

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 2

Anregungen für Unterricht und Lehre

ISBN 3 - 7896 - 0100 - 4

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1991

Anmerkung:

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

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

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

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Vereinheitlichende Aspekte der modernen Physik

1. EINFÜHRUNG

Einerseits geht es in diesem Beitrag - wie das Thema vermuten läßt - zunächst einmal um konkrete Physik, andererseits verbirgt sich hinter dem Titel der Versuch eines unkonventionellen didaktischen Ansatzes zur Vermittlung moderner Physik. Von den Fachinhalten her betrifft die Idee den Unterricht der gymnasialen Oberstufe (Kollegstufe) und die Aus- und Fortbildung aller Physiklehrer. Vom Standpunkt der Fachdidaktik ist die Idee fast trivial, leitet sie sich doch unmittelbar und beinahe zwangsläufig aus dem erkenntnistheoretischen und methodischen Verständnis der Physik ab.

Selbstverständlich können und sollen hier keine Lehrplanentwürfe entwickelt werden. Dies wäre nicht nur aus Platzgründen unmöglich sondern träfe auch in keinster Weise den Kern meines Anliegens und wäre darüber hinaus langweilig und ermüdend. Vielmehr soll die Idee eines didaktischen Konzeptes exemplarisch an einigen wenigen Problemen der modernen Physik allgemeinverständlich erläutert werden, die losgelöst von jedweden Lehr- und Lerninhalten aktueller Lehrpläne zu betrachten sind.

Mit gutem Recht beklagt man sich allenthalben über die erdrückende Stofffülle von Lehrplänen. Sie sind mit einem von Unterrichtsthemen vollgestopften Gefäß vergleichbar, dessen Inhalt sich heute kaum noch weiter komprimieren läßt und daher neue Themen nur dann noch aufnehmen kann, wenn mit dem Hinzufügen von neuem Material gleichzeitig bisherige Gegenstände aus dem Gefäß entfernt werden. Dies muß nicht zwangsläufig so sein! Es gibt eine Möglichkeit, die Dichte des Lehrstoffs im Gefäß zu verringern ohne hergebrachte Inhalte unbedingt zu entfernen, wenn man beherzigt, daß Lerninhalte nicht notgedrungen additiv sind. Sie lassen sich oft nach übergeordneten, vereinheitlichenden Gesichtspunkten derart zusammenfassen, daß sie in der Vereinigung

weniger mächtig sind als in der Summe der Einzelinhalte.

In den letzten Jahrzehnten wurden - parallel mit dem Erkenntniszuwachs der modernen Physik - immer wieder neue Inhalte in die Schulcurricula und Lehrbücher aufgenommen. Bei der Integration neuer Lerninhalte wurde dabei i.d.R. übersehen, daß neue Forschungsergebnisse oder die Etablierung neuer Disziplinen nicht notwendigerweise und automatisch neue Physik bedeuten. Im Gegenteil!

Die Geschichte der Genese physikalischer Erkenntnisse, insbesondere aber der rasante Fortschritt der modernen Physik, den wir in diesen Jahrzehnten miterleben dürfen, lehrt uns, daß physikalische Forschung als ein Prozeß fortschreitender Vereinfachung im Sinne von Vereinheitlichung angesehen werden kann. Angesichts der fraglos zu beobachtenden Zunahme an Komplexität und an Spezialisierung in den Naturwissenschaften und der auf diesen basierenden Technik mag die These von der Vereinfachung auf den ersten Blick paradox erscheinen, sie steht aber nicht im Widerspruch zum Erscheinungsbild der Physik. Im Rahmen der fundamentalen und universellen Theorien der modernen Physik, der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie, lassen sich die meisten Ergebnisse physikalischer Forschung auf wenige Grundprinzipien und Naturgesetze zurückführen. Gleiche oder ähnliche Forschungsmethoden, Denkweisen und Modellbildungen wurden und werden erfolgreich auf ganz verschiedene Gebiete der Physik angewandt. Entdeckungen, die zunächst nichts miteinander zu tun zu haben schienen, stellten sich als verschiedene Manifestationen ein und desselben Sachverhalts heraus. Sich zunächst unabhängig voneinander entwickelnde Wissenschaften verschmolzen später und gingen ineinander auf. Traditionelle Abgrenzungen machten keinen Sinn mehr und lösten sich von selbst auf. Der scheinbare Widerspruch zwischen zunehmender Komplexität einerseits und fortschreitender Vereinheitlichung und Reduzierung der Erkenntnisse auf fundamentale Prinzipien andererseits wird vielleicht einsichtiger, vergleicht man den Fortschritt der Physik mit der Freilegung und Restaurierung eines verborgenen Mosaiks. Je mehr einzelne Mosaiksteinchen wiederhergestellt sind, desto deutlicher offenbart sich dem Betrachter das

Motiv und die gestalterische Struktur des Bildes. Erst die Vielfalt gibt den Blick frei auf ein einheitliches Kunstwerk.

2. DIE VEREINHEITLICHUNG DER NATURKRÄFTE UND SYMMETRIEN - EIN HISTORISCHER STREIFZUG

Die Suche nach Grundmustern alles Seienden war von jeher ein Uranliegen des denkenden homo sapiens. Solange sich Menschen bemühen, die Natur zu ergründen - sei es philosophisch oder forschend (im modernen naturwissenschaftlichen Sinne des Wortes) - haben sie versucht, das komplexe Erscheinungsbild der Natur auf wenige einfache Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen. In der griechischen Naturphilosophie herrschte die Meinung vor, daß die Welt aus wenigen, allen Raum erfüllenden Ursubstanzen (Elementen) aufgebaut sei. Aus ursprünglich einer einzigen Ursubstanz (bei THALES) wurden später (bei EMPEDOKLES und v.a. ARISTOTELES) vier Grundsubstanzen, die wenigen universalen Kräften (z.B. Liebe und Hader bei EMPEDOKLES) unterworfen sein sollten. Den "Substanzphilosophen" standen die "Atomisten" gegenüber, für die die Welt aus dem "Nichts" und unendlich vielen sehr einfachen kleinsten Teilchen (Atomen) bestand (bei LEUKIPP und DEMOKRIT). Die Vielfalt der Materie erklärte sich aus unterschiedlichen Formen, Anordnungen und Orientierungen der Atome. Die Naturlehre der Peripatetiker, der von ARISTOTELES gegründeten Philosophenschule, setzte sich wegen ihrer logischen Geschlossenheit gegenüber dem Atomismus durch, wurde nach dem Niedergang der griechischen Kultur von den Arabern weitergepflegt und bildete nach der Gründung der ersten Universitäten im 13. und 14. Jahrhundert die dominierende Lehrmeinung des Abendlandes bis zum Beginn der Neuzeit (KOPERNIKUS, KEPLER, GALILEI). Der Atomismus setzte sich endgültig erst in unserem Jahrhundert durch.

Es ist unbestritten, daß die naturwissenschaftliche Forschung im 16./17. Jahrhundert einen entscheidenden Fortschrittsschub erfahren hat, als sich die experimentelle Physik mit GILBERT, GALILEI und BACON aus der philosophischen Umklammerung löste. Es ist aber ebenso richtig und wichtig zu bedenken, daß der Zuwachs an physi-

kalischen Erkenntnissen seither und bis heute immer auch von geistesgeschichtlichen, philosophischen, weltanschaulichen und gesellschaftlichen Einflüssen und Zusammenhängen mitbestimmt wird. Die Physik des 18. Jahrhunderts war geprägt durch den empirischen Rationalismus des über die Grenzen Englands hinaus hochgeschätzten und verehrten Isaac NEWTON. Indem dieser die Tradition GALILEIS fortsetzte, wandte er sich entschieden gegen die auf nicht nachprüfbaren Hypothesen beruhenden metaphysischen Naturerklärungen eines DESCARTES. Mit seinem vielzitierten Bekenntnis "*hypotheses non fingo*" hat NEWTON "*der Naturerkenntnis zuerst den Weg von willkürlichen und phantastischen Annahmen zur Klarheit des Begriffs, vom Dunkel zum Licht gewiesen*" [1]. NEWTONS Wissenschaftsmethodik vereint empirische Induktion und mathematische Deduktion und hat über das 18. Jahrhundert hinaus Pate gestanden bei der Entwicklung der großen Theorien der Physik, der Elektrodynamik, der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie, der Quantenmechanik und der Vereinigung dieser zur Quantenfeldtheorie.

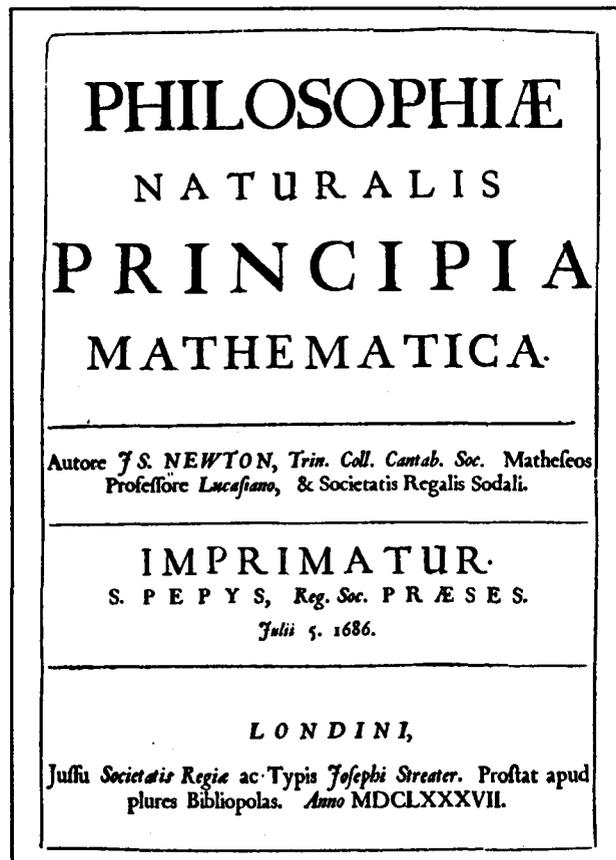


Abb.1: Titelseite von NEWTONs Hauptwerk

Es ist nicht von ungefähr, daß NEWTON sein Hauptwerk *Philosophiae naturalis principia mathematica*" nannte (Abb. 1). In diesem Titel kommt seine Überzeugung und das methodische Konzept einer axiomatischen Naturbeschreibung durch mathematisch faßbare allgemeine Prinzipien zum Ausdruck. Mit der vereinheitlichenden Arbeitsmethode der Integration empirischer Forschung und mathematischer Modellbildung gelang I. NEWTON die **erste Vereinigung von Naturkräften**, von der das genannte Werk handelt. NEWTON zeigte, daß den Bewegungen materieller Körper im Schwerfeld der Erde und den Bewegungen der Himmelskörper dieselben Gesetzmäßigkeiten zugrundeliegen und daß es nur eine universelle Gravitationswechselwirkung im Universum gibt.

Die Ende des 18. Jahrhunderts aufkommende, von Friedrich Wilhelm von SCHELLING begründete "romantische Naturphilosophie", die sich gegen die Empirie als Forschungsmethode wandte, trug einerseits sicherlich nicht zur Förderung der Physik bei. Andererseits prägten gewisse Teilaspekte dieser Weltanschauung in einer Weise das Denken und Handeln großer Naturforscher des 19. Jahrhunderts, daß ihr Einfluß einen entscheidenden Beitrag in Richtung einer vereinheitlichenden Entwicklung der neueren Physik geleistet hat. So bestand ein Grundgedanke der romantischen Naturphilosophie in der Überzeugung von einer inneren Verwandtschaft aller Naturkräfte und der Ähnlichkeit aller Phänomene. Im Gegensatz zu den Atomisten war für die Sympatisanten der Naturphilosophie nicht die Materie sondern die Kraft (Energie) die primäre Naturgegebenheit ("Dynamismus"). Die großen Leistungen von Johann Wilhelm RITTER (Chemie des Galvanismus), Christian OERSTED und Michael FARADAY (Elektromagnetismus) sowie Julius Robert MAYER (Prinzip einer universellen Energieerhaltung) sind ohne den Einfluß der dynamischen Weltanschauung und der spekulativen Grundeinstellung der romantischen Naturphilosophie kaum zu verstehen. Die von OERSTED und FARADAY durch ihre Experimente eingeleitete Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus erfuhr durch die einheitliche Theorie des Elektromagnetismus von James Clerk MAXWELL 1862 ihre krönende Vollendung [2]. Damit war die **zweite Vereinigung zweier bis dahin als grundsätzlich verschieden angesehener Naturkräfte vollzogen**.

Das Aufspüren von Symmetrieprinzipien in der Natur oder von Invarianzeigenschaften physikalischer Systeme ist zu einem Leitmotiv der Forschung in der modernen Physik geworden und findet sich im Einklang mit NEWTONS Wissenschaftsverständnis einer auf Axiome zurückführbaren physikalischen Theorie. Die deutsche Mathematikerin Amalie Emmy NOETHER zeigte 1918, daß jede Invarianz der dynamischen Gleichungen eines physikalischen Systems gegenüber kontinuierlichen Transformationen die Existenz einer Erhaltungsgröße impliziert. So bedeutet die Invarianz der dynamischen Gesetzmäßigkeiten gegenüber räumlichen Verschiebungen eines Systems Impulserhaltung, die Invarianz gegenüber zeitlichen Verschiebungen Energieerhaltung und ist die Invarianz gegenüber Drehungen im Raum gleichbedeutend mit der Drehimpulserhaltung. Auch die Ladungserhaltung ist die Folge einer kontinuierlichen Symmetrie, der Invarianz der dynamischen Gleichungen geladener Teilchen gegenüber globalen Phasentransformationen der Wellenfunktionen der Teilchen. Neben den kontinuierlichen Raum-Zeit-Symmetrien gibt es auch innere, die interne Dynamik eines Systems bestimmende Symmetrien, die - wie wir noch sehen werden - im Zusammenhang mit der Vereinheitlichung der fundamentalen Naturkräfte entscheidende Bedeutung erlangt haben. Neben kontinuierlichen Symmetrien spielen auch diskrete Symmetrieoperationen eine wichtige Rolle. Ich erwähne hier nur die Spiegelungen und die Vertauschung von Teilchen und Antiteilchen. (Ein fundamentales Symmetrieprinzip ordnet jedem Elementarteilchen ein Antiteilchen zu.)

Die Suche nach einer einheitlichen Feldtheorie der Naturkräfte wurde zu einer vordringlichen Aufgabe der Physik des 20. Jahrhunderts. Große Genies widmeten viele Jahre ihres Lebens dieser Herausforderung. Nachdem Albert EINSTEIN seine allgemeine Relativitätstheorie vollendet hatte, versuchte er, die geometrische Deutung der Gravitation auf das elektromagnetische Feld zu übertragen. Bis zu seinem Tod im Jahre 1955 arbeitete er an einer Theorie, welche das Schwerfeld und das elektromagnetische Feld auf einer gemeinsamen geometrischen Grundlage vereinigen sollte. Je tiefer er in die Problematik eindrang, desto hoffnungsloser stellte sie sich ihm dar. *"William Clerk MAXWELLS Kind, das elektromagnetische Feld, weigerte sich mit typisch schottischer Stur-*

heit, sich geometrisch erfassen zu lassen", schreibt G. GAMOV in seiner "Biographie der Physik" [3]. Werner HEISENBERGS Ringen um eine einheitliche Feldtheorie, bei der Symmetrieeigenschaften der Naturgesetze eine wichtige Rolle spielten, ist in der Öffentlichkeit so bekannt geworden, daß im Volksmund von HEISENBERGS "Weltformel" die Rede war. Leider war es auch HEISENBERG nicht vergönnt, den ersehnten Durchbruch zu schaffen. Wolfgang PAULI, der HEISENBERG bei seinen Arbeiten an einer allgemeinen Feldtheorie der Elementarteilchen in herzlicher Freundschaft wissenschaftlich unterstützte, mußte aus gesundheitlichen Gründen aufgeben.

Herrmann WEYL, ein Zeitgenosse EINSTEINS, hatte 1919 in Erweiterung des Relativitätsprinzips der Gravitationstheorie EINSTEINS die Idee der E i c h i n v a r i a n z als eine physikalische Symmetrie vorgeschlagen. Bis dahin waren in der Physik nur "globale" Symmetrien bekannt. Globale Symmetrietransformationen rufen überall im Raum gleichzeitig denselben Effekt hervor. Im Gegensatz dazu stellte WEYLS Eichinvarianz eine "lokale" Symmetrie dar, die vom Ort im vierdimensionalen Raum abhängt. Leider konnte kurz nach Bekanntwerden der Theorie gezeigt werden, daß WEYLS Interpretation der Eichinvarianz falsch war. Und so geriet eine Jahrhundertidee, auf deren Grundlage die theoretische Teilchenphysik heute eine einheitliche Beschreibung aller fundamentalen Kräfte zuversichtlich zu erzielen hofft, schnell wieder in Vergessenheit. Es dauerte über 50 Jahre, bis die Eichinvarianz wiederentdeckt, neu interpretiert und ihre bahnbrechende Bedeutung erkannt und verstanden wurde.

Die Elementarteilchenphysik unterscheidet vier fundamentale Naturkräfte, welche die Wechselwirkung aller heute bekannten Teilchen bewirken, sowohl derjenigen, aus denen alle Materie aufgebaut ist, als auch derjenigen, die an Beschleunigern erzeugt werden können und nur sehr kurze Zeit existieren. Es sind dies

- die Gravitationskraft, von der schon die Rede war,
- die Schwache Kraft, die z.B. für den radioaktiven Betazerfall des freien Neutrons und bestimmter instabiler Atomkerne, wie sie z.B. in Reaktoren entstehen, verantwortlich zeichnet, und

ohne die unsere Sonne nicht schiene,
- die Elektromagnetische Kraft, die u.a. für die Stabilität der Atome und den atomaren Aufbau aller makroskopischen Materie, aber auch für die Emission und Absorption von Licht verantwortlich ist und ohne die es weder Radio noch Fernsehen gäbe, und
- die Starke Kraft, welche zwischen den Quarks wirkt, aus denen z.B. die Kernbausteine Proton und Neutron aufgebaut sind und die auch indirekt in Form einer Art Restwechselwirkung von Proton und Neutron den Zusammenhalt dieser beiden Teilchen in den Atomkernen bewirkt.

Die Quantenfeldtheorie beschreibt die Wechselwirkung zwischen zwei Elementarteilchen, d.h. die wechselseitige Kraftwirkung auf einheitliche Weise durch den Austausch von Elementarteilchen einer bestimmten Klasse, den Bosonen. Die sehr unterschiedlichen Eigenschaften der vier fundamentalen Kräfte sind auf die Verschiedenheit und Eigenarten der ausgetauschten Vermittlerteilchen, den sog. Eichbosonen, zurückzuführen. Man kann zeigen, daß - und hierin besteht die Neuinterpretation und revolutionäre Bedeutung der lokalen Eichsymmetrien - die Existenz und die Eigenschaften der Vermittlerteilchen eine Folge von lokalen Symmetrien der Bewegungsgleichungen eines Systems wechselwirkender Teilchen ist. Kräfte resultieren aus Symmetrien! Die Symmetrieeigenschaften sind energieabhängig in dem Sinne, daß sich bei einer charakteristischen Schwellenenergie das Symmetrieverhalten spontan ändern kann, was sich so auswirkt, daß zwei fundamentale Naturkräfte, die bis zu einer bestimmten Schwellenenergie als in ihrem Wesen verschieden (z.B. Stärke und Reichweite der Kraft) erscheinen, oberhalb dieser charakteristischen Energie ihre Unterschiede verlieren und sich als einheitliche Kraft zu erkennen geben. Eine solche "spontane Symmetriebrechung" ist analog z.B. zur Ausbildung von Bezirken gleicher Magnetisierung unterhalb einer bestimmten Temperatur bei ferromagnetischen Stoffen wie Eisen. Die durch die gleichmäßig in alle Raumrichtungen zeigenden magnetischen Momente der Atome ausgezeichnete Symmetrie der Isotropie bei hohen Temperaturen ändert sich beim Erniedrigen der Temperatur bei einer bestimmten Schwellentemperatur spontan.

Auf der Grundlage von lokalen Eichsymmetrien und unter Einbeziehung des Mechanismus einer spontanen Symmetriebrechung ist es in den siebziger Jahren Sheldon GLASHOW, Steven WEINBERG und Abdus SALAM gelungen, die Elektromagnetische Kraft und die Schwache Kraft zur Elektroschwachen Kraft zu vereinen, will heißen durch ein einheitliches Modell zu beschreiben (Nobelpreis der Physik 1979) [4]. **Diese dritte Vereinigung zweier Naturkräfte hat bis heute allen experimentellen Tests standgehalten.** Durch die Leistungsfähigkeit des SALAM-WEINBERG-Modells ermuntert arbeiten Theoretiker der Teilchenphysik an der nächsten Vereinigung, nämlich der einheitlichen Beschreibung von Elektroschwacher und Starker Kraft. Solche Theorien der vierten Vereinigung heißen **Theorien der Großen Vereinigung** ("GUT" = Grand Unified Theories). Auch an einer Erweiterung der Großen Vereinigung und Vollendung der Vereinheitlichung aller fundamentalen Naturkräfte, der Einbeziehung der Gravitation als Quantenfeldtheorie in die Große Vereinigung, wird getüftelt. Dies geschieht im Rahmen einer verallgemeinerten Eichsymmetrie, Supersymmetrie ("SUSY") genannt. Wie eine endgültige "Weltformel" oder "TOE" (Theory of Everything) aussehen wird, vermag heute noch niemand zu sagen. Man ist sich aber weitgehend darin einig, daß innere Eichsymmetrien das vereinheitlichende Band bilden werden. Der frühere Generaldirektor von CERN, Professor H. Schopper brachte in einem Festvortrag 1988 diese Überzeugung so zum Ausdruck [5]: *"Heutzutage sind es die Symmetrieprinzipien, die am Ursprung unseres Verstehens zu stehen scheinen. Wir glauben, daß wir die Erscheinungen einschließlich des Verständnisses der sog. Elementarteilchen auf die Existenz von Eichfeldern zurückführen können, wobei aus der unendlich großen Mannigfaltigkeit von Eichfeldern einige durch bestimmte Symmetrien, die unterhalb gewisser Energien spontan gebrochen sind, ausgewählt werden."*

Bleiben wir noch bei der Physik hoher und höchster Energien und greifen wir uns einen weiteren typischen aber zugleich auch äußerst ungewöhnlichen vereinheitlichenden Aspekt heraus.

3. KOSMOLOGIE UND TEILCHENPHYSIK VEREINEN SICH

Die Entwicklung der Naturwissenschaften ist gekennzeichnet durch einen Prozeß zunehmender Differenzierung und Spezialisierung. Wann immer ein Bereich zu stark expandiert und der einzelne Wissenschaftler Gefahr läuft, den Überblick zu verlieren, beginnen Teilgebiete sich zu verselbständigen. Jüngste Beispiele sind z.B. die Halbleiterphysik, die Laserphysik, die nichtlineare Dynamik und Chaosphysik und die Hochtemperatur-Supraleitung, aber auch das Fach Informatik könnte hier durchaus aufgeführt werden. Es gibt aber erfreulicherweise in unserer Zeit auch ein Musterbeispiel der umgekehrten Entwicklungstendenz. Seit Jahren veranstalten Wissenschaftler zweier verschiedener Disziplinen gemeinsame Konferenzen und veröffentlichen ihre Forschungsergebnisse in denselben Fachzeitschriften. Es sind dies ausgerechnet Leute, die sich auf der einen Seite mit der Struktur des unendlichen Universums und auf der anderen Seite mit den kleinsten Bausteinen der Materie beschäftigen: die Kosmologen und Astrophysiker einerseits und die Elementarteilchenphysiker andererseits. Wie kommt es, daß sich gerade auf den ersten Blick als Antipoden erscheinende Gruppen einander näherkommen, ja sogar in ihrer Forschung aufeinander angewiesen sind?

Es gibt heute ein allgemein anerkanntes Standardmodell der Entstehung des Kosmos. Danach vollzog sich die kosmische Schöpfung in einer Art Explosion ("Urknall" oder "Big Bang" genannt). Unmittelbar nach der "Zündung" der Explosion war die Materie so dicht und so heiß, daß sich die fundamentalen Konstituenten der Materie noch nicht zu höheren Einheiten wie wir sie heute in Form von Atomen und Elementarteilchen kennen, zusammenschließen konnten. Dieser Umorganisationsprozeß geschah in den ersten Sekunden der Geschichte des Universums, als sich die Materie in Folge der Expansion des Raumes, die bis heute andauert, abzukühlen begann. Die Physik der ersten Sekunden bestimmte im wesentlichen das weitere Schicksal und die heutige Gestalt und Zusammensetzung des Kosmos. Die atomare Zusammensetzung der beobachtbaren Materie und Formen makroskopischer Massen des Weltalls sind aber nicht ausschließlich das Ergebnis des Urknalls sondern sind bestimmt durch

physikalische Prozesse, die im Kosmos ständig ablaufen, wie z.B. das Vergehen und die Neubildung von Sonnen und Sonnensystemen. Die Gesetzmäßigkeiten, nach denen diese Prozesse ablaufen, sind allerdings auch schon in der Physik des Urknalls begründet. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn sich Kosmologen und die Physiker, die sich mit Phänomenen des Weltalls befassen, mit der Physik der Konstituenten aller Materie und deren Wechselwirkungen (v.a. bei sehr hohen Energien) beschäftigen, wollen sie die Entwicklung und die mit Teleskopen wahrnehmbare Struktur des Kosmos verstehen. Umgekehrt sind die Vorgänge des Urknalls für diejenigen Teilchenphysiker, die sich um die Vereinheitlichung aller fundamentalen Wechselwirkungen bemühen, das einzige Testterrain ihrer Theorien, da - wie bereits dargelegt wurde - die Große Vereinigung bei sehr hohen Energien oder Temperaturen erfolgen soll, die sich in keinem Labor je realisieren lassen können. Indirekt lassen sich die Verhältnisse des Urknalls an den heute noch beobachtbaren Folgewirkungen mittels kosmologischer Modelle studieren. Dazu sind die Teilchenphysiker auf die Ergebnisse der kosmologischen Forschung und die Zusammenarbeit mit Kosmologen und Astrophysikern angewiesen.

Wir können also festhalten, daß sich die Vereinigung von Kosmologie, Astrophysik und Elementarteilchenphysik deswegen vollzogen hat, weil die Physik des frühen Universums die Physik der Elementarteilchen ist und weil die Physik der Elementarteilchen, über die sich die Theoretiker der Großen Vereinigung den Kopf zerbrechen, bei Energien relevant ist, die nur im frühen Universum auftraten. Die Wechselbeziehung beider Disziplinen hat auf der instrumentellen und experimentellen Seite zu der kuriosen Situation geführt, daß einige der besten Tests für kosmologische Modelle nicht mit Teleskopen sondern mit den Mammutbeschleunigern bzw. Kollisionsmaschinen der Hochenergie-Forschungszentren durchgeführt werden und daß mit riesigen Teleskopen die weitläufigen Strukturen des Kosmos untersucht werden mit dem Ziel, Aussagen der theoretischen Hochenergiephysik zu überprüfen. Zur Illustration der fruchtbaren Wechselwirkung von Kosmologie und Hochenergiephysik sei hier ein Fall etwas genauer diskutiert, in dem durch ein Beschleunigerexperiment im letzten Jahr (1989) eine

Vorhersage des kosmologischen Standardmodells verifiziert und damit zugleich die Physik um eine grundlegende Erkenntnis bereichert wurde.

Die Teilchenphysik unterscheidet zwischen Teilchen, welche der Starken Wechselwirkung unterliegen (Hadronen) und denen, die dies nicht tun (Leptonen) und den Vermittlerteilchen (Feldquanten) der fundamentalen Kräfte (Eichbosonen). Während die Leptonen bis jetzt als wirklich elementar (punktförmig, ohne feinere Struktur) angesehen werden, sind die Konstituenten der Hadronen die sog. Quarks. Interessanterweise hat man bis heute drei Leptonfamilien und drei Quarkfamilien mit jeweils 2 Mitgliedern ausmachen können:

e	μ	τ	u	c	t
ν_e	ν_μ	ν_τ	d	s	b

Die bis vor kurzem noch unbeantwortete Frage lautete: gibt es noch weitere Familien und wenn ja, wieviele?

Aus der Häufigkeit der leichtesten Elemente, insbesondere von Helium-4 überall im Universum hat die Kosmologie - gestützt auf spektroskopische Untersuchungen und auf die Theorie der Elementbildung nach dem kosmologischen Standardmodell - seit langem die Existenz von höchstens vier verschiedenen Neutrinoarten vorausgesagt. Die He-4 - Häufigkeit hängt sensibel von dieser Zahl ab. 1988 ging am europäischen Hochenergie-Forschungszentrum CERN in Genf die größte Elektron-Positron-Kollisionsmaschine in Betrieb, die u.a. zu dem Zweck gebaut wurde, die Eigenschaften des neutralen Feldteilchens der Schwachen Kraft, Z^0 , genau zu untersuchen. Das Z^0 -Teilchen lebt nur äußerst kurze Zeit (ca. 10^{-25} s) und zerfällt in leichtere Teilchen, u.a. auch in Neutrino-Antineutrino-Paare. Die Zerfallswahrscheinlichkeit des Z^0 hängt deshalb von der Zahl möglicher Arten von $\nu\bar{\nu}$ - Paaren, d.h. von der Zahl verschiedener Neutrinoarten ab. Bereits nach der Analyse der ersten wenigen Tausend Z^0 -Ereignisse stand Ende 1989 fest: es gibt nur drei verschiedene Neutrinoarten. Dies ist das erstemal, daß ein Beschleunigerexperiment eine kosmologische Vorhersage

verifiziert hat, und die Vorhersage von drei Neutrinoarten ist die erste kosmologische Aussage über einen fundamentalen Sachverhalt der Physik. Denn mit der Zahl der Neutrinoarten ist höchstwahrscheinlich auch die Zahl der Leptonfamilien und aus Symmetriegründen damit auch die Zahl der Quarkfamilien determiniert. Die übereinstimmende Antwort aus kosmologischer und Beschleunigerlaborforschung zu einer vieldiskutierten, bis letztes Jahr offenen grundlegenden Frage der Physik ist ein Triumph der Einheit der Physik.

4. STREUUNG ALS MITTEL ZUR ANALYSE VON STRUKTUREN

Ein methodischer Aspekt zur vereinheitlichenden Darstellung moderner Physik ist die systematische Untersuchung von Mikrostrukturen durch Streuexperimente. Das Aufspüren von immer feineren Substrukturen der Materie ist eine für die gesamte moderne Physik charakteristische Vorgehensweise. Die Strukturanalyse als Forschungsmittel wurde und wird nicht nur in vielen Bereichen der Physik sondern auch in der Chemie und in der Biologie mit großem Erfolg angewandt. Räumliche Strukturen lassen sich dadurch ausmachen, daß man einen gerichteten Teilchenstrahl mit dem zu untersuchenden Objekt wechselwirken läßt und das Ergebnis der Wechselwirkung studiert, indem man die durch das Versuchsobjekt ("Target") in alle Richtungen gestreuten Teilchen in Abhängigkeit vom Streuwinkel zählt und ihre Energie und den Impuls mißt (Abb. 2).

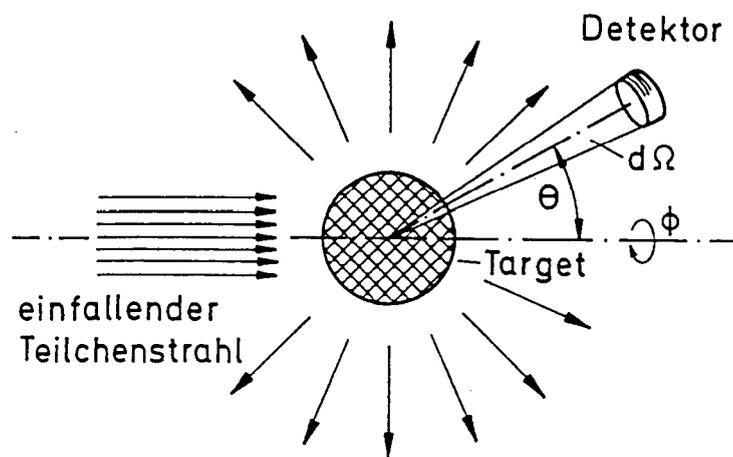


Abb. 2: Schema eines Streuexperimentes

Bei der Wechselwirkung der Geschößteilchen mit dem Target können auch neue Teilchen erzeugt werden. Aus der Intensitäts- und Energieverteilung der gestreuten Teilchen lassen sich Rückschlüsse auf die Struktur und die innere Dynamik der Targetkonstituenten ziehen. Je höher die Einschußenergie ist, desto feinere Strukturen lassen sich auflösen.

Die Erforschung atomarer und subatomarer Strukturen mit Hilfe von Streuexperimenten geht auf Ernest RUTHERFORD zurück, der 1911 in der berühmten Arbeit "The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom" die Methode begründete [6]. RUTHERFORD gab in dieser Arbeit die Entdeckung des Atomkerns bekannt. Die Bedeutung Rutherfords für die Physik ist weniger in dem aus den Streudaten abgeleiteten Planetenmodell des Atoms als vielmehr in der Begründung der seither bis auf den heutigen Tag in den Naturwissenschaften so erfolgreich praktizierten Analyse-methode zu sehen. Bereits 1912 konnte Max von LAUE durch Streuung von Röntgenstrahlen an Kristallen sowohl die Wellennatur dieser Strahlen wie auch den atomaren Gitteraufbau der Kristalle klarstellen. Er legte mit seinen Arbeiten den Grundstein zur Strukturanalyse der modernen Festkörperphysik. Diese Methode der Röntgenstrahlkristallographie konnte auch auf hochkomplexe organische Moleküle erfolgreich ausgedehnt werden und führte u.a. zur Aufklärung der Doppelspiralstruktur der DNS-Moleküle durch WATSON und CRICK (1962 Nobelpreis der Medizin).

Streuung ist das wesentlichste Forschungsmittel der Kern- und Elementarteilchenphysik. Nicht nur der Aufbau der Atomkerne aus Protonen und Neutronen und die Zusammensetzung dieser Kernkonstituenten aus drei Valenzquarks und einem "See" von virtuellen Quark/Antiquark-Paaren sowie die Quarkstruktur anderer Hadronen wurden durch Streuexperimente aufgeklärt, sondern auch die Eigenschaften der fundamentalen Kräfte lassen sich aus den Streudaten ableiten. Nach der Einführung des Quarkmodells durch die Amerikaner Murray GELL-MANN und George ZWEIG im Jahre 1963 war es lange Zeit unklar, ob es sich bei den Quarks um mathematische Fiktionen oder um real existierende Teilchen handelte, zumal trotz weltweiter intensiver Anstrengung es niemandem gelang, ein freies Quark

nachzuweisen. Den ersten Hinweis, daß das Nukleon tatsächlich aus punktförmigen Konstituenten aufgebaut ist, die sich auch sehr bald als die Quarks des Quarkmodells entpuppten, lieferte 1969 ein Experiment an dem 3,2 Km langen Elektron-Linearbeschleuniger in Stanford, USA, bei dem sehr hochenergetische Elektronen (20 GeV) auf Protonen geschossen und an ihnen gestreut wurden [7]. Das Experiment war eine Wiederholung des RUTHERFORD-Streuexperimentes von 1911 bei 4000-fach höherer Energie. Mit den gleichen Argumenten, mit denen Rutherford aus den Streudaten auf einen positiv geladenen punktförmigen Atomkern schloß, ließen die Stanford-Daten zweifelsfrei auf punktförmige Streuzentren innerhalb des Protons schließen. Der Beweis, daß es sich bei diesen Protonkonstituenten in der Tat um die Quarks von GELL-MANN und ZWEIG handelte, konnte durch einen Vergleich der Streudaten von Stanford mit den Ergebnissen der Streuung von Neutrinos an Protonen und Neutronen eines CERN-Experiments erbracht werden.

Bei den Streuprozessen spielt die Wellennatur der Geschossteilchen eine entscheidende Rolle. Deswegen eignet sich die Betrachtung von Streuungen auch zur Einführung in die Problematik der Quantenmechanik, worauf SEXL und STREERUWITZ in einem Aufsatz mit dem Titel "Streuung als Mittel der Strukturforchung" [8] eindringlich aufmerksam machen. Die Autoren zeigen auf, *"wie man auf dem Weg über Streuexperimente einen sehr einfachen Einstieg in wesentliche Aspekte der modernen Quantentheorie gewinnt: Ohne großen mathematischen Aufwand wird es möglich, bis zu den Forschungsmethoden der Elementarteilchenphysik vorzustoßen"*. Die Quantenmechanik vereinigt den Teilchen- und den Wellenaspekt von Licht und Materie und löst den sog. Dualismus auf. Von daher verdiente sie eigentlich ein eigenes Kapitel im Rahmen unserer Thematik. Aus Gründen der Beschränkung muß aber leider darauf verzichtet werden, den vereinheitlichenden Aspekt der Quantenphysik in voller Allgemeinheit zu diskutieren. Stattdessen soll abschließend auf ein besonderes Quantenphänomen hingewiesen werden, das einen vereinheitlichenden Aspekt bei der unterrichtlichen Behandlung von Atom-, Kern- und Teilchenphysik liefert. Es wurde auf drei verschiedenen Ebenen höchst unterschiedlicher Energie mit der gleichen Methode untersucht. Die Rede ist von der

Spektroskopie dynamischer mikroskopischer Teilchensysteme.

5. DIE DREI EBENEN DER SPEKTROSKOPIE

Werden Teilchen durch eine zwischen ihnen wechselseitig wirkende Kraft zusammengebunden, formen sie i.a. ein dynamisches System. Beispiele solcher Systeme sind Atome, Kerne, Baryonen wie Proton und Neutron und Mesonen. Führt man diesen Systemen auf irgendeine Weise Energie zu, werden sie in einen sog. angeregten Zustand versetzt. Die Anregungsenergien sind quantisiert (d.h. es kommen nur bestimmte diskrete Energiewerte vor) und das Energieniveauschema spiegelt die innere Dynamik des Systems wider. Ein angeregtes System entledigt sich der überschüssigen Energie durch Emission von Quanten (Bosonen wie Photonen, Pionen u.s.w.) mit definierten Energien, die der Energiedifferenz zweier Anregungszustände diskreter Energie entsprechen. Das Energiespektrum der emittierten Quanten und damit auch das der Anregungszustände, das man Termschema nennt, ist charakteristisch für jedes betrachtete System. Seine Vermessung nennt man Spektroskopie. Abb. 3 zeigt das Termschema einiger Anregungsenergien von drei verschiedenen gebundenen Teilchensystemen, der Elektronenhülle eines Atoms, des Nukleonensystems eines Atomkerns und des Quarksystems des Nukleons (Protons bzw. Neutrons).

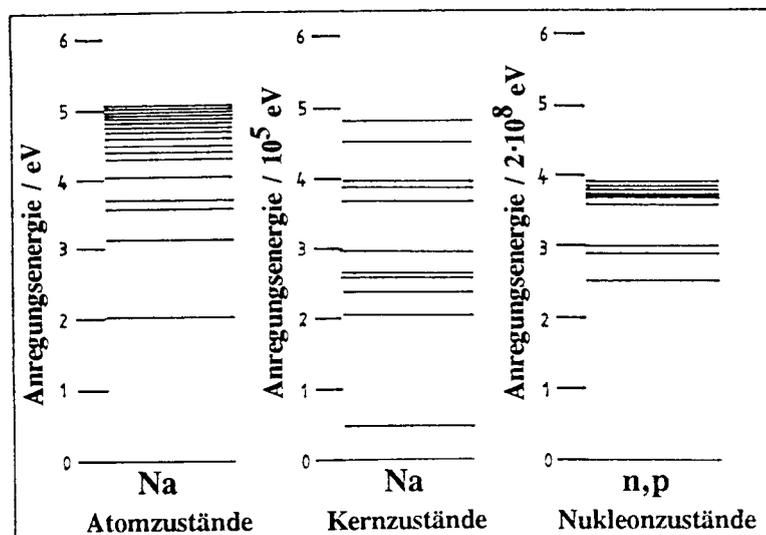


Abb. 3: Beispiele von Termschemata für die drei Spektroskopieebenen

Die farbigen Spektrallinien der Atomspektroskopie im sichtbaren Wellenlängenbereich, die diskreten Energien der emittierten Photonen zugeordnet werden können, sind uns allen aus dem Physik- oder Chemieunterricht bekannt. Angeregte Atomkerne können sich ebenfalls durch Emission von Photonen abregen, deren Energien um mindestens drei Zehnerpotenzen höher liegen als die der Lichtquanten der Atome. Abb. 4 zeigt als Beispiel das Energiespektrum von Photonen eines angeregten Kerns.

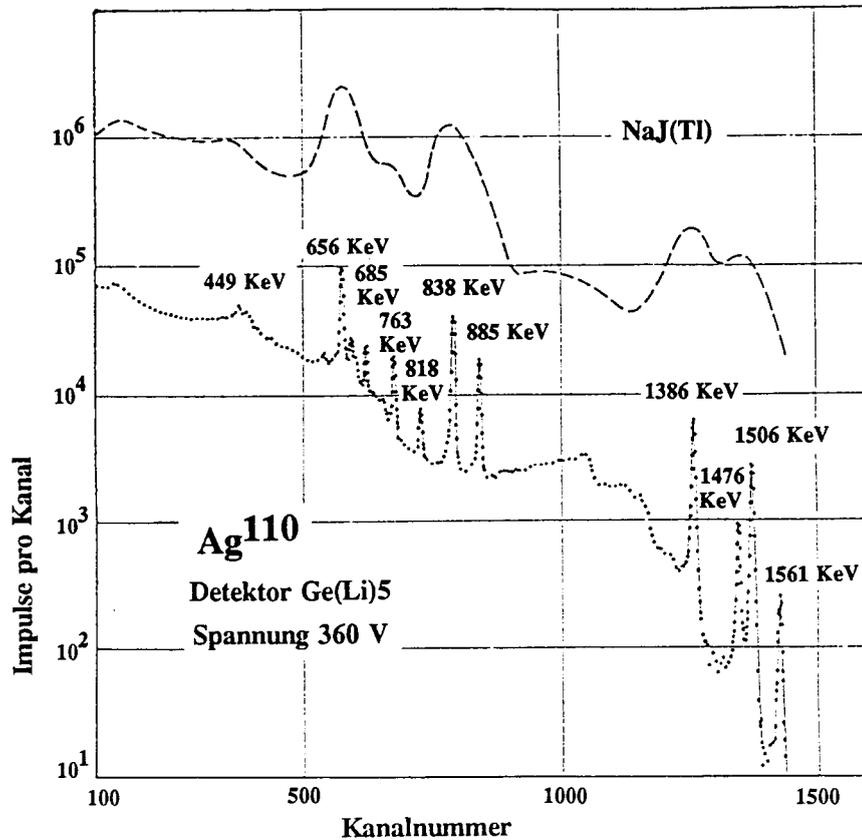


Abb. 4: Gammastrahlen-Spektren von ^{110}Ag , aufgenommen mit einem NaJ(Tl)-Szintillationsdetektor und einem Ge-Detektor

Die aus Quark/ Antiquark-Paaren oder aus drei Quarks aufgebauten Hadronen (Mesonen und Baryonen) können als Zweikörper- und Dreikörper-Atome aufgefaßt werden. Ihre Anregungsenergien liegen noch einmal zwei Zehnerpotenzen höher als die der Atomkerne. Die quantenmechanische Behandlung von schweren Quarksystemen entspricht exakt der von Atomen. Die Untersuchung von Anregungszuständen der Hadronen bedeutet Atomspektroskopie bei höchsten Energien. Abb. 5 zeigt das Photonenspektrum des "Charmoniums",

eines aus einem Charmquark/ Charmantiquark - Paar bestehenden Quarkatoms, des J/ψ -Mesons. Die Spitzen entsprechen den Spektrallinien eines herkömmlichen Atoms. Wie das Wasserstoffspektrum das Coulombpotential der elektrostatischen Kraft zwischen Elektron und Proton widerspiegelt, kann man aus dem Spektrum der Abb. 5 auf das Potential zwischen Quark und Antiquark und damit auf Eigenschaften der Starken Kraft schließen. Wie sich die Bilder gleichen!

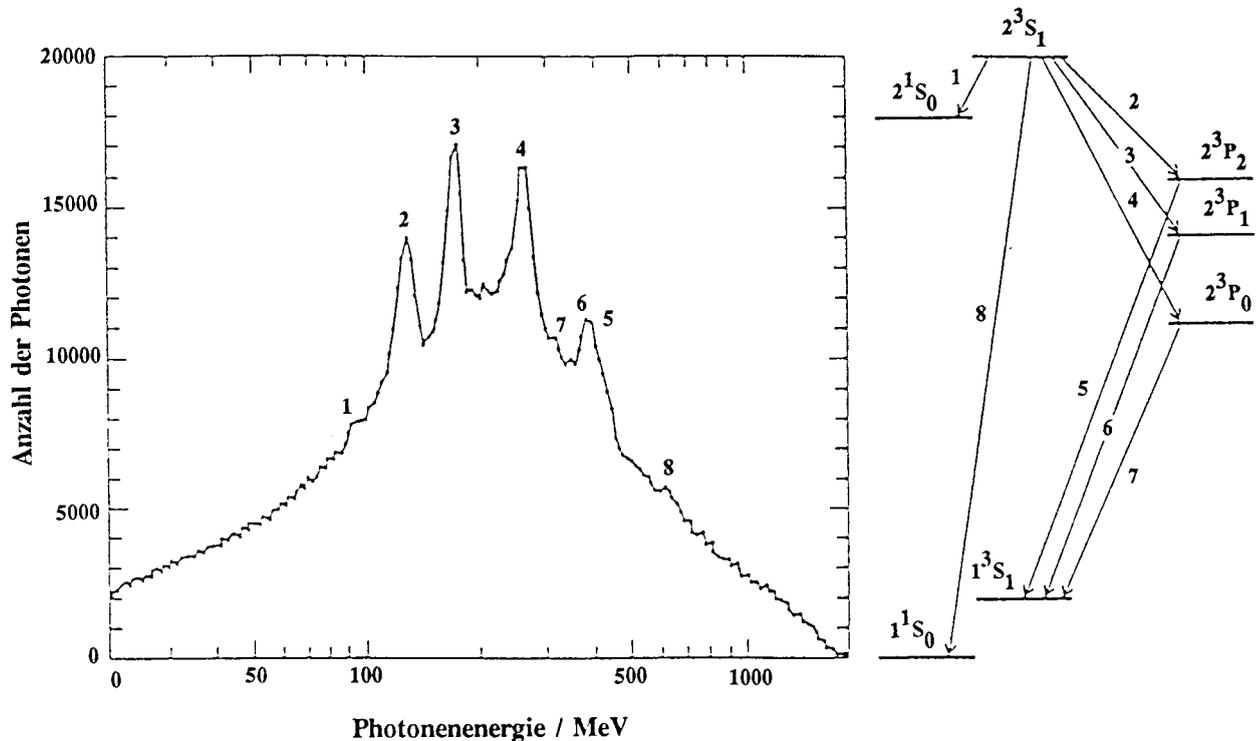


Abb. 5: Gammastrahlen-Spektrum des "Charmoniums" und die korrespondierenden Strahlungsübergänge

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DEN UNTERRICHT

Ich habe versucht, an einigen Beispielen exemplarisch vereinheitlichende Aspekte der modernen Physik aufzuzeigen. Es ließen sich noch zahlreiche weitere Themen anführen, an denen man die innere Kohärenz und gemeinsame Wesenszüge der Physik demonstrieren könnte. Berücksichtigte man in stärkerem Maße als bisher in der Lehrerausbildung und im Physikunterricht der Schulen vereinheitlichende Aspekte, so könnte man durch Analogieargumente, Querver-

weise und bewußtere Konzentration auf grundlegende Prinzipien und einheitliche Strukturen nicht nur den Druck der Stofffülle mindern, sondern man würde darüber hinaus auch und vor allem zu einem tieferen Verständnis der großen Zusammenhänge der Physik beitragen. Schließlich darf nicht unerwähnt bleiben, daß ein vereinheitlichende Aspekte besonders berücksichtigender Unterricht den Freiraum schafft und Gelegenheit bietet, auch aktuelle Themen aufzugreifen, die für naturwissenschaftliche Fragen aufgeschlossene Schüler besonders interessieren und die im konventionellen Unterricht kaum Platz haben. Ein Unterricht unter besonderer Berücksichtigung vereinheitlichender Aspekte setzt eine entsprechende Ausbildung der Lehramtsstudenten voraus und erfordert Fortbildungslehrgänge und -literatur für den praktizierenden Lehrer: ein weites, fast noch brach liegendes Betätigungsfeld für die Fachdidaktik der Physik!

LITERATUR

- [1] E. Cassirer: Philosophie der Aufklärung, Mohn, Tübingen, 1973 (3. Auflage)
- [2] J.C. Maxwell: "On Physical Lines of Force", Phil Mag., 1862 und
"A Treatise on Electricity and Magnetism", 2 Bde., Oxford 1862
dt. Übersetzung: "Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus", Berlin 1883
- [3] G. Gamov: Biographie der Physik, Econ-Verlag, Düsseldorf 1965
- [4] S. Weinberg: "Vereinheitlichte Theorie der Elektroschwachen Wechselwirkung".
In: Teilchen, Felder und Symmetrien, Reihe: Verständliche Forschung,
Spektrum Verlag, Heidelberg, 1986 (allgemein verständliche Darstellung)
- [5] H. Schopper, Phys. Blätter 44/8 (1988) 319 - 324
- [6] E. Rutherford, Phil. Mag. 21 (1911) 669 - 688, s. auch Berkeley Physik-Kurs Bd. 1
- [7] M. Breidenbach et al., Phys. Rev. Lett. 23 (1969) 935 - 939 und
H.W. Kendall and W. Panofsky, Scientific American 6 (1971) 60 - 77
- [8] R. Sexl/E. Streeruwitz, PhysD 4 (1976) 245 - 258