgen-Ausbrüche dieselbe Rotationsperiode verraten. Neuere Beobachtungen widersprechen allerdings diesem Modell und deuten eher darauf hin, daß das Doppelpeak-Phänomen durch die relativistische Präzession des Periastrons entsteht. (Dieser Effekt hat nichts mit der Rotation des Zentralsterns zu tun und entspricht der berühmten (und viel kleineren!) Perihelpräzession des Merkur.) Der Frequenzabstand wäre dann gleich der Präzessionsfrequenz, während sich an der Bedeutung des höherfrequenten Peaks nichts ändert.

L. Stella (Astronomisches Observatorium Rom) und M. Vietri (Universität Rom 3) haben 1997 als erste darauf hingewiesen, daß in den Fourierspektren auch jeweils ein Peak in dem von der TL-Präzession zu erwartendem Frequenzbereich auftritt. Da nach dem 3. Keplerschen Gesetz die Keplerfrequenz wie  $r^{-3/2}$ , die TL-Präzessionsfrequenz aber wie  $r^{-3}$  (entsprechend dem Abfall eines gravimagnetischen Dipolfelds) variiert, sollte die Frequenz des "Präzessions-Peaks" wie das Quadrat jenes des "Kepler-Peaks" variieren. Dieser Trend findet sich auch grob in den Daten wieder. Ist man darob gewillt, die Präzession der Akkretionsscheibe als erwiesen anzusehen, so stellt sich immer noch - ähnlich wie schon im Fall des Satellitenexperiments - die Frage, inwieweit die Präzession nur ein Newtonscher Effekt der Asphärizität des Neutronensterns ist. Es stellt sich heraus, daß je nach Zustandsgleichung der Neutronensternmaterie das Quadrupolmoment einen geringen bis beträchtlichen Beitrag zur Gesamtpräzession liefern kann und innerhalb einer halb-Newtonschen Näherung Übereinstimmung mit den Daten erreicht werden kann. Dies scheint jedoch durch eine genauere Rechnung im Rahmen der ART wieder in Frage gestellt, wonach das Quadrupolmoment und höhere Multipolmomente die Gesamtpräzession sogar signifikant auf etwa die Hälfte der beobachteten Frequenz reduzieren. Vielleicht läßt sich diese Diskrepanz um einen Faktor 2 aber auch mit der Scheibengeometrie erklären. Ein weiterer Zweifel, ob tatsächlich die TL-Präzession für die beobachtete Frequenz verantwortlich ist, ergibt sich daraus, daß eine typische Akkretionsscheibe gerade wegen der gravimagnetischen Kraft und ihrer eigenen Viskosität dazu tendiert, sich in der Äquatorebene des Sterns zu etablieren. Es bedarf also einer gesonderten Kraft, um den Innenrand der Scheibe wieder aus dieser Ebene herauszukippen. Als Ursache dieser Kraft bietet sich natürlich das i.a. nicht symmetrisch zur Rotationsachse liegende Magnetfeld des Neutronensterns an, das auch dem Pulsarphänomen zugrundeliegt. Der TL-Effekt wurde aber aus der Annahme hergeleitet, daß die Teilchen nur gravitativ beeinflusst sind. Unter allgemeineren Bedingungen ist zumindest eine Modifikation der Präzessionsfrequenz zu erwarten. Aus diesem Grunde ist die Frage, ob der beobachtete "Präzessions-Peak" in der Tat den TL-Effekt widerspiegelt, wohl noch als offen anzusehen.

Dieselbe Vorsicht ist auch bei der Deutung der quasiperiodischen Oszillation im 10-Hz-Band angebracht, die man im

Falle von Schwarzen Löchern (SL) mit Doppelsternpartnern beobachtet. (Die SL-Natur des unsichtbaren Partners folgt daraus, daß seine Masse sich dynamisch zu mehr als 3 Sonnenmassen bestimmt, was über der Stabilitätsgrenze für Neutronensterne liegt). Hier kommt noch erschwerend hinzu, daß im Gegensatz zu Neutronensternen eine direkte Bestimmung der Rotationsperiode des SL nicht möglich ist. Andererseits erzeugt das SL kein eigenes Magnetfeld, und das von der Akkretionsscheibe selbst erzeugte stört nicht so sehr. Deutet man eine quasiperiodische Oszillation als Folge der TL-Präzession, kann man aus ihrer Frequenz und der dynamisch bestimmten Masse den Drehimpuls des SL herleiten. Dies haben W. Cui (MIT) und S.N. Zhang (NASA Marshall Space Flight Center) 1997 für eine Reihe von stellaren SL durchgeführt und Übereinstimmung mit den Resultaten einer ebenfalls von ihnen stammenden anderen indirekten Methode zur Drehimpulsbestimmung gefunden. Interessant ist, daß demnach die 1994 in unserer Galaxis entdeckten beiden "Mikroquasare" (so genannt wegen der von ihnen mit scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit ausgestoßenen "Jets") nahezu mit der theoretisch möglichen Höchstgeschwindigkeit rotieren.

Zusammenfassend scheint es für alle Experimente verfrüht, von einer endgültigen Bestätigung des TL-Effekts zu sprechen. Es ist aber zu hoffen, daß mit dem Sammeln weiterer Beobachtungsdaten in den nächsten Jahren eine Klärung eintreten wird. Unabhängig davon verspricht das eingangs erwähnte, im Bau befindliche Satellitenexperiment "Gravity Probe B" eine Messung des Thirring-Schiff-Effekts mit einer Genauigkeit im Prozentbereich.

Peter Häußler  
Wolfgang Bündler  
Reinders Duit  
Wolfgang Gräber  
Jürgen Mayer

NATURWISSENSCHAFTSDIDAKTISCHE  
FORSCHUNG

### **Perspektiven für die Unterrichtspraxis**

Kiel: IPN, 1998, 256 S., ISBN 3-89088-124-6

### **Naturwissenschaften im Unterricht Physik**

#### ***Anders unterrichten***

Heft 46, August 1998, Erhard Friedrich Verlag

**Buch bzw. Zeitschrift sind zum Sonderpreis von  
ÖS 160,- bzw. ÖS 80,- beim Verein erhältlich.  
Bestellung per Fax (01 / 4277 9515) erbeten.**

# Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?

## Versuch einer Analyse verschiedener Erklärungsmuster

Rita Wodzinski

### 1. Einleitung

Obwohl das Fliegen mit dem Flugzeug heute nichts Ungewöhnliches mehr ist, hat das Phänomen "Fliegen" an Faszination kaum etwas verloren. Ein guter Grund eigentlich, das Fliegen auch im Schulunterricht zu thematisieren. Geht man aber der Frage nach, warum ein Flugzeug fliegt, stellt man fest, daß es offenbar ganz verschiedene Antworten auf diese Frage gibt. Merkwürdig daran ist, daß jede dieser Erklärungen bis zu einem gewissen Grad überzeugen kann, aber die Zusammenhänge völlig unklar bleiben. Dieser Beitrag möchte deshalb helfen, die verschiedenen Erklärungen in einen größeren Rahmen einzubetten. Im zweiten Teil werden darauf aufbauend Vorschläge für einen alternativen Unterricht zur Flugphysik dargestellt. (Eine etwas ausführlichere Darstellung der fachlichen Analyse findet man unter [1].)

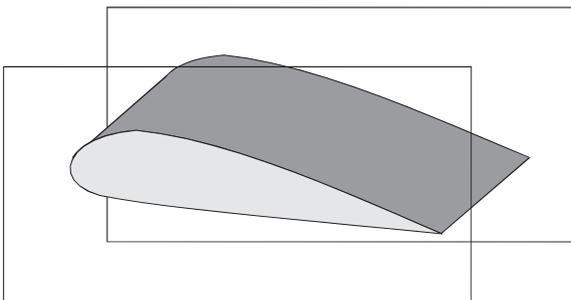


Abb. 1: Modell einer zweidimensionalen Tragfläche

### 2. Warum fliegt ein Flugzeug: Die drei häufigsten Erklärungen

Eines der drei häufigsten Erklärungsmuster zum Fliegen ist die Druckerklärung. Demnach wird durch die besondere Form des Tragflügels die Strömung so verändert, daß an der Oberseite ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck entsteht. Die Druckdifferenz liefert dann die Auftriebskraft, die das Flugzeug in der Luft hält. Dieses Erklärungsmuster findet man bevorzugt in populärwissenschaftlichen Büchern und Zeitschriften oder in Kinderbüchern.

Ein anderes Erklärungsmuster, die Rückstoßerklärung, knüpft an das Wechselwirkungsgesetz an. Hervorgehoben wird, daß die Tragfläche Luft nach unten umlenkt. Dabei muß die Tragfläche nach dem Wechselwirkungsgesetz eine nach oben gerichtete Kraft erfahren. Dieses Erklärungsmuster wird vor allem von Weltner propagiert (z.B. [2]) und hat inzwischen Einzug in eine Reihe von Schulbüchern gefunden.

Ein drittes Erklärungsmuster vergleicht den Auftrieb mit der Kraft auf den rotierenden Zylinder. Es findet sich z.B. im

Gerthsen [3] und in vielen Lehrbüchern der Technischen Strömungslehre. Ähnlich wie ein rotierender Zylinder eine Kraft erfährt, weil zur normalen Umströmung eine Kreisströmung (Zirkulationsströmung) hinzukommt, wird auch der Auftrieb auf eine Zirkulationsströmung um die Tragfläche herum zurückgeführt.

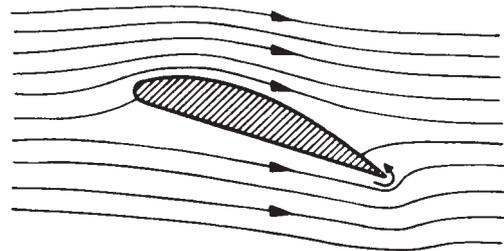


Abb. 2: Strömungsbild einer Tragfläche ohne Zirkulation (nach [4, S. 108]).  
Hier entsteht kein Auftrieb.

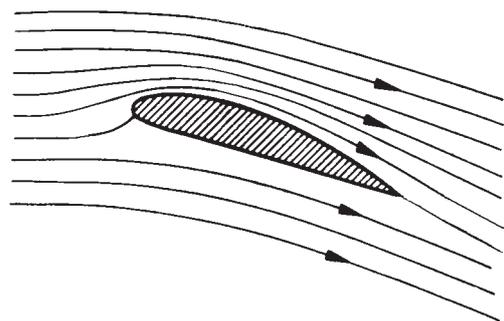


Abb. 3: Strömungsbild einer Tragfläche mit Zirkulation (nach [4, S. 107]).  
Hier entsteht Auftrieb.

### 3. Fachliche Analyse des Zusammenspiels der drei Erklärungen

#### 3.1. Der zweidimensionale Fall

Aus der Sicht der Strömungsmechanik ist tatsächlich die Zirkulation der Schlüssel zur Beschreibung des Auftriebs. In einer ersten guten Näherung kann man den Auftrieb zunächst für eine zweidimensionale Tragfläche in einem idealen reibungsfreien Fluid untersuchen. Eine zweidimensionale Tragfläche kann man sich vorstellen als ein Tragflächenstück, dessen Enden mit Platten versehen sind, die eine Querströmung unterbinden (Abb. 1). Das Strömungsbild einer solchen Tragfläche ohne Zirkulation gibt Abb. 2 wieder. Würde die Luft so strömen, wäre der Auftrieb allerdings null. Wie die Strömung real aussieht, zeigt im Vergleich dazu Abb. 3. Der Unterschied in den Strömungsbildern läßt sich nun durch die Zirkulationsströmung beschreiben, in der sämtliche Auftriebsinformation enthalten ist (Abb. 4). Das gleiche gilt auch für den rotierenden Zylinder. Auch hier steckt die Auftriebsinformation in der

Dr. Rita Wodzinski, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, Schellingstr. 4, D-80799 München

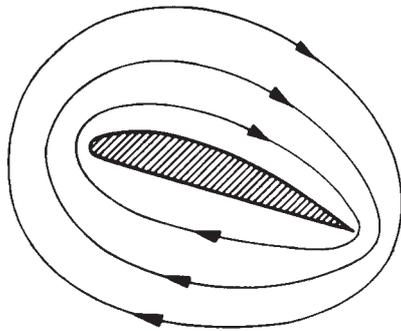


Abb. 4: Strömungsbild der Zirkulationsströmung (nach [4, S. 108]). Man erhält dieses Bild durch Subtraktion der Strömungsbilder in Abb. 3 und 2.

Kreisströmung. In beiden Fällen berechnet sich der Auftrieb nach derselben Gleichung, nämlich der Kutta-Joukowski-Formel:  $F/l = \Gamma \rho u$ , wobei  $u$  die ungestörte Anströmgeschwindigkeit bezeichnet und  $\Gamma$  die Stärke der Zirkulation.

Damit ist bereits eine erste Verknüpfung der drei Erklärungsmuster gefunden. Denn beschreibt man das Strömungsbild einer Tragfläche mit Hilfe der Zirkulationsströmung, so beinhaltet das automatisch auch, daß die Strömung oberhalb der Tragfläche schneller und unterhalb der Tragfläche langsamer ist als die ungestörte Strömung und daß die Luft hinter der Tragfläche nach unten umgelenkt wird.

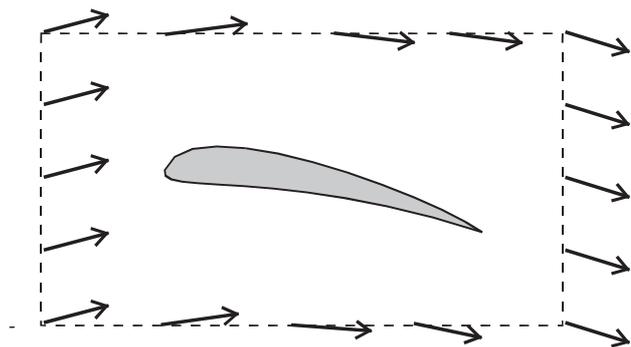


Abb. 5: Skizze zum Impulssatz: Das Kontrollvolumen ist gestrichelt dargestellt. Die Kraft auf die Tragfläche ergibt sich aus der Differenz zwischen ein- und ausströmendem Impulsstrom (Impulsanteil) plus den Druckkräften an den Rändern des Kontrollvolumens (Druckanteil).

Eine Verknüpfung theoretischer Art liefert der Impulssatz. Der Impulssatz besagt: Wenn eine stationäre Strömung vorliegt, kann man die Kraft auf einen Körper in der Strömung bestimmen, indem man ein beliebiges Kontrollvolumen um den Körper legt und ein- und auströmenden Impuls und den Druck an den Grenzflächen des Kontrollvolumens auswertet. Egal wie man das Kontrollvolumen legt, immer kommt die Auftriebskraft heraus (Abb. 5). Wählt man z.B. ein quadratisches Kontrollvolumen beliebiger Größe, dann liefert der Druck- und der Impulsanteil jeweils die Hälfte des Auftriebs. Wählt man das Kontrollvolumen so, daß es direkt um die Tragfläche herum liegt, ist der Impulsanteil null und der Druckanteil macht den gesamten Auftrieb aus. Ein anderer Grenzfall ist ein Kontrollvolumen, das symmetrisch um die Tragfläche herum liegt und oben und unten ins Unendliche reicht. Jetzt kann man die Druckanteile vernachlässigen, und nur der Impulsanteil oder die Luftumlenkung vorne und hinten bestimmt den Auftrieb. Die Druckerklärung und die Rückstoßerklärung sind also so

gesehen einfach zwei verschiedene Spezialfälle des Impulssatzes. Und natürlich gilt: Wendet man den Impulssatz auf eine zweidimensionale Tragfläche an, dann liefert er für den Auftrieb genau die Kutta-Joukowski-Formel.

### 3.2. Der dreidimensionale Fall

Die bisherigen Überlegungen betrafen eine zweidimensionale Tragfläche. Was passiert nun, wenn man zu einer dreidimensionalen Tragfläche übergeht? Leider werden die Zusammenhänge nun erheblich komplizierter, denn es müssen jetzt die sogenannten Randwirbel mitberücksichtigt werden, die an den Flügelenden austreten und die den Abwind hinter der Tragfläche wesentlich beeinflussen.

Vereinfacht gesagt kann der Wirbelfaden, um den die Luft bei der Zirkulationsströmung herumströmt, an den Flügelenden nicht aufhören, sondern muß weitergeführt werden, im Prinzip bis hin zum Startpunkt des Flugzeugs. Diese Randwirbel sorgen für zusätzlichen Abwind hinter der Tragfläche, der dem Abwind vom eigentlichen tragenden Wirbel überlagert ist (Abb. 6).

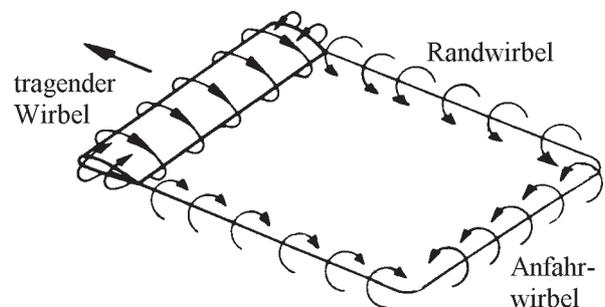


Abb. 6: Im dreidimensionalen Fall müssen zusätzlich zum tragenden Wirbel auch die Randwirbel berücksichtigt werden. Sie schaufeln hinter der Tragfläche zusätzlich Luft nach unten (nach [4, S. 126]).

Daß im dreidimensionalen Fall überhaupt Randwirbel entstehen, kann man folgendermaßen verstehen: Bei einer zweidimensionalen Tragfläche gibt es Unterdruck oben und Überdruck unten und keine Möglichkeit des Ausgleichs. Betrachtet man aber einen dreidimensionalen Flügel, dann müssen sich die Druckgebiete zum Rand hin ausgleichen. Die Luft strömt deshalb auf der Oberseite der Tragfläche immer etwas zum Flugzeugrumpf hin und auf der Unterseite etwas zu den Flügelspitzen hin. Diese Querströmungen auf beiden Seiten der Tragfläche sorgen dafür, daß sich an der gesamten Hinterkante Wirbel ausbilden, die zusammen eine sogenannte Wirbelschleife formen. Die Wirbelschleife rollt sich aber in einiger Entfernung hinter der Tragfläche zu zwei starken Wirbeln auf, so daß die vereinfachte Betrachtung zweier an den Enden austretender Wirbelfäden (wie in Abb. 6) berechtigt erscheint.

Für ein bestimmtes Profil läßt sich genau berechnen, welchen Beitrag die Randwirbel zur Abwindgeschwindigkeit hinter der Tragfläche liefern. In der Abb. 7 ist das Ergebnis einer solchen Rechnung (für ein elliptisches Profil) dargestellt, und zwar sind die beiden Anteile des Abwindes, die vom Wirbel um die Tragfläche bzw. von der Wirbelschleife herrühren, getrennt aufgetragen. Man sieht daran, daß der Randwirbelabwind bereits kurz hinter der Tragfläche den größten Teil des Abwindes ausmacht. Das bedeutet: Hinter der Tragfläche erfolgt die Umlenkung der Luft nach unten vor allem durch die Randwirbel,

die aber zum Auftrieb nichts beitragen. Der Abwind im dreidimensionalen Fall ist also offenbar etwas sehr viel Komplexeres, als ein schlichtes Anpassen des Luftstroms an die Profilform, wie es bei der Rückstoßklärung suggeriert wird.

Eindrucksvolle Fotos zu den Randwirbeln wie in Abb. 8 findet man im internet z.B. unter [5, Bild vom 11. Oktober 96 oder 23. Oktober 95].

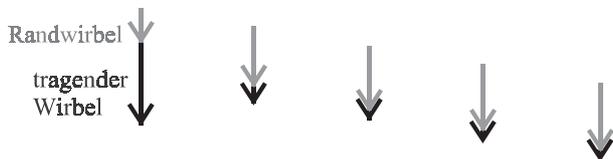


Abb. 7: Die Abwindgeschwindigkeit hinter der Tragfläche setzt sich zusammen aus einem Anteil, der vom tragenden (auftriebserzeugenden) Wirbel herrührt, und einem Anteil, der auf die Randwirbel zurückzuführen ist. Schon in geringer Entfernung hinter der Tragfläche wird das Abwindverhalten wesentlich von den Randwirbeln bestimmt.

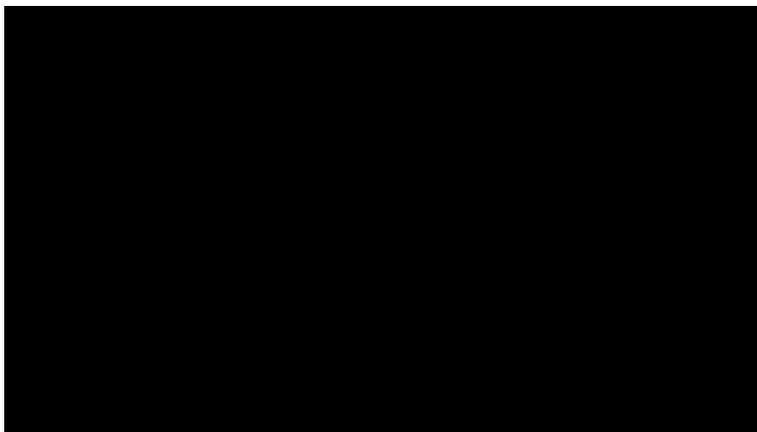


Abb. 8: Das Flugzeug fährt im Landeanflug über einen Behälter, aus dem Rauch entweicht. Das Bild zeigt, wie die Randwirbel den Rauch entgegen dem Uhrzeigersinn herumschleudern.

### 3.3. Warum also fliegt ein Flugzeug?

Will man verstehen, warum ein Flugzeug fliegt, muß man untersuchen, warum sich eigentlich das Stromlinienbild so einstellt, wie es sich einstellt, denn geht man von einem Stromlinienbild als gegeben aus, ist darin alle Auftriebsinformation ja bereits enthalten.

Eine gute Begründung, warum sich an der Tragflächenoberseite ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck einstellt, gibt es außer über die Zirkulation nicht. Oft wird argumentiert, an der Oberseite müsse ein Unterdruck vorherrschen, weil die Luft an der Oberseite einen längeren Weg zurücklegen muß bis zum gemeinsamen Treffpunkt an der Hinterkante. Dies ist aber ein Mißverständnis. Die Luft trifft sich tatsächlich nicht an der Hinterkante, wie das Ergebnis einer Simulation deutlich zeigt (Abb. 9) [6].

Bei der Rückstoßklärung wird die Frage, warum die Luft nach unten umgelenkt wird, gar nicht erst gestellt. Es wird als selbstverständlich vorausgesetzt, daß das so ist, weil die Luft dem Profil ausweichen muß. Wie die Ausführungen gezeigt haben, kommt der überwiegende Teil der Luftumlenkung allerdings durch andere Effekte zustande.

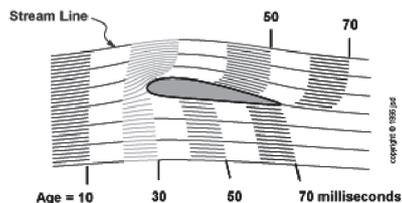


Abb. 9: Der zeitliche Verlauf der Strömung an Ober- und Unterseite kann durch die unterschiedlichen Grautöne verfolgt werden. Beide Luftströme treffen sich nicht an der Hinterkante.

Nur in der Zirkulationserklärung hat die Frage, warum sich die Strömung so ausbildet, einen sinnvollen Platz. Man kann die Entstehung der Zirkulationsströmung etwa folgendermaßen verstehen: Wenn der Tragflügel sich zu bewegen beginnt, dann strömt die Luft im ersten Moment so, wie es einer zirkulationsfreien Umströmung entspricht. D.h. die Luft strömt um die Hinterkante herum zum oberen Staupunkt. Dies kann man für kleine Strömungsgeschwindigkeiten experimentell auch zeigen. Um diesem Strömungsbild zu folgen, muß die Luft an der Hinterkante sehr schnell werden und dann im Staupunkt wieder auf null abgebremst werden. Die Luft in unmittelbarer Nähe vom Tragflügel wird aber durch Reibung mit der Oberfläche verzögert, so daß sie der Bewegung um die Hinterkante herum ab einer bestimmten Geschwindigkeit nicht mehr folgen kann. Sie löst sich deshalb an der Hinterkante vom Flügel ab. Die weiter außen liegende Luftschicht ist durch Reibung weniger abgebremst. Sie folgt deshalb noch der Bewegung um die Kante herum. Dadurch kommt es zu einem Aufrollvorgang und der Entstehung des Anfahrwirbels. Experimentell kann man diesen Anfahrwirbel übrigens sehr leicht sichtbar machen. Man braucht dazu lediglich eine flache wassergefüllte Schale, etwas Sägemehl und ein Tragflächenprofil bzw. ein Modell eines schräg angestellten Bretts, das man durch die Wanne zieht.

Da kein Wirbel ohne Gegenwirbel entsteht, bildet sich ein zweiter Wirbel aus, der sich im günstigen Fall um die Tragfläche herum legt. Dieser Wirbel liefert gerade die für den Auftrieb verantwortliche Zirkulationsströmung.

Ganz entscheidend dafür, daß ein Flugzeug überhaupt fliegen kann, ist also die scharfe Hinterkante des Tragflügels und die Tatsache, daß Luft ein reales und kein ideales Fluid ist.

## 4. Ein alternativer Unterrichtsvorschlag

### 4.1. Der unterrichtliche Rahmen

Eine tiefere Behandlung der Physik des Fliegens im Unterricht ist nur sinnvoll, wenn man sie in eine Unterrichtsreihe zur Strömungslehre einbettet. Größere Themenbereiche, die sich neben dem Fliegen in einem solchen Unterricht diskutieren lassen, sind z.B. die Fahrzeugumströmung, die Aerodynamik im Sport oder Themen aus der Bionik wie besonders strömungsgünstige Formen und Oberflächen in der Natur. Daneben gibt es noch eine Vielzahl von weiteren Phänomenen wie die Dellen im Golfball, die tropfende Teekanne, das Abdecken von Dächern, Blutströmungen in Adern um nur einige zu nennen. Auf diese Weise bleiben die Erkenntnisse, die bei der Flugphysik von Bedeutung sind, nicht auf diesen Bereich beschränkt, sondern werden genutzt, um damit einen größeren Bereich von interessanten Phänomenen zu erschließen.

## 4.2. Eine erste Erklärung über den Druck

Um das Phänomen des Auftriebs an Tragflächen experimentell deutlich zu machen, kann man ein Flugzeugmodell auf einer Waage mit dem Fön anblasen und den scheinbaren Gewichtsverlust beobachten. Besonders gut eignen sich dafür einfache Styropormodelle. Mit ihnen kann man Auftriebskräfte erzeugen, die deutlich größer sind als die Gewichtskraft. Experimentell kann man zeigen, daß es einen bestimmten Anstellwinkel gibt, bei dem der Auftrieb maximal wird. Er liegt deutlich unter 45 Grad. Auch bei einem echten Flugzeug muß die Luft eine Kraft ausüben, die der Gewichtskraft des Flugzeugs entspricht und auch beim richtigen Flugzeug kommt es auf den Anstellwinkel an.

Bittet man die Schülerinnen und Schüler, ein Stromlinienbild für die Umströmung einer Tragfläche zu zeichnen, werden sie vermutlich intuitiv das Wesentliche bereits richtig aufzeichnen, nämlich die Verengung der Stromlinien an der Oberseite, die Erweiterung an der Unterseite und das glatte Abströmen an der Hinterkante. Mit der zuvor qualitativ diskutierten Bernoulli-Gleichung kann man diesem Bild entnehmen, daß an der Oberseite der Tragfläche ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck vorliegt. Diese Druckdifferenz entspricht dem Auftrieb. Wenn die notwendigen Geräte zur Verfügung stehen, können detailliertere Druckmessungen im Experiment durchgeführt werden. Alternativ dazu muß man sich mit entsprechenden Grafiken (Abb. 10) begnügen, die belegen, daß die Oberseite entgegen der Erwartung einen deutlich größeren Beitrag zum Auftrieb liefert als die Unterseite.

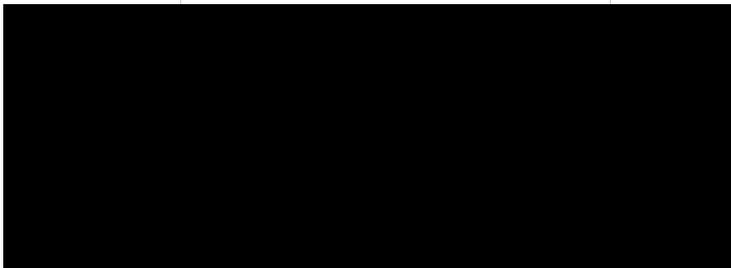


Abb. 10: Druckverteilung an Ober- und Unterseite (aus [4, S. 116]). Die Oberseite trägt etwa mit zwei Drittel zum gesamten Auftrieb bei.

Eine erste Erklärung des Fliegens über die Druckunterschiede ist damit gefunden. Als nächstes kann man die Frage stellen, warum eigentlich die Luft an der Oberseite schneller strömt als an der Unterseite. Dazu können verschiedene Ideen von Schülerseite zusammengetragen und kritisch überprüft werden. Insbesondere sollte man auf die Ungültigkeit des Weglängenarguments explizit hinweisen. Gegenargumente dagegen sind, daß das Fliegen mit symmetrischen Profilen (z.B. Drachenfliegen) möglich ist, obwohl Ober- und Unterseite gleich lang sind, daß auch Überkopfflug funktioniert, und nicht zuletzt das Ergebnis der Simulation in Abb. 9.

## 4.3. Aufbrechen der Selbstverständlichkeit des Strömungsbildes einer Tragfläche

Im nachfolgenden Unterrichtsabschnitt geht es darum, deutlich zu machen, daß es keineswegs selbstverständlich ist, daß die Luft an der Hinterkante eines Tragflügels glatt abströmt, wie dies eingangs naiv vorausgesetzt wurde. Dazu werden Stromlinienbilder mit Velourpapier von einer Tragfläche und einem angestellten Brett erzeugt (Abb. 11 und 12). (Man bekommt das Velourpapier in Geschäften für Künstlerbedarf.)

Für die Herstellung dieser Bilder geht man folgendermaßen vor: Man knickt von einem Stück kräftigem Velourpapier (ca. 10 x 20 cm, hochkant, weiche Seite vorne) den oberen Teil (ca. 5 cm) nach hinten. An der neu entstandenen Oberseite macht man in regelmäßigen Abständen kleine vertikale Bleistiftmarkierungen (ca. 5 mm lang). Dann schneidet man aus dem Papier eine Form aus, deren Umströmung untersucht werden soll. Nachdem man das gesamte Papier kurz kräftig naß gemacht hat, hängt man das anfangs umgeknickte hintere Stück in seiner ganzen Länge in ein eckiges randvoll gefülltes Wasserbecken. Mit einem Füllfederhalter zeichnet man nun die Bleistiftmarkierungen in regelmäßigen Abständen (alle 15 sec.) nach. Nach ca. 5 Minuten hat sich die Tinte bis unten durchgefärbt und dabei das Stromlinienbild einer zirkulationsfreien Umströmung aufgezeichnet. (Siehe auch [7].)



Abb. 11: Umströmung eines tragflächenförmigen Lochs mit der Velourpapier-Methode. Das Bild gleicht einer Umströmung einer Tragfläche ohne Zirkulation.



Abb. 12: Zirkulationsfreie Umströmung eines angestellten Bretts, aufgenommen mit der Velourpapier-Methode.

Bei der Durchführung des Experiments fällt die Umströmung der Hinterkante bereits als etwas Überraschendes ins Auge. Der unmittelbare Vergleich zweier Strömungsbilder (wie Abb. 3 und 11) kann die Unterschiede zusätzlich verdeutlichen. An dieser Stelle sollte man die Schülerinnen und Schüler darauf hinweisen, daß bei sehr langsamer Strömung eine Tragfläche tatsächlich so umströmt wird, wie das Velourpapier zeigt, daß dabei aber kein Auftrieb erzeugt wird. Dies kann man erkennen, wenn man sich die Velourpapierströmung der angestellten Platte genauer ansieht. Aufgrund der Symmetrie kann in die-

sem Fall keine resultierende Kraft auftreten, sondern nur Drehmomente, die zu einer Drehung der Platte führen würden.

Weiteren Aufschluß gibt die unterschiedliche Umströmung einer schrägen Platte in Wasser und in Glycerin. Für diesen Versuch füllt man Wasser und Glycerin jeweils in eine transparente Plastikschaale und bestreut die Oberfläche mit Sägemehl. Zieht man eine angestellte Platte abwechselnd durch die beiden Flüssigkeiten, sieht man, daß in Glycerin die Hinterkante wie beim Velourpapier umströmt wird, während in Wasser kein Hochströmen an der Hinterkante zu beobachten ist.

Wie bei der Velourpapierströmung entsteht auch in Glycerin kein Auftrieb. Das kann man zeigen, indem man ein Tragflächenprofil an einem quer gespannten Draht abwechselnd durch ein Becken mit Glycerin und Wasser zieht (Abb. 13). An der Tragfläche sind zwei Ösen so angebracht, daß das Profil sich nur nach oben oder unten bewegen kann. Dadurch wird der Auftrieb unmittelbar in einer Bewegung der Tragfläche deutlich. (Wichtig ist, daß sich die Ösen in der Nähe des Schwerpunktes der Tragfläche befinden.)

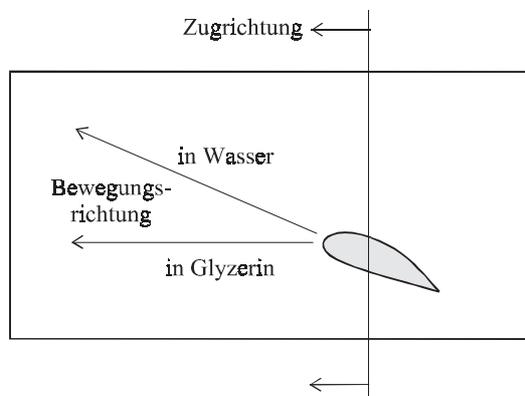


Abb. 13: Versuch zur Untersuchung des Auftriebs in Wasser und Glycerin: Man zieht das Tragflächenprofil an dem quer gespannten Faden durch die mit der jeweiligen Flüssigkeit gefüllte Wanne. Der Faden läuft am Profil durch zwei Ösen, so daß das Profil sich nach oben und unten frei bewegen kann.

Zusammenfassend läßt sich festhalten: Welches Strömungsbild sich einstellt und ob Auftrieb entsteht oder nicht, hängt einerseits von der Geschwindigkeit ab, andererseits aber auch von einer Eigenschaft des Fluids (genauer der Zähigkeit).

#### 4.4. Erklärung des Auftriebs über die Zirkulation

Im nächsten Unterrichtsabschnitt soll der Unterschied in den Strömungsbildern genauer erfaßt und über die Zirkulation beschrieben werden, denn in dem Unterschied steckt offensichtlich die Auftriebsinformation. Vergleicht man die Bilder einer Umströmung ohne und mit Auftrieb, kann man folgende Unterschiede als Hinweise auf die Zirkulation deuten: Es muß zum Strömungsbild der langsamen Umströmung offensichtlich eine Strömung hinzukommen, die die Strömung an der Hinterkante nach unten lenkt, an der Oberseite die Strömung beschleunigt und an der Unterseite verzögert. Dies ist die Zirkulationsströmung. Experimentell läßt sie sich sehr leicht mit einem Aufbau nach Abb. 14 nachweisen: Zwei dünne Wellpappestreifen sind mit Stecknadeln und Korken horizontal gelagert. Zieht man mit einer Tragfläche zwischen den Streifen hindurch, wird der obere Streifen nach hinten und der untere nach vorn bewegt. Das bedeutet: Die Luft an der Oberseite wird in Strömungsrichtung beschleunigt und an der Unterseite verzögert. Zieht man z.B. einen Zylinder zwischen den Strei-

fen hindurch, bewegen sich beide Zeiger gleichzeitig nach vorn, wie man es aufgrund der Reibung erwarten würde.

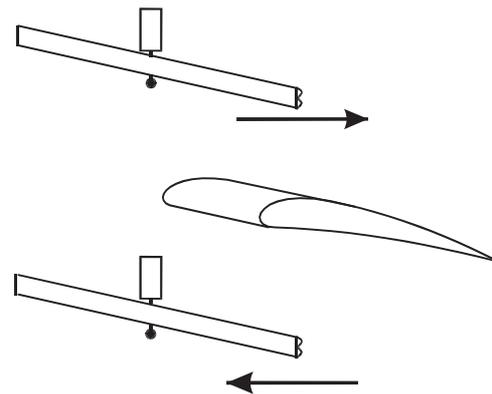


Abb. 14: Versuch zum Nachweis der Zirkulation: Zwei Wellpappestreifen sind mit Korken und Stecknadeln so befestigt, daß sie horizontal frei beweglich sind. Zieht man ein Tragflächenprofil mit genügend großem Anlauf zwischen den Streifen entlang, bewegen sich die Zeiger in die angegebenen Richtungen.

Dieser Versuch vermittelt einen guten Eindruck vom Drehsinn der Zirkulation. Die Frage, die sich nun stellt ist, wie kommt es eigentlich zu dieser Zirkulationsströmung. Dies wird nur über die Entstehung des Anfahrwirbels (siehe oben) verständlich. Zusätzlich muß noch deutlich gemacht werden, daß zu jedem Wirbel immer ein entsprechender Gegenwirbel produziert wird. Dies entspricht dem Drehimpulserhaltungssatz. Das Fazit ist schließlich: Der Auftrieb entsteht, weil an der scharfen Hinterkante des Tragflügels ein Wirbel entsteht und sich ein entsprechender Gegenwirbel um die Tragfläche legt. Notwendig dafür ist letzten Endes auch die Reibung der Luft mit der Tragfläche.

## 5. Schluß

Der obige Unterrichtsvorschlag legt den Schwerpunkt bei der Behandlung des Themas Fliegens auf die Strömungsphysik. Selbstverständlich ist dies nur eine Möglichkeit, das Fliegen im Unterricht zu thematisieren. Anregungen für andere Vertiefungsmöglichkeiten bietet z.B. die Zusammenstellung in [8].

## Literatur

- [1] Wodzinski, R.; Ziegler, A.: *Erklärung des Fliegens in der Schule*. in: MNU (1999) (in Druck)
- [2] Weltner, K.: *Flugphysik im Unterricht*. in: Physik in der Schule 35 (1997) 1, S. 3-9
- [3] Gerthsen-Kneser-Vogel: *Physik*. Springer: Berlin 1982<sup>14</sup>
- [4] Dubs, F.: *Aerodynamik der reinen Unterschallströmung*. Birkhäuser: Basel 1990<sup>6</sup>
- [5] <http://www.princeton.edu/~asmits/pow/index.html>
- [6] <http://www.monmouth.com/~jsd/how/htm>
- [7] Wilke, H.-J.; Patzig, W.; Hung, N.N.: *Einige experimentelle Möglichkeiten zur Demonstration und Untersuchung von Stromlinienbildern*. in: Physik in der Schule 36 (1998) 3, S. 96-101
- [8] Hahne, K.: *Fliegen und Flugmodelle. Materialien für einen fachübergreifenden NW-Unterricht*. Sozmat: Marburg 1988 (zu bestellen bei: Forum Eltern und Schule, Huckarder Str 12, D-44147 Dortmund)

# Alles, was fallen kann, fällt - oder auch nicht ...

Helmuth Mayr

*"Der Physikunterricht beantwortet nie gestellte Fragen"*  
Roman U. Sexl

Schon in den Siebziger-Jahren stellte der leider viel zu früh verstorbene Roman Sexl seine in Fachkreisen hochgeschätzten Lehrerfortbildungen unter das zitierte Motto und plädierte damit für eine pädagogisch-didaktische Erneuerung, die vom (noch immer weitverbreiteten) lehrerzentrierten, demonstrierenden zum schülerzentrierten, untersuchend-entdeckenden Physik-Unterricht führen sollte.

Diese Forderung umzusetzen, habe ich schon vor längerer Zeit versucht. Nach zunächst noch eher unsystematischen Ansätzen in den 80-er-Jahren wurde mit der Einführung eines naturwissenschaftlichen Laboratoriumsunterrichtes am BGRG-Wien-15/Schmelz seit dem Herbst 1990 konsequent ein Unterrichtskonzept erarbeitet, das den Schülerinnen und Schülern Gelegenheit gibt, physikalische, chemische und (seit Herbst 1997) auch biologische Lernziele entdeckend-untersuchend zu erarbeiten. Die mit den etwas kleineren "Laborklassen" gewonnenen fachdidaktischen Erkenntnisse und Einsichten legen nahe, daß entdeckend-untersuchende Lernphasen auch in größeren "Normalklassen" erfolgreich verwirklicht werden können. Im folgenden werden einige Experimente zu Fallbewegungen vorgestellt, die sich im entdeckend-untersuchenden Physikunterricht bewährt haben.

## Fallkegel

Zunächst wird auf ein Zeichenblatt ein Kreis mit einem Radius von etwa 15 bis 20 cm mit einem Kreisabschnitt von zirka 30° gezeichnet. Schneidet man diese Figur aus und klebt sie zusammen, erhält man einen Kegel (ohne Bodenfläche), der im folgenden "Fallkegel" genannt wird.

Hebt man mit einer Hand diesen Kegel (mit der Spitze nach unten) und mit der anderen Hand einen "kompakten Gegenstand", etwa eine Plastilinkugel gleich hoch und läßt diese beiden Körper gleichzeitig los, kann man das unterschiedliche Fallverhalten leicht erkennen: Im Gegensatz zur Plastilinkugel, die sich mit zunehmender Geschwindigkeit zum Erdboden hin bewegt, erreicht der Fallkegel nach einer Strecke von wenigen Zentimetern eine Maximalgeschwindigkeit, mit der er sich dann gleichförmig zu Boden bewegt.

Bisher haben alle Schüler - und auch Studenten - als Ursache dafür spontan den Luftwiderstand angegeben. Auf die Frage, welche Vorgänge denn diesen Luftwiderstand verursachen würden und von welchen Größen der Betrag dieses Widerstandes denn abhänge gab es üblicherweise keine spontanen Antworten mehr. Da wir bekanntlich nicht im Vakuum leben und der freie Fall in unserer Erfahrungswelt so gut wie nie auftritt, ist der Luftwiderstand sicher einer Untersuchung wert.

---

OSTr. Prof. Ing. Mag. Helmuth Mayr, BGRG Wien 15/Schmelz, Mitglied der Arbeitsgruppe Didaktik der Physik an der Universität-Wien.  
Dieser Artikel stellt eine geringfügig erweiterte Fassung eines Experimentalvortrages im Rahmen der Interpädagogica-1998 unter dem Titel "Forschen und Entdecken im Physikunterricht" dar.

Zunächst ist es auch oft für Oberstufenschüler nicht sofort einsichtig, daß der Luftwiderstand als eine nach oben orientierte Kraft zu interpretieren ist, die offensichtlich irgendwie von der Fallgeschwindigkeit abhängig sein muß. Solange sich der Fallkegel noch nicht bewegt, kann diese Luftwiderstandskraft nur den Betrag Null haben. Da nach dem Loslassen das Gewicht den Fallkegel immer schneller werdend "nach unten zu ziehen versucht", muß der Betrag der Luftwiderstandskraft mit zunehmender Fallgeschwindigkeit größer werden. Dieser Vorgang findet offensichtlich dann ein Ende, wenn diese nach oben orientierte Kraft gleich groß geworden ist wie die nach unten orientierte Gewichtskraft. Dann ist der Fallkegel in einem kräftefreien Zustand und bewegt sich deshalb gleichförmig weiter. Es gibt daher eine Fallstrecke, während der die in Richtung Boden zeigende Beschleunigung von  $g$  bis Null abnimmt.

Macht man vom Loslassen des Fallkegels eine Videoaufnahme und betrachtet man die Aufnahme mittels "jog-shuttle", also als Folge von stehenden Einzelbildern im zeitlichen Abstand von  $1/25$  sec, kann man sowohl diese kurzzeitige ungleichförmig beschleunigte Anfangsfallbewegung als auch die weitere gleichförmige Fallbewegung durch Streckenvermessungen am Bildschirm feststellen. Hat man die Fallgeschwindigkeit mittels Maßband und Stoppuhr vermessen, kann man diese mit den Daten der Videoaufnahmen vergleichen, was Einsichten in die Meßgenauigkeit ergibt.

Belastet man den Fallkegel mit Büroklammern, wird zwar das Gesamtgewicht, nicht aber der Luftwiderstand erhöht. Dadurch ergeben sich höhere Geschwindigkeiten während der gleichförmigen Fallphase (und etwas längere Beschleunigungsstrecken). Der Graph Gewicht versus Fallgeschwindigkeit zeigt in guter Näherung ein quadratisches Verhalten:

$$F_W \propto v^2$$

Produziert man verschieden große Fallkegel (die durch Belastung mit Kleinkörpern, etwa Büroklammern, auf gleiches Gewicht getrimmt worden sind), zeigt ein Graph der Fallgeschwindigkeit versus Anströmfläche ein lineares Verhalten:

$$F_W \propto A$$

Auch die Abhängigkeit von der Form kann untersucht werden, etwa durch Wegschneiden der Kegelspitze oder durch Auszacken des Kegelrandes oder durch den Übergang zu einem anderen geometrischen Gebilde, etwa einem Luftballon, dessen Gesamtgewicht mit Hilfe von Büroklammern oder ähnlichen Kleinkörpern gleich groß wie jenes eines parallel dazu betrachteten Fallkegels tariert worden ist.

Verständlicherweise sind die auf diese Weise erhobenen Befunde nicht so "direkt" umsetzbar wie die vorhin genannten Einflußgrößen auf die Widerstandskraft. An dieser Stelle kann die vom Lehrer kommende Information über den formabhängigen  $c_W$ -Wert Klärung in die u.U. verwirrende Datenfülle bringen.

Bislang ist es mir noch nicht gelungen, mit einfachen schulphysikalischen Mitteln einen experimentellen Zugang zur Proportionalität von Widerstandskraft und Luftdichte (bzw. der Dichte des Strömungsmediums) zu finden<sup>1)</sup>. Doch ließen Überlegungen zu einer möglichen Bewegung der Fallkegel unter Wasser auch diese Abhängigkeit verständlich werden.

Läßt man den Fallkegel nicht mit der Spitze nach unten, sondern mit der Spitze nach oben fallen, bemerkt man - vorausgesetzt, daß der Fallweg groß genug ist - daß sich der Kegel bereits in der Anfangsphase umdreht und dann (abgesehen von leichten Pendelbewegungen) wiederum mit der Spitze nach unten zu Boden fällt.

In der Diskussion hatten die Schüler sehr bald herausgefunden, daß dieser Vorgang mit dem labilen Gleichgewicht beim Loslassen und dem Einnehmen einer stabilen Endlage erklärt werden kann.

### Der fallende Magnet

Viele Schüler bringen Präkonzepte in den Unterricht mit, in denen magnetische und gravitative Kräfte nicht konsequent unterschieden und nicht als voneinander unabhängige Kraftarten aufgefaßt werden. Daraus folgend erwarten viele Schüler, daß ein Magnet schneller zu Boden fallen müßte als ein "gewöhnlicher" Körper.

Läßt man einen Stab-Magneten und eine etwa gleich große, kurze Stativstange gleichzeitig zu Boden fallen, kann dieses Mißkonzept als solches erkannt werden. Wiederum kann eine Videoaufnahme mit anschließender Einzelbild-Betrachtung die Situation besonders gut klären. (Da moderne Magnete erschütterungsempfindlich sind, empfiehlt es sich, diese beiden Fallkörper auf einer möglichst weichen Unterlage aufschlagen zu lassen.)

Reizvoll ist folgende Variante, nach der gleiche Magnete verschieden schnell fallen: Zunächst besorgt man sich bei einem Installateur zwei gleich lange Rohre, eines aus Kupfer und eines aus Plastik, deren Innendurchmesser etwas größer als der Durchmesser eines Stabmagneten<sup>2)</sup> ist. Dann montiert man diese beiden Rohre in einiger Entfernung parallel nebeneinander so, daß sie lotrecht nach unten zeigen und von einem Magneten durchfallen werden können.

Infolge der Gleichheit der mechanischen Fallwiderstandskräfte ist zu erwarten, daß die gleichzeitig losgelassenen Magnete auch zugleich an den Rohrenden wiederum zum Vorschein kommen. Es zeigt sich jedoch, daß der im Kupferrohr fallende Magnet wesentlich später das Rohrende erreicht als der im Plastikrohr fallende.

Immer sind Schüler und Studenten über den Ausgang dieses Experimentes zunächst verblüfft, und es dauert einige Zeit, bis sie erkennen, daß der im Kupferrohr fallende Magnet Wirbelströme induziert, die sich im Plastikrohr natürlich nicht ausbilden können. Infolge der Lenzschen Regel führt dies zu einer "Fallbehinderung" im Metallrohr, aber nicht im Plastikrohr.

<sup>1)</sup> Bekanntlich gilt für die hier betrachtete Luftwiderstandskraft die

$$\text{Beziehung: } F_W = c_W \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 / 2$$

<sup>2)</sup> Für dieses Experiment eignen sich die in der Chemie üblichen "Rührmagnete" besonders gut, da sie mit einer an den Kanten abgerundeten Teflonschicht ummantelt worden sind.

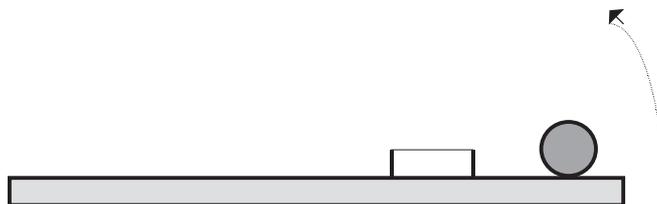
### Der Kugelfänger

In praktisch allen Physiklehrbüchern kann man lesen, daß alle Körper gleich schnell fallen. Als geübter Leser weiß man, daß damit der Vergleich der Fallbewegungen zweier benachbarter Körper im Vakuum gemeint ist, die derselben Fallbeschleunigung unterliegen.

Mit dem folgenden Versuch kann diese Aussage näher untersucht werden.

Zunächst besorgt man sich ein schmales Brettchen, das einige Dezimeter lang ist. In der Nähe eines der Enden dieses Brettchens sorgt ein geeignetes großes Loch dafür, daß ein kugelförmiger Körper, etwa ein Tennisball oder eine Kugel aus dem Physikinventar, ohne zu "verrutschen" aufliegen kann.

Etwas weiter in Richtung der Brettchenmitte wird ein "trogähnlicher" Behälter montiert, z.B. ein abgeschnittener Joghurtbecher.

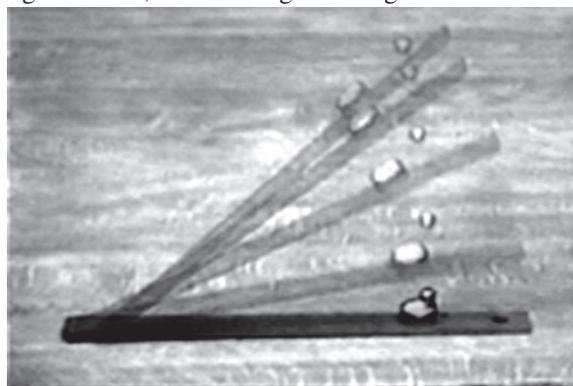


Hebt man nun das Brettchen an der "Kugelseite" bis zu einer geeigneten Höhe an und läßt es los, kann man beobachten, daß die Kugel vom Brettchen "abhebt" und schließlich in den Becher fällt.

Wieso ist das möglich? Es fallen doch alle Körper gleich schnell!

Demzufolge müßten sich doch das Brettchen-Ende und die Kugel stets gleich schnell bewegen, sodaß die Kugel nicht "abheben" kann.

Auch hier kann eine Videoaufnahme mit anschließender Einzelbildbetrachtung die Situation klären helfen. Man erkennt deutlich, daß sich das Brettchen-Ende schneller zu Boden bewegt als die Kugel. Wurde eine solche Höhe gewählt, daß sich die Kugel anfänglich genau lotrecht über jenem Punkt befindet, an dem nach dem Ende des Bewegungsablaufes der Trog zu liegen kommt, fällt die Kugel unweigerlich in den Trog.



Kugelfall: 5 Videobilder im Abstand von 1/25 sec

Die Schüler bemerken erstaunlich schnell, daß sich bei dieser Kippbewegung der Schwerpunkt des Brettchens mit der Fallbeschleunigung abwärts bewegt und daher - sozusagen gemäß dem Hebelgesetz - das Brettchen-Ende eine größere Be-

schleunigung als die Fallbeschleunigung erfahren muß. Die Kugel jedoch bewegt sich "nur" mit der Fallbeschleunigung abwärts. Daher "hebt" sie, von einem auf dem Brettchen gedachten Beobachter aus gesehen, von diesem ab. Ein "Mikro-Münchhausen" als hypothetischer Beobachter auf der Kugel würde feststellen, daß das Brettchen-Ende schneller fällt als er selbst.

Ist dies nicht ein schönes Beispiel für die Betrachtung ein und desselben Vorganges von verschiedenen Beobachtern aus?

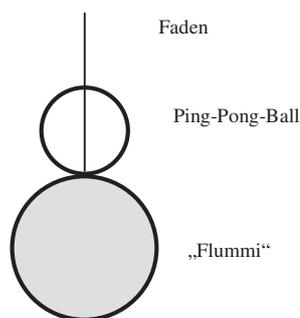
Eine Erweiterung der Erkenntnisse ist mit einer simplen Variation dieses Experimentes möglich:

Läßt man statt eines doch recht stabilen Brettchens einen Streifen aus Zeichenpapier kippen, zeigt sich, daß der Streifen mangels innerer Festigkeit in der Mitte [in unmittelbarer Nähe des Schwerpunktes] knickt. Filmaufnahmen von umkippenden Fabrikschornsteinen oder hohen Ziegelmauern zeigen ebenfalls diesen Knick, der in diesen Fällen zum Bruch des kippenden Körpers an diesen Stellen führt.

## Der Doppel-Ball

In einen handelsüblichen "Flummi-Ball" wird an einer Stelle mit einem scharfen Taschenmesser eine kleine Vertiefung geschnitten, die so groß ist, daß das Glasköpfchen einer in den "Flummi" gesteckten Stecknadel gerade "hineinpaßt". Dann nimmt man einen Ping-Pong-Ball und durchbohrt ihn an zwei gegenüberliegenden Stellen.

Bindet man an den Stecknadelkopf einen Faden, den man durch die Löcher des Ping-Pong-Balles durchfädelt, erhält man einen "Doppelball", der mit Hilfe des Fadens an einem Galgen aufgehängt werden kann.



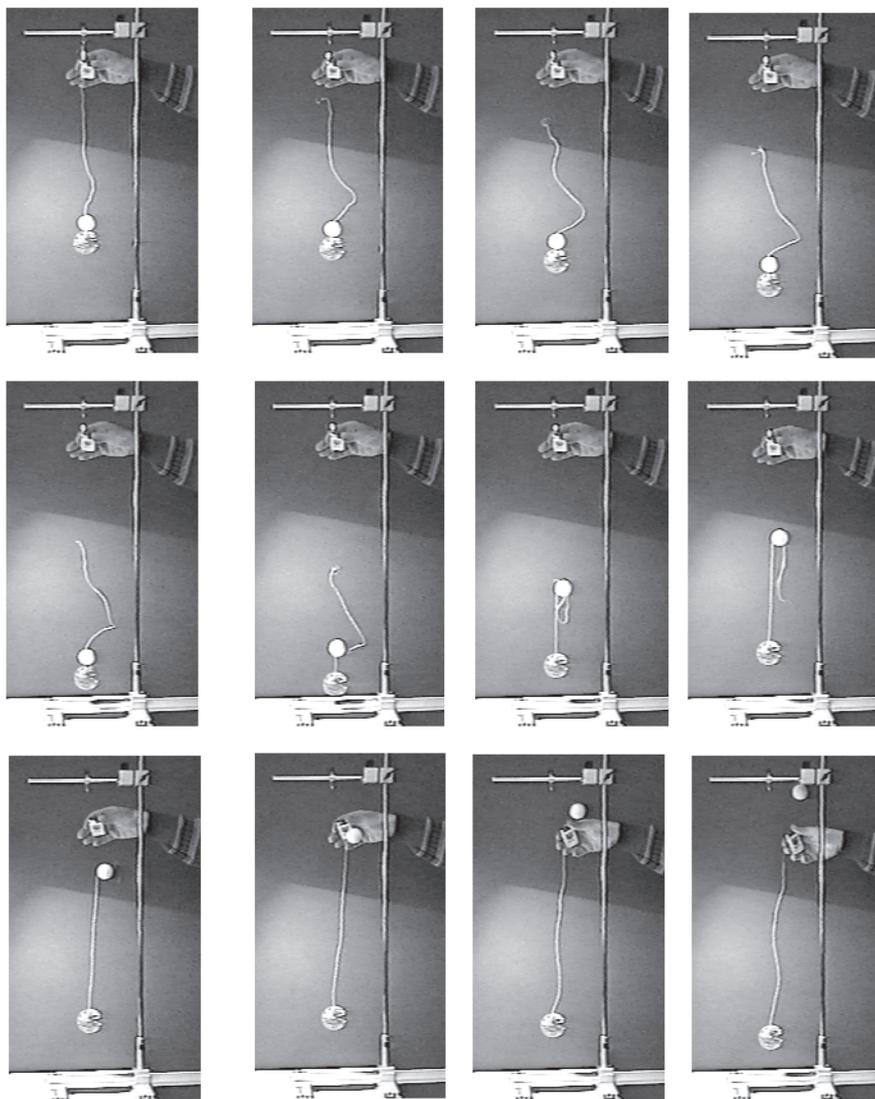
Unterhalb des Doppelballes sollte sich ein möglichst harter Boden befinden.

Brennt man den Faden durch, bewegen sich die beiden Bälle zunächst gemeinsam zu Boden. Nach dem Aufschlag jedoch trennen sich die Bälle. Während der "Flummi" eine wenig effektvolle lotrechte Wurfbewegung absolviert, kann der Ping-Pong-Ball mit Leichtigkeit bis zum Plafond springen!

Auch hier kann eine Videoaufnahme mit anschließender Einzelbildbetrachtung zusätzliche Klärung der doch sehr rasch ablaufenden Vorgänge bringen. Sofort nach dem Durchbrennen des Fadens nimmt dieser eine etwas gekrümmte, "entspannte" Position ein, die er bis zum Ende der Fallstrecke beibehält, während die beiden Bälle gemeinsam zu Boden fallen.

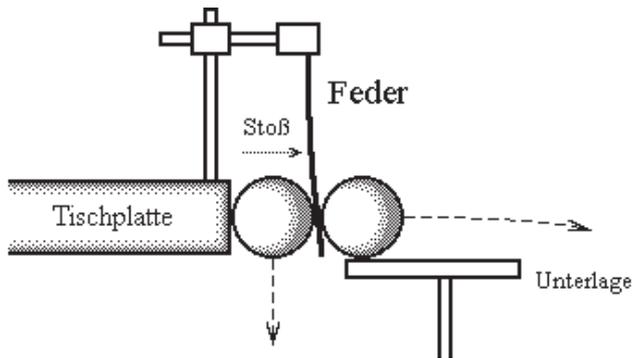
Nach dem Aufschlag erreicht der Ping-Pong-Ball eine extrem große "Absprunggeschwindigkeit", während der "Flummi" nur mäßig schnell wird.

Den Schülern wird sehr bald klar, daß es sich hier um eine besondere Form eines Stoßvorganges handeln muß, der mit gewisser Berechtigung als "Umkehrung" eines unelastischen Stoßes gedeutet werden kann, bei dem sich die beiden Partner vor dem Stoß gemeinsam bewegen und nach dem Stoß getrennte Wege gehen.



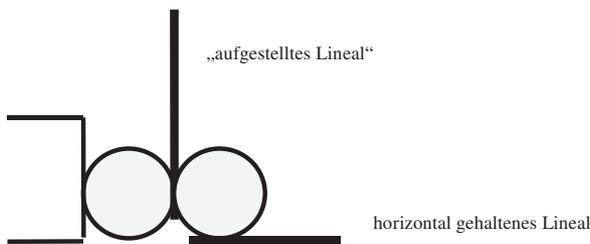
*Doppelball: Das erste Bild zeigt den Beginn des Falls kurz nach dem Durchbrennen des Fadens. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten vor und nach dem Aufprall sind direkt aus den Bildern ablesbar.*

## Zwei Plastilin-Kugeln



Eine der beiden Plastilinkugeln wird durch eine lotrecht eingespannte Blattfeder, ein Plastiklineal oder ähnliches an die Tischkante gedrückt.

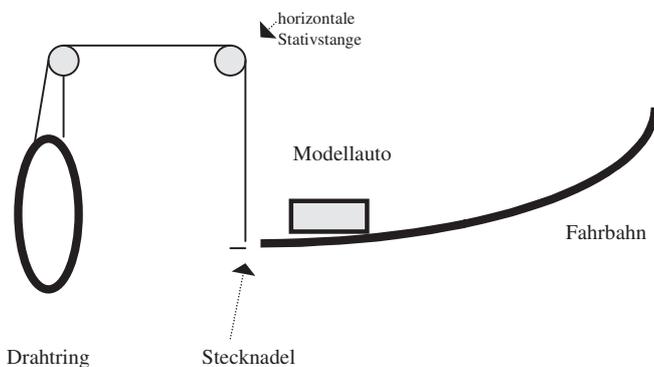
Die zweite Plastilinkugel liegt auf irgend einer Unterlage auf, die sich so weit von der Tischkante entfernt befindet, daß die erste Kugel unbehindert zwischen der Tischkante und der Unterlage hindurchfallen kann. Statt des skizzierten Aufbaues ist es auch möglich, daß ein oder zwei Schüler Plastiklineale in die entsprechenden Positionen halten und ein weiterer Schüler das Experiment einleitet:



Schlägt man kräftig auf die Feder, führt die eine Plastilinkugel einen horizontalen Wurf und die andere einen lotrechten Wurf durch. Egal, wie kräftig man auf die Feder schlägt, stets erreichen beide Kugeln gleichzeitig den Erdboden.

Mit diesem einfachen Experiment kann das Unabhängigkeitsprinzip sehr rasch und einsichtig geklärt werden.

## Der Autozirkus



Dies ist eine etwas aufwendigere, aber eindrucksvolle Variante des obigen Experimentes. Man benötigt dazu ein Modellauto, ein Stück einer biegsamen Modellauto-Fahrbahn, ein Stück

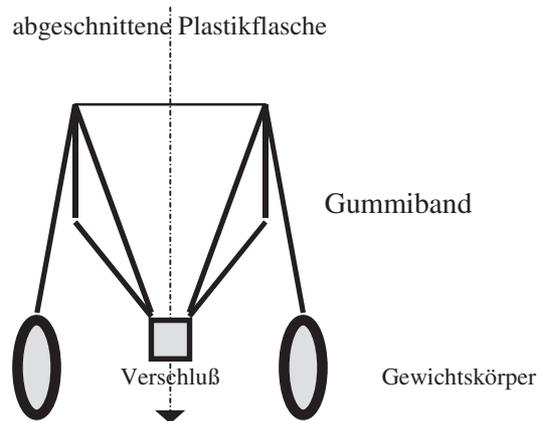
Draht (der zu einem Ring gebogen werden kann), eine Stecknadel, einen Faden und schulübliches Stativmaterial.

Zunächst wird die Fahrbahn mittels Stativmaterial so postiert, daß sie eine "Sprungschanze" mit horizontalem Schanzen Tisch bildet. Anschließend steckt man in die Fahrbahn eine Stecknadel und zwickt deren Köpfchen ab. Von dieser Stecknadel führt ein Stück Faden über zwei horizontal fixierte Stativstangen zu einem Drahtring, der sich genau auf derselben Höhe wie der Schanzen Tisch befindet und dessen Durchmesser etwa zwei- bis dreimal so groß wie die Modellautobreite ist.

Dann setzt man das Modellauto auf das obere Fahrbahrende auf und läßt es (ohne Stoß) los. Beim "Absprung" vom Schanzen Tisch streift das Modellauto den Faden von der Stecknadel, sodaß der Ring in dem Moment herabzufallen beginnt, in dem das Modellauto mit seiner horizontale Wurfbewegung anfängt. Ist der Abstand zwischen Schanzen Tisch und Ring nicht allzu groß, durchstößt das Modellauto unweigerlich den Drahtring.

Auch dieses Experiment kann das Unabhängigkeitsprinzip klären, insbesondere wenn man von dem eher raschen Vorgang ein Video aufnimmt, das man wiederum anschließend mit Einzelbildbetrachtung ("jog-shuttle") analysiert.

## Das "Fall-Gefäß"



Sieht man einmal vom Luftwiderstand ab, wirkt - vom Laborsystem aus betrachtet - nur mehr die Gewichtskraft auf die fallenden Körper ein. Doch wie macht sich das in den fallenden Systemen selbst bemerkbar?

Diese Frage kann mit einem "Fallgefäß" sehr einfach und eindrucksvoll untersucht werden:

Man schneidet von einer handelsüblichen Plastikflasche den oberen Teil ab. (Üblicherweise genügt dazu ein scharfes Küchenmesser). Dann fädelt man auf zwei längere Gummiringe je einen etwas schwereren Gegenstand, der diese Gummiringe spannen kann, auf. Besonders einfach ist dabei die Verwendung größerer Schraubenmutter. Die so präparierten Gummiringe werden dann in den Flaschenhals eingefädelt und mit dem Drehverschluß fixiert.

Auf diese Weise entsteht - siehe Skizze - ein oben offenes Gefäß, von dem seitlich die durch die Gewichtskörper gespannten Gummibänder herausbaumeln.

Läßt man nun diese Anordnung fallen, ziehen die Gummibänder im Moment des Loslassens mit einem deutlich hörbaren Geräusch die beiden Belastungskörper ins Innere der abge-

schnittenen Flasche, was sowohl Schüler als auch Studenten üblicherweise verblüfft zur Kenntnis nehmen.

Was ist passiert? Abgesehen vom Luftwiderstand fällt die Anordnung durch die Gewichtskraft beschleunigt zu Boden. In ihr wirken nur innere Kräfte, das sind hier die elastischen Kräfte der gespannten Gummibänder. Da diese nicht mehr durch das Gewicht der Belastungskörper gespannt werden, können sie sich auf ihre Ruhelänge zusammenziehen. Ein genaue Betrachtung der einzelnen Teile des Systems ist wieder mit Videoanalyse möglich. Nur der Schwerpunkt führt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus.

Da es die Schüler gewohnt sind, alle Vorgänge ihrer Umgebung aus der Sicht des Laborsystems wahrzunehmen und einzuordnen, fällt ihnen der gedankliche Systemwechsel meist schwer. Auch hier kann wiederum eine Videoaufnahme mit anschließender Einzelbildbetrachtung den gedanklichen Systemwechsel erleichtern und die Schwerelosigkeit in fallenden Systemen verständlich machen.

### Fallendes Wasser (1)

Die Schwerelosigkeit der Fallbewegung hat noch eine andere Konsequenz, die das folgende Experiment recht eindrucksvoll belegen kann:

Man bohrt in der Nähe des Bodens eines Gefäßes auf zwei gegenüberliegenden Seiten zwei kleine Löcher<sup>3)</sup>. Dann hält man zunächst mit zwei Fingern die Löcher zu und füllt Wasser ins Gefäß. Gibt man dann die Öffnungen frei, beginnt selbstverständlich das Wasser aus den beiden Löchern auszurinnen.

Läßt man dann das Gefäß fallen, kann man beobachten, daß das Ausfließen des Wassers in dem Moment aufhört, in dem die Fallbewegung beginnt.

Auch in diesem Fall kann der doch recht rasche Vorgang durch eine Videoaufnahme mit anschließender Einzelbildbetrachtung wesentlich besser wahrgenommen und geklärt werden. (Um "Überschwemmungen" im Saal zu verhindern läßt man das Gefäß am besten im Freien oder in eine Wanne fallen).

Die Schüler orten üblicherweise sehr rasch den hydrostatischen Druck [ $p = \rho \cdot g \cdot h$ ] als die Ursache für das Ausrinnen des Wassers. Wird nun der Faktor  $g = 0$ , wird dadurch auch  $p = 0$  und es gibt für das Wasser sozusagen keinen Grund mehr, aus den Öffnungen auszurinnen.

Fazit: In schwerelosem Wasser gibt es keinen hydrostatischen Druck!

### Fallendes Wasser (2)

Das Fehlen des hydrostatischen Druckes in fallendem Wasser hat noch eine weitere Konsequenz: Bekanntlich führt die Druckverteilung innerhalb eines ruhenden Wasservolumens zu einer horizontalen Oberfläche bzw. zu gleichen Wasserstandshöhen in einem kommunizierenden Gefäß. Entfällt dieser Gewichtsdruck, müßte es auch "schräge" Wasseroberflächen geben!

<sup>3)</sup> Der Autor hat mit Plastikbechern, in die man diese Löcher bequem mit einer spitzen Schere bohren kann oder mit leeren Katzenfutterdosen, bei denen die Löcher eher mit einem Bohrer gebohrt werden sollten, die besten Erfolge erzielt.

Dies läßt sich experimentell recht einfach verifizieren: Man befüllt eine durchsichtige Plastikflasche (oder einen abgeschnittenen Teil davon) mit etwas gefärbtem Wasser und läßt sie fallen, wobei es empfehlenswert ist, die Flasche anfänglich mit zwei Händen zu halten und dann nicht ganz gleichzeitig loszulassen<sup>4)</sup>.

Der Fallvorgang erfolgt so rasch, daß man den gewünschten Effekt normalerweise mit unbewaffnetem Auge nicht wahrnehmen kann. Wiederum schafft eine Videoaufnahme mit anschließender Einzelbildbetrachtung Abhilfe. In ihr kann man deutlich erkennen, daß die Wasseroberfläche während des Herabfallens im allgemeinen nicht horizontal ist, was wiederum belegt, daß fallende Körper schwerelos sind.

### Fallendes Wasser und ein Ping-Pong-Ball

Füllt man einen Plastikbecher bis zum Rand mit Wasser und legt einen Ping-Pong-Ball hinein, schwimmt dieser selbstverständlich auf der Wasseroberfläche, wobei er nur wenig eintaucht. Benetzt man nun diesen Ping-Pong-Ball etwa durch Drehen mit einem Finger und läßt die ganze Anordnung etwa aus Schulterhöhe auf einen möglichst harten ebenen Boden aufprallen, springt der Ball mehrere Meter hoch!

(Auch in diesem Fall sollte man, um Überschwemmungen zu vermeiden, dieses Experiment im Freien durchführen oder im Saal eine Wanne verwenden, in die ein möglichst massiver Untergrund eingelegt wurde.)

Um den geschilderten Effekt deutlich zu machen, benötigt man meist einige Versuche, da es nicht einfach ist, den Becher so loszulassen, daß er lotrecht auf dem Boden aufschlägt.

Während des Herabfallens sind sowohl das Wasser als auch der Ping-Pong-Ball (und auch der Becher) schwerelos. Da die Balloberfläche naß ist, wird der Ball durch die Oberflächenspannung völlig ins Wasser "gezogen". Im Moment des Aufpralles allerdings wirkt wiederum die Schwerkraft. Daher gibt es eine nach oben gerichtete Kraft, die den Ball in die Höhe schnellt. Darüber hinaus führt das gesamte System wiederum einen ähnlichen Stoßvorgang durch, wie wir ihn beim Doppelball bereits kennengelernt haben.<sup>5)</sup> Dies führt zu einer hohen Startgeschwindigkeit des Ping-Pong-Balles.

(Vor zwei Jahren schoß eine Schülerin im Schulhof einen Ping-Pong-Ball auf diese Weise bis in die Höhe des 2. Stocks.)

### Schlußbemerkung

Die Experimente in diesem Artikel habe ich in verschiedenen AHS-Klassen im Rahmen von untersuchend-entdeckenden Lernphasen eingesetzt und damit beste Erfahrungen gemacht. Durch die angeleitete Untersuchung wurden bislang unbekannte Phänomene kennengelernt und bereits gewonnene Einsichten vertieft.

Unsere "Schulphysik" ist voll von Erstaunlichem und Verwunderlichem und wartet nur darauf, von Schülerinnen und Schülern entdeckt und verstanden zu werden.

<sup>4)</sup> Dazu muß man sich normalerweise nicht besonders anstrengen. Da die meisten Menschen eher ausgeprägte Rechts- oder Linkshänder sind, läßt eine Hand automatisch etwas früher los als die andere.

<sup>5)</sup> Zusätzlich treten noch weitere "Schmutzeffekte" auf, die von den jeweiligen Detailverhältnissen, etwa dem Platzen des Plastikbeckers beim Aufschlag, abhängig sind.

# Physik und Sicherheit im Verkehr

## Die letzte Sekunde ohne Gurt

Wer glaubt Anschnallen ist nur etwas für Angsthasen, den lehrt eine Zeitstudie über die letzte Sekunde bei einem Frontalaufprall mit 80 km/h das Fürchten:

- 1,0 sek: Starr vor Schreck springen Sie auf die Bremse, ein Ausweichen ist nicht mehr möglich.
- 0,9 sek: Sie umklammern krampfhaft das Lenkrad und die Fingergelenke werden weiß.
- 0,8 sek: Noch zirka 30 cm bis zum Aufprall.
- 0,7 sek: Frontalaufprall - die Stoßstange beginnt, in das Fahrzeug einzudringen.
- 0,6 sek: Ihr Körper wird mit 80 km/h nach vorne geschleudert. Sie haben nun ein Gewicht von 3 t und werden mit 20-facher Schwerkraft aus dem Sitz gehoben. Ihre Beine brechen an den Kniegelenken. Ihr Bremsfuß drückt sich in das Becken, und es bricht.
- 0,5 sek: Ihr Körper löst sich mit verspanntem Nacken und starr aufgerichtetem Kopf aus dem Sitz, die gebrochenen Kniegelenke bohren sich in das Armaturenbrett und deformieren es. Das Lenkrad verbiegt sich unter dem Druck ihrer Hände.
- 0,4 sek: Ihr Auto ist nun um zirka 60 cm kürzer. Ihr Fahrzeug beginnt anzuhalten, Sie jedoch bewegen sich noch immer mit 80 km/h ihrem Lenkrad entgegen.
- 0,3 sek: Ihre Hände sind am Lenkrad verkrallt, die Daumen brechen, es folgen Gelenke und Unterarme. Schließlich bohrt sich das Lenkrad und Lenksäule in ihren Brustkorb. Die Lunge wird perforiert und die Arterien werden zerfetzt.
- 0,2 sek: Ihre Füße werden aus den Schuhen gerissen und der Kopf prallt gegen die Windschutzscheibe. Bisher hatten Sie noch keine Zeit zu Schreien. Sie werden auch nie mehr dazukommen.
- 0,1 sek: Das Fahrzeug vollbringt seine letzte Deformation und Ihr Oberkörper wird unbarmherzig gegen Lenksäule und Armaturen gepreßt. Ein Blutschwall bricht aus ihrem Mund und Ohren. Der Schock löst einen Herzstillstand aus.
- 0,0 sek: Sie sind tot.

Manfred Jurkowski,  
*Der Falter*

## Gurt für die Stadt? Helm beim Radfahren?

### Helmut Kühnelt

"Ich stütz mich doch am Lenkrad ab", sagt der Vater. "Der Helm ruiniert mir nur die Frisur", so die Tochter.

Die nebenstehende Schilderung "Die letzte Sekunde ohne Gurt", erschienen vor einiger Zeit im Falter, ist zwar physikalisch nicht in allen Einzelheiten korrekt, doch beschreibt sie die Folgen durchaus realistisch.

Dank Zeitlupenstudien von Crashtests steht für den Unterricht Anschauungsmaterial [1] zur Verfügung, das die quantitative Auswertung durch Schüler erlaubt und damit den einfachsten

Gesetzen der konstanten und beschleunigten Bewegung Lebensbezug gibt.

50 km/h oder 14 m/s im Stadtgebiet? So langsam? Bei einer Reaktionszeit, für die nach StVO etwa eine Sekunde anzusetzen ist, legt man 14 m zurück.

Wie kann man ohne Auto diese Geschwindigkeit erreichen? 14 m/s erreicht man beim Sprung vom 10 m-Turm im Schwimmbad, der Fall dauert 1,4 s. Die wichtige Beziehung

$$v^2 = 2gH, \text{ bzw. } t^2 = 2H/g$$

setzt Endgeschwindigkeit  $v$ , bzw. Fallzeit  $t$  mit der Fallhöhe  $H$  und der Fallbeschleunigung  $g$  in Beziehung.

(Noch ein paar Anmerkungen zum Wasserspringer. Da der Springer ins Wasser etwa halb so tief eintaucht, wird er mit einer mittleren Verzögerung von 2  $g$  abgebremst. Klar ist, daß ein Bauchfleck aus 10 m Höhe wahrscheinlich tödlich ist. Aus dem Luftwiderstand wird der Widerstand im Wasser: Die Dichte des Mediums ist tausendmal größer und  $c_w \rho A v^2 / 2$  beim Auftreffen läßt sich zu  $10^5$  N abschätzen, also mehr als das hundertfache Gewicht! Am Mond wäre Kunstspringen viel spektakulärer als auf der Erde: für die gleiche Endgeschwindigkeit könnte der Turm 60 m hoch sein und der Sprung würde 8,7 s dauern - viel Zeit für Akrobatik!)

Zurück zum Stadtverkehr! Reaktionsweg von 14 m und - bei einer kaum erreichbaren exzellenten Bremsverzögerung von  $a = 9,8 \text{ ms}^{-2}$  - Bremsweg von 10 m addieren sich zum beachtlichen Anhalteweg von 24 m (nach der Faustregel Bremsweg =  $(v/10)^2$ , entsprechend  $a = 4 \text{ ms}^{-2}$ , sogar zu 39 m).

Trifft das Auto allerdings mit 50 km/h frontal auf eine Mauer (oder ein gleichartiges Fahrzeug), so ist der Anhalteweg gleich dem Bremsweg und abhängig von der Verformbarkeit der Frontpartie.

Nehmen wir großzügig 1 m für Knautschzone und Bremsweg und eine konstante Verzögerung an, so sehen wir unmittelbar aus (1):

$$\text{Verzögerung} \times \text{Bremsweg} = \text{konstant.}$$

Daher beträgt im Beispiel die Bremsverzögerung 10  $g$ . Das Fahrzeug bleibt binnen 0,45 s stehen. Der unangeschnallte Fahrer bewegt sich jedoch mit 14 m/s weiter und legt in dieser Zeit über 6 m zurück. Um dies zu verhindern, müßte er sich am Lenkrad mit seiner zehnfachen Gewichtskraft abstützen.

Noch drastischer macht man sich die Schwierigkeit des Abbremsens mit der Vorstellung klar, man würde aus 10 m Höhe auf Beton springen und versuchen, den Fall mit den Händen abzufedern - dies würde niemand versuchen!

Doch wozu einen Fahrradhelm? Neben dem offensichtlichen Vorteil, daß er beim Sturz gegen scharfe Kanten Schutz bietet, ist er als Knautschzone nützlich.

15 km/h, ein geringes Tempo für Jugendliche, entspricht praktisch 4 m/s. Wie können wir diese Geschwindigkeit erreichen? Beim Fall aus Küchentischhöhe (80 cm)! Aber welchen Bremsweg haben wir, wenn wir mit dem Kopf aus dieser Höhe aufschlagen? Die Schädelschale wird sich kaum verformen,

was macht der Untergrund? Ein Bremsweg von 1 cm bedeutet bereits 80 g!

Ein kleines Handexperiment kann die Sinnhaftigkeit eines Sturzhelms verdeutlichen: Ein hartgekochtes Eis - harte Schale, weicher Kern - stehe als Modell für unseren Kopf. Aus Tischhöhe auf eine Styroporplatte fallen gelassen wird es meist unbeschädigt bleiben. Es braucht aber keine 80 cm, um beim Fall auf einen harten Boden das ungeschützte Ei zu zerrümmern.

Zum Abschluß: Das Argument, daß ein Sturz meist wegen des schrägen Auftreffens auf der Straße glimpflicher verlaufen müßte, trifft nicht zu. Die Vertikalgeschwindigkeit bestimmt sich aus der ursprünglichen Höhe des Schwerpunkts und diese ist größenordnungsmäßig 1 m - der Helm ist also bei allen Geschwindigkeiten nützlich.

(Hinweis: Beim Kuratorium für Verkehrssicherheit gibt es Sturzhelme für Eier. Mit Wassermelonen oder Kürbissen und ausgemusterten Helmen sind am Schulhof spektakuläre Versuche möglich.)

[1] Crashtests im AVI-Format, Informationen und Analyseprogramm unter <http://www.physik.uni-muenchen.de/sektion/didaktik/Computer/computer.htm>.

## Just for fun!?

### Ilsa-Maria Figl

5.Klasse AHS (RG), eine Woche vor Beginn der Osterferien: Wir haben ein Arbeitsprojekt über Kräfte hinter uns und den Themenbereich Verkehrssicherheit vor uns. Was machen wir in der letzten Stunde vor den Osterferien? Ich erinnere mich an den Experimentalvortrag von Prof. Kühnelt im Rahmen der Interpädagogika und an den Versuch zu folgendem Problem: "Wie schütze ich ein rohes Ei beim Aufprall, wie meinen Kopf als Zweiradfahrer?"

*Die Vorbereitung:* Für einen Gruppenwettbewerb teilen wir gegen Ende dieser Stunde die Klasse in vier Gruppen, jede Gruppe soll selbst Material mitbringen, um ein rohes Ei aus möglichst großer Höhe unbeschädigt landen zu lassen. Ich werde die rohen Eier mitbringen. Die Schüler beginnen sofort eifrig Strategien zu besprechen. Werden sie trotzdem darauf vergessen?

*Die letzte Stunde vor den Osterferien:* Zwei Gruppen sind voll ausgerüstet und ein wenig aufgeregter schon vor dem Läuten im Saal, die beiden anderen Gruppen kommen etwas verlegen, sie haben vergessen, trotzdem sind sie neugierig.

Gruppe I hat einen kleinen Fallschirm aus einem quadratischen Stück Abdeckfolie mit einer kegelstumpfförmigen Gondel gebastelt, braucht noch etwas Watte, verpackt ihr Ei sorgfältig und will die Konstruktion im Stiegenhaus ausprobieren.

Gruppe II hat nichts mit, aber zwei Vorstellungen, die sie unbedingt ausprobieren will! Sie fül-

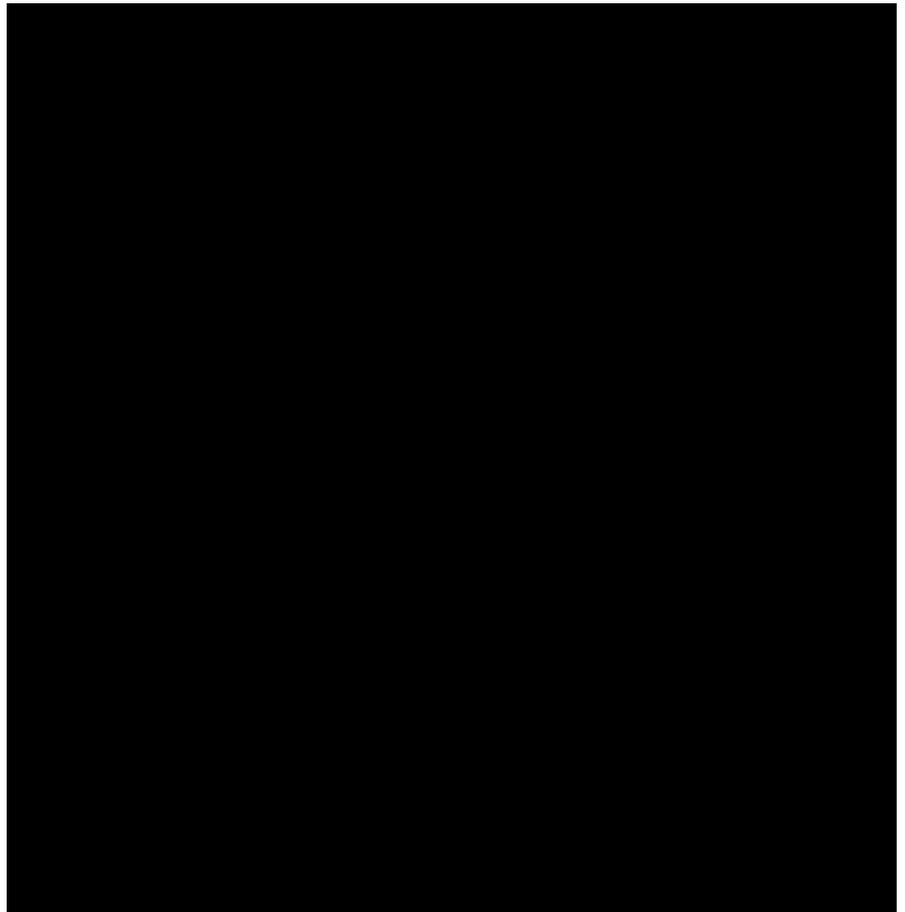
len eine Kunststoffwanne mit Wasser. Das Ei fällt von Tischkantenhöhe und ist kaputt. Sie lassen nicht locker, wollen noch unbedingt den Schwamm, machen ihn nass. Bevor sie das Ei darauf verschnüren, müssen sie es in ein Jausensackerl packen - so kann ich den ärgsten Gatsch verhindern. Da ich auch mit den anderen beschäftigt bin, wollen sie mir zwar sehr charmant ein unversehrtes Ei präsentieren, was die anderen heftig protestierend nicht zulassen.

Gruppe III schaltet sich jetzt ein. Sie haben eine oben abgeschnittene große Getränkeflasche aus Kunststoff mit, die sie fast voll mit Wasser füllen. Ihr Ei überlebt den Sturz aus etwa 40 cm. Bei der Steigerung der Höhe trifft die Kante und zerplatzt - ein Lot muss her und jetzt gelingt eine Höhe von ca 70 cm. APPLAUS! Weitere Höhen wurden wegen der Treffunsicherheit nicht mehr ausprobiert. Sie haben ihre Lösung daheim ausprobiert und beobachtet, dass das Ei in einem schmalen Gefäß nicht so tief eintaucht. Ihre Vermutung war, dass dies mit einer günstigeren Druckverteilung auf das Ei verbunden sei.

Gruppe IV: hat ganz vergessen.

Jetzt wird der Fallschirm der Gruppe I ausprobiert, ein zentriertes Loslassen im Stiegenhaus ist schwierig. So schlägt die Gondel zweimal an die Wand, das Ei hat zwar einen kleinen Sprung, lässt sich aber durchaus noch hartkochen.

Gruppe I und III bekommen als Sieger Überraschungseier. Während die Eier hartkochen, zeige ich einen passenden Videozuschnitt zum Thema Kräfte.



*Motorrad-Crash mit Dummy*

*Geschwindigkeit 60 km/h, Bilder im Abstand von 1/40 sec. Durch Ausmessen an den Bildern lassen die Beschleunigungen der einzelnen Teile des Motorrads, des Fahrers und des Autos abschätzen, das einen kräftigen Stoß erhält. Quelle: CD-Rom Multimedia Motion von Cambridge Science Media, <http://www.cityscape.co.uk/csm>*

# Blockpraxiserinnerungen

Martin Hahn

## Der erste Tag

Was in allen Schulen eigentlich fast immer auffällt, ist das etwas größere Wohnzimmer, das Lehrerzimmer genannt wird. Dort wird dann versucht, für die Studenten einen geeigneten Platz zu finden, was mit ein paar Umstrukturierungen auch erfolgreich gemeistert werden kann. Man wird dem Lehrerkollegium vorgestellt oder vollzieht dies selbst, ohne aufdringlich sein zu wollen. Oft bemerkt man hier ein Obrigkeitsverhalten, das vom Studenten selbst ausgeht: man ist neu; die anderen haben viel mehr Erfahrung... Diese anfängliche Zurückhaltung weicht jedoch mit zunehmender Vertrautheit. Ich habe eigentlich nur gute Erfahrungen seitens der Kollegschaft erfahren: Jeder versucht zu helfen, wenn der Kopierer wieder mal spinnt; man tauscht Meinungen über Schüler aus.

Auch gab es in dieser Schule keine verunglimpfenden Gespräche über nicht anwesende Dritte, was in anderen Schulen zu meinen Bedauern sehr wohl geschieht. Dort heißt es ab und zu: "Borgen Sie ja keine Lernmaterialien her, beschriften Sie alles mit ihrem Namen und der Kollege XY hat sowieso keine Ahnung von Pädagogik und Unterricht."

Im Gegenteil, es wurde bereitwillig über neue Methoden, die ausprobiert wurden, berichtet und Lernmaterial zur Verfügung gestellt. Vielleicht ist dieses Phänomen darauf zurückzuführen, daß die Schule im Team-teaching-system geführt wird, was ja eine höhere soziale Bereitschaft voraussetzt.

Der nächste spannende Eindruck ist der erste Eintritt in die Klasse. Davor macht man sich natürlich einige Gedanken: Soll ich strenge oder legere Kleidung tragen, bin ich ausgeschlafen, hoffentlich werde ich nicht heiser, hoffentlich passiert mir kein fachlicher Fehler. Die Antwort darauf würde meiner Meinung so lauten: Sachen tragen, in denen man sich wohl fühlt; Fehler dürfen in begrenzten Ausmaß für Fehleranalysen passieren, schließlich sind auch Lehrer mit 20-jähriger Berufserfahrung, bei eigener Beobachtung, nicht vor ihnen gefeit. Ich glaube, daß es nicht sinnvoll ist, eine Person in der Klasse zu spielen, die man nicht ist. Kinder merken dies im allgemeinen sehr schnell und sind möglicherweise darüber enttäuscht.

Student und Schüler begegnen einander mit freudiger Neugier. Für beide ändert sich der Alltag, beide wollen voneinander einiges wissen: Alter, Ausbildung, welche Fächer man unterrichtet. Dieser Moment ist wahrscheinlich einer der wichtigsten für eine fruchtbare Beziehung.

## Unterricht

Man wird von Lehrern auf gewisse Schüler vorbereitet. ein Auszug: gescheit aber faul, fleißig, versteht nichts, tratscht, bemüht, ...

Es fiel jedoch auf, daß Schüler bei verschiedenen Lehrern unterschiedlich auffallen. Es war durchaus der Fall, daß Schüler,

die als faul und desinteressiert galten, aufblühten und erstaunliche Leistungen hervorbrachten, andere wieder in ihrer Motivation und Zielerreichung ein wenig absackten.

Beim Unterricht merkte ich schnell, daß er ganz anders ablaufen muß, als auf ausgesuchten Übungshauptschulen, die aber durchaus ihre Berechtigung haben, da man ja später auch in diesen Schulen eingesetzt werden kann. Trotzdem, in der herkömmlichen Hauptschule muß sicher mehr Augenmerk gelegt werden auf die sozialen Beziehungen zwischen Schüler und Schüler und zwischen Lehrer und Schüler. Hier liegt mein eigentlicher Kritikpunkt bezüglich der Ausbildung. Man spricht davon, daß der Lehrer auch Erzieher ist, es wird jedoch an den Akademien angenommen, daß jeder a priori weiß, was eine gute Erziehung ist. Daß das Gegenteil Realität ist, erfahre ich von Tag zu Tag aus Gesprächen mit Mitstudenten.



Die Tage verfliegen eigentlich, und die zeitliche Belastung war niedriger als im Studentenalltag. Grund war vielleicht, daß ich mich an Wochenenden vorbereitete und praktisch nur eine halbe Lehrverpflichtung übernahm. Einziges Zeitproblem bestand in meinen Fall aber in der Pause zwischen zwei Physikstudenten, in der die Zeit für Wegräumen des Alten und Herräumen des Neuen knapp wurde, obwohl die Geräte für die folgende Stunde bereits auf einem Wagen vorbereitet waren. Eine Gangaufsicht war in diesem Fall nur unter großen Mühen zu halten.

Da der Anteil der Schüler mit nichtdeutscher Muttersprache höher war, als es mir bis zu diesem Zeitpunkt bekannt war, rechnete ich mit immensen Sprachproblemen, was sich als falsch herausstellte. In Mathematik gab es überhaupt keine Probleme, in Physik mußte man sich darauf einstellen, daß Schüler die Begriffe und Phänomene mit Worten umschrieben. Aber lassen Sie mal einen Durchschnittsösterreicher Kapillaren aussprechen (Betonung) oder die Bedeutung erklären. Es funktionierte jedoch, daß die Schüler mit minimalen Hilfen selbst Merksätze formulieren konnten, die aber dann zu liebe der (un-)gültigen Rechtschreibung an Tafel oder Folie geschrieben wurden.

Martin Hahn, Student an der Pädak Wien-Strebersdorf, absolvierte das Blockpraktikum in der HS20, Staudingergasse, Wien

## Schularbeit

In der ersten Woche waren zwei Schularbeiten angesetzt, die ich auch verbessern durfte. Als ich den Umfang der Schularbeit sah, dachte ich: "Die Schüler können damit nie fertig werden." Daß das Gegenteil der Fall war, wurde mir bei der Verbesserung klar; viele Schüler rechneten die ganze Schularbeit durch. Anscheinend bekommt man mit der Zeit doch eine gute Vorstellung, wie weit man Schüler fordern kann, ohne sie mit Beispielen zu überladen.

Die beiden Physikttests, die von mir formuliert und durchgeführt wurden, liefen im großen und ganzen reibungslos ab. Das Thema war Reibung und Teilchenvorstellung in Flüssigkeiten. Bei der Begutachtung der Tests trat ein Fehler der Schüler immer wieder auf: "Die Teilchen sind leicht gegeneinander verschiebbar." → wurde oft mit "ja" beantwortet; "Flüssigkeiten lassen sich leicht zusammendrücken." → wurde ebenfalls oft mit "ja" beantwortet. Diesen Fehler, der bei beiden Gruppen in 90 % der Fälle auftrat, nahm ich zum Anlaß, diesen Teil der gehaltenen Stunde nochmals anhand von Experimenten zu wiederholen und die gemachten Fehler aufzudecken.

Während der drei Wochen erkrankte ich leicht (Schnupfen, Heiserkeit), was natürlich für mich eine zusätzliche Belastung darstellte.

In den drei Wochen wächst etwas zwischen den Schülern und dem Studenten, das am Ende wieder zerstört wird. Trotzdem ist der gegenseitige Abschied sehr herzlich und mit viel Bedauern verlaufen.

## Theorie und Praxis

Nach meiner Rückkunft an die PÄDAK Strebersdorf, hörte ich von vielen Studenten: "Ich hab' fast nichts, was ich hier lernte, in der Praxis brauchen können." Natürlich ist man als Student, wenn man in den Alltag zurückkehrt, ein wenig mißmutig. Und es gibt sicher Gebiete in den verschiedenen Wissenschaften, die man als Lehrer sicher nie wieder braucht (Bsp.: Welche chemischen Reaktionen spielen sich bei einem Merkprozeß in unserem Gehirn ab). Es verlangen viele Studenten, daß ein möglicher Weg für erfolgreichen Unterricht gezeigt wird. Wahr ist aber meiner Meinung nach, daß Unterricht situationsabhängig ist und jeder Lehrer in bestimmten Situationen anders reagiert. Es gibt keine Universalmethode, die absolut zum höchstmöglichen Ziel führt.



---

# ÖPG 2000 - Projektwettbewerb für Schulen

In der die Jubiläumstagung begleitenden Physik-Show sollen neben den Physik-Instituten der Österreichischen Universitäten auch Schulen Schauexperimente für die Öffentlichkeit präsentieren. Aus diesem Grund wird im Schuljahr 1999/2000 ein Physik-Projektwettbewerb durchgeführt, zu dem Allgemeinbildende und Technisch-Gewerbliche Höhere Schulen eingeladen werden. Ziel der von Schülerteams erarbeitenden Projekte soll es sein, bestimmte physikalische Sachverhalte möglichst eindrucksvoll erlebbar und begreifbar zu machen. Dazu sollen experimentelle Anordnungen entwickelt werden, die eine Vorführung vor Publikum auf öffentlichen Straßen und Plätzen möglich machen. Die Tagungsleitung wird an das Ministerium für Unterricht und Kunst sowie die jeweiligen Landesschulräte mit dem Ersuchen herantreten, geeignete organisatorische und finanzielle Bedingungen für den Wettbewerb zu ermöglichen.

Die Allgemeinbildenden und Technisch-Gewerblichen Höheren Schulen werden gebeten, ihr Interesse an der Teilnahme am Wettbewerb vor den Sommerferien der Tagungsleitung mitzuteilen. Zu Beginn des Schuljahres 1999/2000 wird die Tagungsleitung alle angemeldeten Schulen kontaktieren, um über die genauen Wettbewerbsbedingungen zu informieren, die Projektthemen mit den jeweiligen Projektleitern zu fixie-

ren und notwendige Hilfestellungen in fachlicher und materieller Hinsicht zu organisieren. Bis 15.4.2000 sind ausführliche Projektdokumentationen an die Wettbewerbsjury einzureichen. Die Jury wird bis 15.5.2000 die geeignetsten Projekte auswählen. Die erfolgreichen Teams werden nach Graz eingeladen, um ihre Projekte in der Physik-Show öffentlich zu präsentieren. Die drei besten Teams werden in der Festsitzung am 26.9.2000 in Gegenwart hochrangiger Vertreter aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft mit Ehrenpreisen ausgezeichnet.

Interessierte Schulen wenden sich bitte an:

Prof. Dr. Sonja Draxler  
Institut für Experimentalphysik  
Karl-Franzens-Universität Graz  
Universitätsplatz 5  
A-8010 Graz  
Tel. (0316) 380 5192  
Fax (0316) 380 9816  
e-mail: sonja.draxler@kfunigraz.ac.at

# Freihandexperimente

## Ring of Fire

*Material:* 4 Paar Lederarbeitshandschuhe, kleine Spritzflasche, Papierhandtücher, Benzin, Feuerzeug, Schutzbrillen

*Vorbereitung:* Die vier Versuchspersonen ziehen sich die Handschuhe an und stopfen die Handflächen mit zusammengelegten Papierhandtüchern aus. In die Spritzflasche kommt Benzin.

*Durchführung:* Die vier Versuchspersonen stellen sich im Kreis mit den Gesichtern nach innen auf und halten ihre Hände mit den Handflächen nach oben ausgestreckt nach vorne. Auf die Handinnenflächen tropft man aus der Spritzflasche Benzin. Die Spritzflasche wird entfernt und das Benzin auf der Handfläche einer Versuchsperson durch den Versuchsleiter entzündet.

Die Person legt kurz die Handfläche mit dem brennenden Benzin auf die Handfläche der neben ihr stehenden Person. Diese entzündet gleicherart das Benzin auf ihrer zweiten Hand und "gibt das Feuer - wie beschrieben - weiter". Zum Schluß brennt auch das Benzin am achten Handschuh.

Alle vier Personen drehen sich mit den Gesichtern zu den Zuschauern und halten die Handflächen mit dem brennenden Benzin nach vorne. Gemeinsam im Chor: "That was a ring of fire!"

Nun drücken alle vier Personen jeweils ihre beiden Handflächen fest aneinander und die Flammen erlöschen.

### *Hinweise:*

- Für den Versuch dürfen nur kleine Benzinmengen verwendet werden. Keinesfalls darf das Benzin über den Handschuh tropfen. Nimmt man allerdings zuwenig Benzin, dann reicht die Brenndauer nicht für den ganzen Flammenkreis aus.
- Günstig ist es, vor dem eigentlichen Versuch jede Person alleine das Entzünden der zweiten Handfläche und das anschließende Löschen üben zu lassen.
- Auf jeden Fall soll eine sechste Person bereitstehen, die im Notfall mit einer Löschdecke löschen kann. Ein Kübel mit Wasser sollte ebenfalls bereitgestellt werden. Sollte sich bei Verwendung von zuviel Benzin der Handschuh nicht löschen lassen, taucht man die brennende Hand einfach ins Wasser.
- Um Verwechslungen zu vermeiden, ist es empfehlenswert, eine Spritzflasche in einer anderen Farbe als üblich zu verwenden - z.B. rot.
- Nach dem Versuch muß das Benzin aus der Spritzflasche zurück in die Vorratsflasche gegossen werden.
- **Den Versuch nur mit verlässlichen Personen und unter Einhaltung aller Sicherheitsmaßnahmen und entsprechender Vorübung zeigen.**

**Spektakuläre Vorführungen wie die oben beschriebene oder der Feuerspucker von V. Obendrauf erfordern sorgfältigste Vorbereitung, Wissen um die Gefahren seitens aller Beteiligten, Disziplin und die Bereitstellung von Schutz- und Rettungsmitteln**

## Feuerträger

*Material:* Einwegflaschen für Mineralwasser aus Kunststoff (1 oder 1,5 Liter), Bunsen- oder Teclubrenner, scharfes Messer, Feuerzeug, Zange, stärkerer Eisennagel

*Vorbereitung:* Mit einem scharfen Messer wird der Boden einer Mineralwasserflasche durch einen kreisförmigen Schnitt entfernt.

Ein Eisennagel wird mit der Zange gehalten und in der Brennerflamme stark erhitzt. Mit dem heißen Nagel bohrt man ein Loch von einigen Millimetern Durchmesser in den Kunststoffflaschenverschluß.

*Durchführung:* Die unten offene Flasche wird mit dem durchbohrten Schraubverschluß verschlossen.

Nun stülpt man die Flasche mit der großen Öffnung über den Gasbrenner und dreht das Gas auf. Das beim durchbohrten Flaschenverschluß ausströmende Gas wird entzündet und der Brenner abgedreht.

Nun hebt man die Flasche vorsichtig vom Brenner und begibt sich mit der brennenden Flasche unter die Zuseher.

Nach kurzer Zeit schlägt die Flamme durch, und es erfolgt eine kleine, harmlose Explosion mit blauer Flamme im Inneren der Flasche.

### *Hinweise:*

- Vorsicht beim Entfernen des Flaschenbodens - Verletzungsgefahr.
- Vorsicht beim Herstellen des Loches - heißen Nagel auf feuerfeste Unterlage legen.
- Die Brenndauer bis zur erfolgenden Explosion hängt vom Lochdurchmesser und vom Volumen der Flasche ab.
- Beim Tragen der Flasche sollte man folgendes beachten: nur langsam gehen, da sonst die Flamme erlischt; die Flasche nicht zusammendrücken.
- Besonders schön ist die Explosion zu erkennen, wenn der Raum verdunkelt wird.
- Dieser Versuch gelingt nur mit einem Erdgasbrenner - Gaskartuschen sind ungeeignet.

Werner Rentzsch

## Modell eines Amperemeters (Hitzdrahtinstrument)

### *Material:*

1 Rastersteckplatte A4 (Leybold 57674), stehend (quer) montiert auf

1 Paar Plattenhalter (Leybold 57677)

Skizze Nr.

1. Kupplungsstecker (Leybold 34089) oder Verbindungsstecker (Phywe 07278.05 bzw. Conrad 592390-66) mit aufgesteckter Hirschmann-Präzisions-Abgreifklemme (Conrad 735175-66); jeweils 3 Stück
2. Zugfeder mit 2 Ösen, etwa 2 cm lang (Opitex 244.084 oder 244095, Katalog Seite 168)

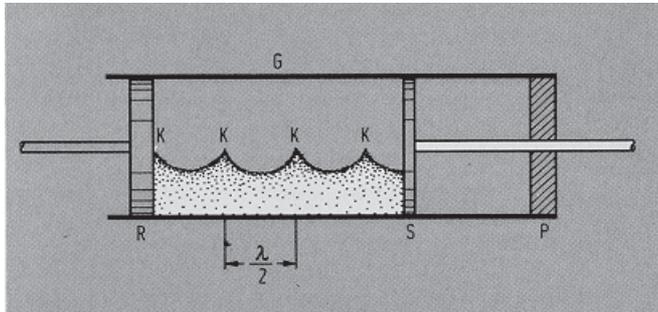


# Stehende Wellen im Gartenschlauch

## Ein Kundtsches Rohr mit minimalen Mitteln

Eleonore Weitensfelder

### Stehende Longitudinalwellen - Kundtsches Rohr



Mit diesem Experiment ist es möglich, stehende Schallwellen sichtbar zu machen.

Entlang eines Glasrohres G wird Pulver (z.B. Mehl) verteilt. In das eine Ende des Rohres ragt ein in seiner Mitte (bei P) fest eingespannter Glas- oder Metallstab von ca. 1 m Länge. Die am Glasstab angebrachte Korkscheibe S soll das Glasrohr nicht berühren.

Reibt man den Glasstab mit einem Lederlappen, entsteht ein lauter, hoher Ton: im Stab entsteht eine stehende Longitudinalwelle (Knoten in der Mitte P, Bäuche an den freien Enden). Die Schwingungen des Glasstabes werden durch die Scheibe S auf die Luft übertragen. Sie breiten sich in der Luft des Rohres aus und werden am Stempel R reflektiert. Durch Interferenz zwischen ursprünglicher und reflektierter Welle bilden sich stehende Wellen aus, die durch das hineingebrachte Pulver sichtbar werden:

An den Stellen der Luftbewegung, d.h. an den Bewegungsbäuchen, gerät das Pulver in Bewegung, und dort gleitet es nach unten, während es an den Bewegungsknoten K in Ruhe bleibt. Die stehende Welle im Rohr kommt natürlich nur dann zustande, wenn durch Verschieben des Stempels R die Länge der Luftsäule auf eine passende Größe abgestimmt wurde.

Der Versuch kann auch mit rechts offenem Ende der Glasröhre ausgeführt werden. Zur Anregung kann bequemer ein kleiner Lautsprecher oder eine Pfeife verwendet werden.

### Das selbstgemachte Kundtsche Rohr

Ich möchte berichten, wie gut der Versuch gelingt, ohne das Inventar des Physiksaales zur Verfügung zu haben, wie es wegen der Umbauarbeiten an unserer Schule gerade der Fall ist.

*Das Rohr:* ein durchsichtiger Gartenschlauch von maximal 35 cm Länge. (Rohrdurchmesser: 16 mm lichte Weite; erhältlich u. a. bei Bauhaus)

*Das Pulver:* Korkmehl

*Die Schallquelle:* eine Trillerpfeife, erhältlich im Spielwaren-

geschäft.

*Der Rohrverschluss:* ein Paint-Marker

*Gefaltetes Papier* zum Einfüllen des Pulvers

*Stricknadeln* zum Verteilen des Pulvers und Fixieren des üblicherweise gebogenen Schlauchstückes.

### Versuchsdurchführung



Der Schlauch - er sollte nicht zu lang sein, damit die reflektierte Schallwelle nicht zu schwach zurückkehrt, wird mit dem Korkpulver gefüllt. Zum gleichmäßigen Verteilen des Pulvers eignet sich eine lange Stricknadel. Eine zweite Stricknadel eignet sich als Schiene für den Schlauch, der ja sonst eine recht starke Krümmung aufweist.

Der Schlauch wird also mit Tixostreifen an der Stricknadel befestigt. In das Ende steckt man den Paint-Marker, der den Schlauch abschließen soll; allerdings muß er sich darin verschieben lassen.

Nun bläst der Pfeifer in die Pfeife. Dabei ist zu beachten: Die Pfeifenöffnung muß sich neben dem Schlauchanfang befinden, trotzdem darf in den Schlauch nicht direkt hineingeblasen werden. Es soll ja kein Luftstoß das Pulver durcheinanderwirbeln, sondern periodische Verdichtungen und Verdünnungen sollen sich zu einer stehenden Welle formieren können.

Da die Frequenzen der Pfeife vorgegeben sind, muß nun die Länge der Luftsäule abgestimmt werden: Das Verschieben der Paint-Markers am Rohrende bringt bald den gewünschten Erfolg.

Es genügen Pfeiftöne von ein bis eineinhalb Sekunden Dauer, um bei passend getroffener Länge die Schwingungsbäuche zu erzeugen.

Mein persönlicher Tip für die Trillerpfeife aus der Abbildung: Vom Rohranfang bis zum Abschluß durch den Paint-Marker befinden sich 28 cm Länge.

In den Schwingungsbäuchen tanzt das Mehl und bildet bizarre Rillenmuster. Die Muster kann man noch nach Aufhören des Pfeifens sehen. Der Abstand zwischen zwei Bäuchen, beträgt 8 cm. So läßt sich die Grundfrequenz der Pfeife berechnen, wenn man als Schallgeschwindigkeit 334 m/s annimmt.  
(aus  $334 = 2 \times 0,08 \times f$  folgt: Frequenz  $f = \frac{334}{2 \cdot 0,08} = 2086 \text{ Hz}$ ).

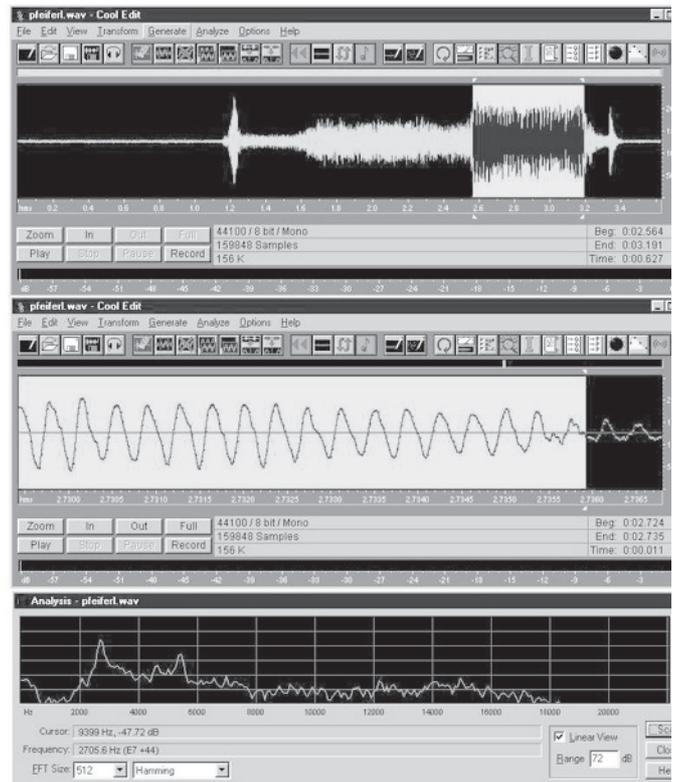
### Anmerkung

Die ausgeprägten Rillen mit den ganz besonders hoch aufgewirbelten Begrenzungen müssen von den Obertönen der Pfeife stammen. Da die Abmessungen derart schmal sind, die zugehörigen Wellenlängen somit im Millimeterbereich liegen, sendet meines Erachtens nach diese Pfeife auch Ultraschallwellen aus. Entsprechend der Formel für die transportierte Energie einer Schallwelle - die mit dem Quadrat ihrer Frequenz wächst - wundert mich diese intensive Dünenbildung nicht mehr.

Ich danke meinem Kollegen Herrn OStR. Mag. Franz Sprenger vom BG. Lerchenfeldgasse für die praktischen Tips zur Versuchsdurchführung.

### Literatur und Bildquellen

- Höfling, O.: Physik. *Lehrbuch für Unterricht und Selbststudium*. Würzburg 1979.  
Schreiner, J.: *Lehrbuch der Physik für die Oberstufe der allgemeinbildenden höheren Schulen*. 2. Teil. Wien 1971.  
Sexl, R. et. al.: *Physik*. Teil 2 A. Wien 1983.  
Tipler, P. A.: *Physik*. Heidelberg 1994.



Analyse des Geräusches einer Trillerpfeife mit COOL96.  
oben: Mikrophonsignal, Mitte: Wellenform des Signals, unten: Spektrum (bei einer typischen Trillerpfeife, Grundfrequenz ca. 2700 Hz)  
Quelle für COOL96: <http://www.syntrillium.com>

## Österreichische Physikalische Gesellschaft Programmübersicht der Haupttagung 1999

### Mittwoch, 22. September 1999

- 9:00 Begrüßung und Eröffnung
- 9:15 Tokamak und Stellarator - zwei Wege zum Fusionsreaktor (F. Wagner, Garching)
- 10:00 Kohärente Tera-Hertz Quellen (E. Gornik, Wien)
- 11:15 Preisverleihung
- 11:30 Halbleiter-Cluster auf Oberflächen (K. Sattler, Hawaii)
- 14:00 Quantum Information Processing (I. Cirac, Innsbruck)
- 14:45 Quantum Computation with Mesoscopic Josephson Junctions (J.E. Mooij, Delft)
- 16:00 Vortrag Ludwig Boltzmann Preisträger
- 16:30 Jahreshauptversammlung
- 17:30 Postersitzung
- 20:15 Forschungsförderung und Forschungspolitik in Österreich am Beispiel Physik (A. Schmidt, Wien; öffentlicher Abendvortrag)

### Donnerstag, 23. September 1999 (Lehrertag)

- 8:30 Präsentation Fachbereichsarbeiten
- 9:00 Teilchenphysik und Kosmologie (F. Pauss, Zürich)
- 9:45 Planetary Nebulae - the late Phases in the Evolution of Stars (H. Mendez, München)
- 11:00 Mass Spectrometry of Fullerenes (C. Lifshitz, Israel)
- 11:45 Warum sich Pflanzen gegen Eindringlinge wehren ... bis hin zur Quantifizierung des Passivrauchens - Untersuchungen mit einer neuen physikalischen Methode: Protonen-Transfer-Reaktions-Massenspektrometrie (W. Lindinger, Innsbruck)
- 14:15 Hadronentherapie (T. Auberger, Innsbruck)
- 15:00 Vortrag Victor Hess Preisträger
- 15:15 Vortrag Karlheinz Seeger Preisträger
- 16:00 Der Physikunterricht in der Krise? (R. Duit, Kiel)
- 16:45 Vortrag der Roman Ulrich Sexl-Preisträger (H. Heimel, Steyr und E. Kohaut, Wien)

Ort: Universität Innsbruck, Naturwissenschaftliche Fakultät, Technikerstr. 25, 6020 Innsbruck

Tagungsbeitrag: entfällt für Lehrer.

Als Fortbildung empfohlen vom BMUKA mit Erlaß GZ 37.849/8-I/2b/99.

# Elektrische Kabinettstücke in der Schule EINST und JETZT

Franz Pichler

## **Ausstellung im Strom-Museum Ybbs, 15. Mai bis 1. Oktober 1999 Ybbs, Brauhausgasse 1**

Die Entdeckung der elektrischen Phänomene als Bestandteil der Physik im 18. und 19. Jahrhundert gehört sicher zu den faszinierendsten Ereignissen der Wissenschaftsgeschichte. Während in der Frühzeit philosophisch motivierte Neugier diese Entdeckungen möglich machte - als Beispiel können die in der Zeit des Barock gebauten Elektrisiermaschinen und die damit an den Höfen und Klöstern inszenierten Experimente gelten - begann man sich etwa vom Jahre 1800 an auch für eine praktische Nutzung der Elektrizität zu interessieren. Mit der Entdeckung des galvanischen Elementes durch Volta, des Zusammenhangs zwischen Elektrizität und Magnetismus durch Oersted und Ampere, des Gesetzes des Stromflusses in Abhängigkeit von Leitereigenschaften durch Ohm und der Erscheinungen der Induktion durch Faraday wurden dabei wichtige Meilensteine der physikalischen Forschung erreicht. Ihre praktische Verwendung fanden diese Ergebnisse mit der Erfindung des elektrischen Telegraphen durch Morse, des Telephons durch Bell und der Konstruktion der verschiedenen elektrischen Maschinen, Motore und Dynamos durch Pioniere der Elektrotechnik, wie Edison, Siemens, Kapp oder Tesla. Einen weiteren Höhepunkt bildete am Ende des 19. Jahrhunderts die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz und ihr praktischer Einsatz für die (drahtlose) Telegraphie durch Marconi. Im 20. Jahrhundert schloß daran die Entwicklung der Radio- und Fernsehtechnik an.

Um das Jahr 1900 war damit die Elektrizitätslehre als physikalische Disziplin in großen Teilen vorhanden. Ihre Ergebnisse stellen bis heute wichtige naturwissenschaftliche Grundlagen für viele moderne Entwicklungen der Elektrotechnik und Informationstechnik dar. Das Wissen um diese Grundlagen sollte als Teil des Allgemeinwissens von jedem gebildeten Menschen verlangt werden können. Die Ausstellung "Elektrische Kabinettstücke" will dabei eine Hilfestellung geben. Dies geschieht mit folgenden Mitteln:

A) Die Ausstellung zeigt in "Kabinettkästen" physikalische Schulinstrumente und Geräte, wie sie im Gymnasium des Benediktinerstiftes Melk um die Jahrhundertwende in Verwendung standen. Durch ihre "Offenheit" erlaubt der bloße Ausblick dieser Instrumente das Erkennen des Zweckes, sofern man sich an den Unterricht in Physik und Naturlehre zu erinnern vermag. Unabhängig davon zeigen diese Apparate durch ihre sorgfältige Ausführung durch "Präzisionsmechaniker" in Handarbeit von der Wertschätzung, die dem Gegenstand "Elektrizität" in den Schulen damals bereits gegeben wurde.

Sie sind so durchaus als "Kunstobjekte" von hoher Qualität anzusehen.

B) Um die praktische Bedeutung der physikalischen Forschung zu demonstrieren, werden in der Ausstellung historische und auch einige moderne Anwendungen in Schaukästen gezeigt. Ein elektrisches Tischfeuerzeug aus den Jahren um 1830 und historische "Telekommunikationsgeräte" (Telegraph, Telephon, Radio) sind dabei sicher besonders zu erwähnende Schaustücke. Die Auswahl ist so getroffen, daß noch der direkte Bezug zur physikalischen Forschung hergestellt werden kann.

C) Als weiteren Höhepunkt zeigt die Ausstellung Original-Nachbauten von elektrischen "Maschinen und Apparaten", wie z.B. verschiedene Elektrisiermaschinen, den elektrochemischen Telegraph von Sömmering und die Voltasche Säule, wie sie vom bekannten Sammler und Hobby-Präzisionsmechaniker Franz Mock aus Krems in vielen Arbeitsstunden angefertigt wurden. Damit erhält man eine Idee vom "Angebot" an elektrischen Geräten, wie ein solches von Präzisionsmechanikern im vorigen Jahrhundert den Schulen gemacht wurde.

D) Zur Abrundung sind in den Räumen der Ausstellung Original-Werkzeichnungen des Wiener Präzisionsmechanikers Franz Steflitschek ausgehängt. Ihre sorgfältige handschriftliche Ausführung und die Handkolorierung zeigt den hohen Stand dieser Mechanikerkunst. Diese Werkzeichnungen stellen ein wichtiges Quellenmaterial für die Geschichte der Lehrmittelerzeugung dar und sie werden in unserer Ausstellung zum ersten Mal gezeigt. Eine Veröffentlichung in Buchform ist für die nähere Zukunft geplant.

Die angeführten Themen A) bis D) behandeln zweifellos das im Untertitel der Ausstellung genannte "EINST". Das Verstehen dieses "EINST" durch den Besucher sollte jedoch auch eine große Hilfe für das "JETZT" sein. Zur Ergänzung und um das "JETZT" doch direkt ein wenig zur Geltung zu bringen, steht für die Besucher noch folgendes zur Verfügung:

E) Anhand einiger einfacher Experimente, die vom Besucher selbst durchzuführen sind, können elektrische Phänomene beobachtet werden.

F) Zwei Lehrmittelfirmen zeigen moderne Installationen für Arbeitspläne zum Schulunterricht in Physik.

G) An einem PC kann die am Institut für Systemwissenschaften der Universität Linz im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelte CD-ROM Implementierung "Ätherwellen", in der die Geschichte der Funktechnik behandelt wird, betrachtet werden.

H) Über Kopfhörer werden die einzelnen Themen der Ausstellung den Besuchern nahegebracht.

I) OStR Dr. Anton Held aus Salzburg hat sich bereit erklärt, zu speziell angekündigten Terminen auf unterhaltsame Art und Weise Schulexperimente zum Thema "Elektrizität" durchzuführen.

Keinesfalls kann oder soll die Ausstellung "Elektrische Kabinettstücke" eine lehrmäßige Einführung in die Elektrophysik anbieten. Dies ist vor allem eine Aufgabe des Unterrichts an den Schulen und auch Museen nehmen sich diesem Ziele an. Die gezeigte Ausstellung soll vielmehr dem Besucher an bereits seinerzeit erworbenes Wissen in angenehmer Weise erinnern und Schülern eine Ergänzung in historischen Belangen bieten. Es ist aber zu hoffen, daß durch den Besuch der Ausstellung auch ein Beitrag zum Verständnis naturwissenschaftlicher Fakten, auf denen moderne technische Entwicklungen beruhen, geleistet wird.

In einem besonderen Raum, dem "Elektrischen Gewölbe" befindet sich eine Dauerausstellung des "Strom-Museums Ybbs"

zum Thema "Elektrizität", in dem u.a. auch eine funktionsfähige Telefonanlage aus dem Jahre 1939 gezeigt wird.

Für die Besucher der Ausstellung steht ein umfangreicher Katalog mit Abbildungen zur Verfügung (Verkaufspreis S 100,-, für Schulen S 50,-).

Die Ausstellung wird von der Stadtgemeinde Ybbs -Kulturwerkstatt - in Zusammenarbeit mit dem Institut für Systemwissenschaften der Johannes Kepler Universität Linz unter Beteiligung des Stiftsgymnasiums Melk veranstaltet.

*Öffnungszeiten* täglich von 10-12 und 14-19 Uhr

*Eintritt:* Erwachsene S 30,-, Schüler und Studenten S 15,-, Schülergruppen S 10,-

*Telefonische Anmeldung* von Schülergruppen an die Kulturwerkstatt (Stadtgemeinde Ybbs): 07412/54298

*Ausstellungstelephon:* 07412/59163

## **Interaktive Ausstellung vom Zauber und Mythos des Wassers**

*Ort:* Propstei Aflenz von 17.6. bis 16.10.1999

*Öffnungszeiten:* Di - Sa 10 - 12 Uhr & 15 - 18 Uhr;  
So & Feiertag 10 - 18 Uhr; Mo geschlossen

Sonderführungen auf Voranmeldung möglich!  
Tel. 03861-2206; 5049; 2265

*Interaktive Stationen aus der Experimentierwerkstatt Wien*

# Bücher und Software

## Der Traum des Seglers bei Flaute

Neue physikalische Spielereien aus Professor Bürgers Kabinett

Wolfgang Bürger

229 Seiten, zahlr. Illustrationen. Birkhäuser Verlag Basel, 1998, ISBN 3-7643-5879-3. öS 364,-

Nach dem Erstling "Der paradoxe Eierkocher" bietet Wolfgang Bürger, Professor für Mechanik an der Universität Karlsruhe, den Besuchern der Fortbildungswoche 1999 durch seinen Vortrag bestens bekannt, im "Traum des Seglers bei Flaute" 28 weitere Kabinettstücke seiner kurzweiligen Betrachtungen zu physikalischen Problemen. An den Rat, den Stephen Hawking für sein Buch erhielt, höchstens eine Formel zu verwenden, hält er sich nicht - und dies ist auch gut so. Doch hoch sind die mathematischen Anforderungen nicht, und sie werden nur dort benötigt, wo damit dem Verständnis gedient wird.

Die Kabinettstücke sind in fünf Gruppen unterteilt: Erfindungen und Entdeckungen, Probleme aus dem Alltag, Zwischen Himmel und Erde, Mögliches und Unmögliches, Spielzeuge.

Unerwartete Aktualität erhielt im Zuge der Sofi 99 das "Pendel auf dem Karussell", Foucaults Pendel. Neben Details zur Geschichte der Erfindung und der ersten Vorführung im März 1851 im Pariser Pantheon erfahren wir, daß die Drehung der Pendelebene bereits 1661 von Galileis Schüler Viviani beobachtet wurde, aber nicht vollständig erklärt werden konnte. Neben einer sehr anschaulichen Darstellung, wie die Drehung der Pendelebene zustande kommt, differentialgeometrisch als "Paralleltransport" bezeichnet, werden die möglichen Schwingungsformen abgeleitet. Worauf der Theoretiker nicht eingeht, sind die experimentellen Probleme, die bei einem Präzisionsexperiment zu beachten sind, insbes. Aufhängung, Freiheit von Luftströmungen, Luftwiderstand.

Um elementare Mechanik geht es beim Nußknackertest. Die Schlußfolgerung, der Nußknacker müsse erst erfunden werden, vielleicht nach Prinzipien, die die Bionik dem Eichhörnchen abschaut, ist angesichts der langen Geschichte überraschend, ansonsten ist die Rohrzanze des Professors Favorit.

Wer Professor Bürgers Vortrag in Wien gehört hat, wird sich an Bruegels Windräder erinnern. Sie bieten Anlaß zu einem kleinen Exkurs in das Forschungsgebiet der Aero-Elastik mit aktuellen Anklängen zu Windkraftwerken und Tragflügeln.

Doch wovon träumt der Segler bei Flaute? Den Wind selbst machen und damit das Boot in Bewegung setzen! Wie dies gelingen könnte, ist Thema der titelgebenden Betrachtung und gibt Anlaß, über Impulserhaltung nachzudenken.

Neben der amüsanten (wer hätte gedacht, daß Spielzeugautos beim Verkabeln von elektronischen Zählern halfen?), zum Nachdenken und gelegentlichen Mitrechnen anregenden Lektüre dieser 28 Fallstudien sind sie auch zur Vertiefung von Unterrichtsthemen geeignet. Aber auch die Hinweise auf ungelöste Fragen könnten Fachbereichsarbeiten anregen.

H. Kühnelt

## Der Sternenhimmel 2000

Astronomisches Jahrbuch für Sternfreunde

Hans Roth

383 Seiten, zahlr. Abb.. Birkhäuser Verlag Basel, 1999, ISBN 3-7643-6044-5. öS 291,-

Dieses nun im 60. Jahrgang vorliegende Jahrbuch ist zunächst für Amateurastronomen gedacht, sind doch für jeden Tag des Jahres die wichtigsten, in Mitteleuropa beobachtbaren Himmelserscheinungen kalendermäßig erfaßt. Doch auch für Lehrer, die Informationen zur Astronomie für den Unterricht suchen, stellt das Jahrbuch viel Nützliches bereit, das sonst in dieser konzentrierten Form schwer zu finden ist wie ein Katalog der wichtigsten Himmelsobjekte. Viele sehr gut gestaltete Zeichnungen unterstützen den Text und sorgen für Anschaulichkeit. Das Jahr 2000 ist Anlaß zu einer Geschichte des Kalenders. Für Finsternisfans, die wohl durch Sofi 99 auch bei uns zugenommen haben werden, interessant: Die einzige in Mitteleuropa im Jahr 2000 sichtbare Finsternis wird eine totale Mondesfinsternis zwischen 5 und 6 Uhr 30 (MEZ) des 21. Jänner 2000 sein.

HK

## Musikalische Stimmungen

Erich Neuwirth

Handbuch mit CD-ROM. Springer-Verlag Wien, 1997. ISBN 3-211-83000-6, öS 550,-

In der Entwicklung der europäischen Musik ist das Ringen um die richtigen Frequenzverhältnisse der reinen Töne noch nicht beendet. Man denke an die Zwölftonmusik und erst kürzlich hat Walter Thirring ein auf 34 Intervallen basierendes System erdacht.

Die klassischen Stimmungen (reine, pythagoräische, mitteltönige) basieren auf rationalen Frequenzverhältnissen. Damit haben sie automatisch Probleme der mathematischen Konsistenz, wenn zwei aufeinander folgende Halbtöne beispielsweise keinen Ganzton ergeben. Alle diese Probleme behebt die gleichschwebende Stimmung, in der nicht rationale Verhältnisse, sondern die irrationale zwölfte Wurzel aus Zwei regieren. E. Neuwirth hat in seinem interaktiven Dokument die Möglichkeiten moderner PCs zur Tonerzeugung mit den Ideen von Hypertext vereint, um eine Einführung zum Thema Stimmungen zu bieten, die das eigene Experimentieren ebenso erlaubt wie den Genuß von gut durchdachten Tonbeispielen. Dabei erlaubt die Papierversion einen schnellen Überblick.

Daß das Produkt gelungen ist, zeigt die Auszeichnung beim Europäischen Akademischen Softwarepreis. Gedacht ist Stimmungen für Mathematiker und Physiker mit musikalischer Ader (und vice versa). Der Rezensent hätte sich als musikalischer Ignorant mehr Information über Tonleitern und ihre Charakteristika erwartet - aber ein ganzer Kurs in Harmonielehre will die CD-ROM nicht sein.

HK

## Die Entdeckung des Radiums.

### Untersuchungen über radioaktive Substanzen.

#### Marie Curie

Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften, Bd. 284. 185 Seiten, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 1999. ISBN 3-8171-3284-0. DM 36,-.

Bearbeitet und kommentiert durch W. Regenstern erschienen nun in der Taschenbuchreihe des Harri-Deutsch-Verlags die Nobelrede Die Entdeckung des Radiums von 1911 und die Dissertation (1903) von Marie Curie über ihre vierjährigen Untersuchungen an radioaktiven Substanzen. Wie schwierig diese Untersuchungen waren und wieviele Fragen offen blieben, geht gut aus Curies Worten hervor, war doch zu dieser Zeit keine Energiequelle für den Zerfall und die dabei freiwerdende Wärme bekannt. Wie sorgfältig Marie Curie Beobachtung und Vermutung trennt, macht die Dissertation zu einem Lehrstück.

Dem Verlag ist für diesen schönen Einblick in das Werk der bedeutendsten Physikerin und Chemikerin der letzten 100 Jahre sehr zu danken. Die biographischen Notizen sind kurz, aber zeichnen ein interessantes Bild der Verhältnisse in Polen vor 1900.

HK

## Gedankenexperimente

### Henning Genz

XI+291 Seiten, 67 Abb. Wiley-VCH Weinheim, 1999. ISBN 3-527-28882-1. DM 48,-.

Henning Genz bemüht sich in einer Reihe von Büchern auf ansprechendem Niveau zur Popularisierung der Physik, und hier vor allem ihrer Denkweisen, beizutragen. Nach "Symmetrie und Symmetriebrechung in der Natur", "Die Entdeckung des Nichts - Leere und Fülle im Universum", "Wie die Zeit in die Welt kam - Die Entstehung einer Illusion aus Ordnung und Chaos", von denen einige den Lesern hier schon vorgestellt wurden, wendet sich Genz einem wichtigen Hilfsmittel der theoretischen Physik zu, dem Gedankenexperiment. Sein Thema ist, wie es Eugen Wigner einmal bezeichnet hat, "the unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences", die unbegreifliche Macht der Mathematik und Logik. Oder wie der Mensch nicht nur durch Beobachtung und Messung, sondern durch Argumentieren zu einem schlüssigen Weltbild kommen kann.

Gedankenexperimente nutzen allgemeine und anerkannte Eigenschaften von Theorien, ohne sich um die technische Realisierbarkeit zu kümmern.

Der Bogen spannt sich dabei von Galileis "Beweis", warum alle Körper im Vakuum gleich schnell fallen, über Stevins Beweis zum Gleichgewicht auf schiefen Ebenen und seiner Aussage: "Das Wunder besteht darin, daß es kein Wunder gibt", zu Einstein (der schon als 16-Jähriger im Geist mit einem Lichtstrahl reiste) und den gedanklichen Schwierigkeiten von EPR, wechselwirkungsfreien Messungen der Quantentheorie und dem von Greenberger, Horne und Zeilinger vorgeschlagenen Experiment mit drei Teilchen mit Spin.

Die keineswegs als Strandlektüre gedachte Abhandlung erfordert etwas Ausdauer von Leserin und Leser, Kenntnisse der Physik, auch moderner sind sicher von Vorteil. Als Lohn winkt das Verständnis des EPR-Paradox - oder doch nicht?

HK

## Physik in Wald und Flur

### Josef Wittmann

Physik-compact Sonderthemen. viii+232 Seiten, zahlr. farbige Abb.. Verlag HPT Wien in Lizenz von Aulis Verlag Deubner & Co KG Köln, 1998. ISBN 3-209-02679-3. öS 248,-

Die Natur mit den Augen der Physik sehen lernen, ist das Ziel dieses schön gestalteten Bandes, das in 45 Kapitel Themen vom Wassertropfen bis zum Bau der Milchstraße aufgreift.

Es ist natürlich nicht möglich, auf alle Themen einzugehen. Viele interessante Abschätzungen, aber auch Fakten machen das Buch zu einer anregenden Lektüre. Den österreichischen Leser mag das Preberseeschießen besonders interessieren, bei dem auf das Spiegelbild einer Zielscheibe gezielt wird und das Geschoß ein kurzes Stück unter der Wasseroberfläche zurücklegt.

Leider sind einige Fehler durchgerutscht. Ein kleiner Druckfehler in Glg. (2) auf S. 20 mag den aufmerksamen Leser stören, Der Index R ist durch A zu ersetzen. Daß K-Mesonen (S. 49) beim Zerfall von Uran 231 oder Polonium entstehen sollen, kann wohl nicht zutreffen, wie auch der chinesische Physiker Yang und nicht Yung heißt. Glg. (1) auf S. 102 ist nicht die allgemeine Gasgleichung, die linke Seite stellt die Adiabatangleichung dar, wenn rechts "konstant" steht; die rechte Seite ist Teil der idealen Gasgleichung, die linke Seite sollte dann  $pV$  sein. Die anschließende Diskussion der Luftfeuchte für das Wettergeschehen stützt die Fehlvorstellung, daß Luft Wasserdampf aufnehme - in Wahrheit verdrängen die Moleküle des Wasserdampfes die Moleküle der trockenen Luft (so daß die Dichte feuchter Luft geringer ist als für trockene Luft, was für die Wolkenbildung wichtig ist). Die Diskussion der Bindungsenergie in Kernen (S. 183) ist fehlerhaft, die Abbildung 125 selbst bei Spiegelung der Kurve durch fehlerhafte Bezeichnung der Abszisse verwirrend. 100 Billionen Sterne in unserer Milchstraße (S. 213) sind in einem deutschsprachigen Text um einen Faktor 1000 zu viel, 100 Milliarden reichen (wie korrekt auf S. 214).

Interessante Inhalte, exzellente Photos des Verfassers und meist klare und didaktisch gute Zeichnungen trösten über gelegentliche Flüchtigkeitsfehler, doch gilt natürlich: Leser sei kritisch.

HK

## Wege in der Physikdidaktik 4

### Werner B. Schneider (Hrsg.)

292 Seiten, zahlr. Abb., kart. Verlag Palm & Enke Erlangen, 1998. ISBN 3-7896-0588-3. DM 27,-

Die in unregelmäßiger Folge vom Arbeitskreis Bayerischer Physikdidaktiker herausgegebenen Bände bieten ein breites Spektrum an Inhalten. Einerseits finden wir allgemeinere Artikel zur Physikdidaktik wie "Physik verstehen - was ist das"

von R. Fichtner oder "Über Naturwissenschaften lernen" von Kircher oder über Kerschensteiners Bedeutung für den Physikunterricht. Andererseits finden wir zahlreiche praktisch orientierte Beiträge, wie beispielsweise die Videoanalyse des Afenschusses, Experimente zur Wärmelehre mittels Peltiermoduls, oder die Erkundung der Atmosphäre mittels Ballon (bis 28 km Höhe). Neueste Physik, die Bose-Einstein ultrakalter Atome, wird in einem sehr gut für die Schule aufbereitetem Beitrag dargestellt. Einen weiteren Schwerpunkt stellen diverse Beiträge über Computereinsatz dar, vom Anschluß einfacher Sensoren zur Videoanalyse von Bewegungen. Ein weiterer Beitrag sei explizit genannt:

Karl Luchner erinnert sich an sein erstes Nachdenken über Physik im Elternhaus, als er und sein Bruder durch Umkreisen der Wohnzimmerlampe das Planetensystem zu verstehen suchten, oder als er nahezu ein Perpetuum mobile erfand, und bricht eine Lanze für eine adäquate (lebensweltliche) Problemeinführung, für die innere Anschauung, das geistige Verarbeiten und Einordnen, und für qualitative Überlegungen.

Gewidmet ist der Band Herrn Prof. Dieter Heuer, Physikdidaktiker an der Uni Würzburg, zum 60. Geburtstag.

Auf weitere Bände dieser Reihe darf man hoffen.

HK

## Physikunterricht neu denken

Jan-Peter Braun

392 Seiten, Verlag Harri Deutsch Frankfurt, 1998. ISBN 3-87144-1571-7. DM 39,80.

Dissertationen aus Physikdidaktik sind rar, allzu rar. Der Autor befaßte sich im Rahmen seiner Arbeit an der Bildungswissenschaftlichen Hochschule Flensburg unter Professor Lutz Fieser mit dem Begriff Bildung durch Naturwissenschaft. Dabei faßt er gründlich die gegenwärtige Diskussion zusammen, die insbesondere von Hartmut von Hentig geprägt wird. Jugend Heute ist ein weiterer Schwerpunkt, in dem er die vorhandene Literatur umfassend darstellt. Allerdings ist der Begriff für sich bereits ein Paradoxon, da jede Dokumentation außer Stande ist, die rasche Veränderung der Gegenwart darzustellen. Die Situation von Kindern und Jugendlichen in der Familie (oder was davon übrig ist), der Verlust an unmittelbaren Erfahrungen, das Freizeitverhalten, unsere Erwachsenengesellschaft sind wichtige Determinanten im Leben der Jugendlichen. Dissertationen aus Physikdidaktik sind rar, allzu rar. Der Autor befaßte sich im Rahmen seiner Arbeit an der Bildungswissenschaftlichen Hochschule Flensburg unter Professor Lutz Fieser mit dem Begriff Bildung durch Naturwissenschaft. Dabei faßt er gründlich die gegenwärtige Diskussion in Deutschland zusammen, die insbesondere von Hartmut von Hentig geprägt wird. Jugend Heute ist ein weiterer Schwerpunkt, in dem er die vorhandene Literatur umfassend darstellt. Allerdings ist der Begriff für sich bereits ein Paradoxon, da jede Dokumentation außer Stande ist, die rasche Veränderung der Gegenwart darzustellen. Die Situation von Kindern und Jugendlichen in der Familie (oder was davon übrig ist), der Verlust an unmittelbaren Erfahrungen, das Freizeitverhalten, unsere Erwachsenengesellschaft sind wichtige Determinanten im Leben der Jugendlichen.

Im Folgenden wendet der Autor sich der Frage nach dem Wesen der Physik zu und bietet eine differenzierte Analyse, wobei er auch Kontroverses nicht ausspart, ob etwa Physik eine "männliche Wissenschaft" sei. Die These "Erst die Auswirkungen der Physik auf den Menschen bzw. auf die Menschheit machen die Physik zur Physik" ist für den Physikunterricht ein treffender Hinweis. Auf den letzten 50 Seiten versucht Braun eine "Theorie zur Bestimmung von im Physikunterricht anzustrebenden Zielen", die in einem Diagramm zusammengefaßt die Komplexität des Unterrichts spiegeln. Die Aufgabe der Schule, die "Menschen zu stärken" (individuell und als demokratische Gemeinschaft) werden unter allgemeindidaktischen und soziologischen Aspekten den wichtigen Aspekten der Physik gegenübergestellt. Verständlich erscheint daher die Schwierigkeit, nach einer Ausbildung, die auf Reduktion der Komplexität (Physik als die Kunst der Vereinfachung) hinzelt, die zahlreichen Vernetzungen positiv zu erleben. Eine Patentantwort hat Braun natürlich nicht und bescheiden zitiert er im Nachwort Popper: "Kein Buch kann jemals fertig werden: während wir daran arbeiten, lernen wir immer gerade genug, um seine Unzulänglichkeit klar zu sehen, wenn wir es der Öffentlichkeit übergeben."

Jedenfalls eine anregende Lektüre und Fundgrube an Literatur.

HK

## Coach Junior

CD-ROM. Centre for Microcomputer Applications (CMA) des Amsterdam Mathematics, Science & Technology Education Laboratory (Nieuwe Achtergracht 170, NL-1018 WV Amsterdam), 1999, ca. öS 1200

Das Amsterdamer Institut für Didaktik der Mathematik, Naturwissenschaften und Technik hat lange Erfahrung in der Entwicklung und im Unterrichtseinsatz von Meßwerterfassungssystemen. Aufgrund der offenen Struktur und der didaktischen Überlegungen hat das System Coach weite Verbreitung auch außerhalb der Niederlande gefunden. Die dazu entwickelte Steuerungssoftware ist nun in einer sehr benutzerfreundlichen Windowsversion vorhanden. Für österreichische Interessenten ist sie deshalb interessant, da sie das CBL von TI unterstützt und eine visuelle Programmierung des CBL und seiner Sensoren ermöglicht. Dazu werden Sensoren aus einer Ablage mit der Maus auf die Anschlüsse des CBL-Symbols gezogen, die Meßintervallen auf den Kanälen über Menü eingestellt, der Meßauftrag an das CBL geschickt. Hierauf kann das CBL ohne Verbindung zum PC die Messungen durchführen und speichern. Nach Wiederanstecken am PC können die Daten übertragen und graphisch oder als Tabelle verwendet werden. Der Einschulungsaufwand ist sehr gering. Sensoren sind sowohl bei TI, als auch bei Vernier (<http://www.vernier.com>, dort auch Unterlagen und eine Kundenzeitschrift), als auch bei CMA (<http://www.cma.beta.uva.nl/english>) erhältlich. Ausgezeichnet wurde die Software zu Recht bei der Worlddidac 1998.

HK