

Fachwissenschaft für's Lehramt
- 2 Beispiele und was sich daraus lernen lässt -

Andreas Schulz*, Stefan Brackertz*, Thomas Jockweg⁺

*Universität zu Köln, ⁺Gesamtschule Köln-Holweide
Andreas.Schulz@uni-koeln.de

Kurzfassung

Seit Langem, zuletzt in diesem Jahr fordert die DPG ein Lehramtsstudium sui generis inklusive eigener, auf das Lehramt zugeschnittener fachwissenschaftlicher Veranstaltungen. Allein: Trotz angeregter Debatten und pointierter Stellungnahmen ist kaum klar, was diese Veranstaltungen eigentlich ausmacht außer weniger Details, weniger Mathe und Auslassen von Inhalten. In diesem Vortrag werden exemplarisch zwei fachwissenschaftliche Veranstaltungen fürs Lehramt zur modernen Physik vorgestellt und an Hand der Konzeption dieser Veranstaltungen einige Leitideen für die Gestaltung von Lehramts-bezogenen fachwissenschaftlichen Physikveranstaltungen heraus gearbeitet.

1. Einleitung und Motivation der Veranstaltungen

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) fordert in ihrer Studie „Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik“ [1] schon 2006 ein Lehramtsstudium „sui generis“ und spricht sich ausdrücklich gegen ein polyvalentes Studium aus. Die DPG und die Konferenz der Fachbereiche Physik (KFP) veröffentlichen 2023 eine weitere Studie [2] zur Situation des Lehramtsstudiums Physik in Deutschland, für die über 1000 Lehramtsstudierende und die Fachbereiche Physik von 48 Hochschulen befragt worden sind. „Auf Grundlage dieser und früherer Studien, nach Konsultation einer erweiterten Expertenrunde sowie im Licht von Erkenntnissen aus der physikdidaktischen Forschung stellt die DPG folgende Thesen auf:

- a) „Das Lehramtsstudium muss zur Priorität werden. Die Lehramtsausbildung erfährt nicht die Wertschätzung, die ihrer Bedeutung entspricht. Auf allen Ebenen – von der Politik über die Universitäten bis hin zu den Fachbereichen – muss die Lehramtsausbildung mit Vorrang behandelt werden. Insbesondere müssen die an Universitäten bestehenden forschungsorientierten Anreizsysteme zu Gunsten eines Engagements im Lehramtsstudium umgestaltet werden. (...)“
- b) Lehrer*innen müssen ein Lehramtsstudium absolvieren. Das reguläre Lehramtsstudium mit anschließendem Referendariat muss weiterhin die Grundlage für den Lehrerberuf bleiben. (...)“

Im Physik Journal heißt es dazu u.a.: „Beim ‚sui generis-Modell ist das Lehramtsstudium von Anfang an exklusiv auf die künftigen Lehrkräfte hin ausgerichtet. Am häufigsten ist das Lehramtsstudium aber in das Fachstudium eingebettet.“ [3] Weiterhin wird dort festgestellt, dass ein Wechsel zwischen Fach-

und Lehramtsstudium kaum stattfindet, dass also Lehramtsstudierende eindeutig auf den konkreten Lehrberuf hin orientiert sind. Lehramtsstudierende nehmen die fachwissenschaftlichen Anteile des Studiums als zu wenig einschlägig für die spätere Arbeit in der Schule wahr. Es wird konstatiert, dass „viele Themen, die für den Physikunterricht wichtig sind, etwa Klimaphysik oder Astrophysik, im klassischen Kanon der Fachstudiengänge Physik fehlen“ [3]. Die Studie gipfelt in dem Appell „Eigene Lehramtsstudiengänge braucht das Land“. In zwei Leserbriefen auf den Artikel von Woitzig et al. wird festgestellt „Es müssen wohl Korrekturen am gesamten System der Lehrerausbildung erfolgen.“ [4] und „Eine optimale Ausbildung verlangt für die Lehramtsstudent(inn)en ein Studium eigener Art. Sie ist kein Anhängsel an einen Fachstudiengang Physik.“ [5]. Und weiterhin heißt es „Umgesetzt wurde von diesen Forderungen fast nichts (...) Das ist ein Alarmzeichen ersten Ranges: Nicht einmal die eigene Fachgesellschaft DPG findet Gehör bei den Fachbereichen Physik.“ Und weiterhin: „Was muss denn noch geschehen, damit die Fachbereiche sich endlich mit großer Tatkraft an eine Verbesserung der Lehramtsausbildung machen?“ [5].

Zu ganz ähnlichen Ergebnissen kommt die Studie von Heinicke et al. [6]. Dort heißt es u.a.: „Die DPG hat 2006 ein Studium sui generis empfohlen als ‚moderne und zeitgemäße‘ Organisation des Lehramtsstudiums. Ressourcenbedingt resultiert hieraus in der Konsequenz eine besondere Verbindlichkeit gegenüber der Lehramtsausbildung, um auch für kleine Gruppen von Lehramtsstudierenden komplett eigenständige Veranstaltungen anzubieten.“ Im letzten Satz wird resümiert: „Eine hochschuldidaktische Reform ist nötig.“

Doch was macht eigentlich eine fachwissenschaftliche Lehramtsveranstaltung aus?

In diesem Beitrag werden zwei Vorlesungen vorgestellt, die in Bezug auf die moderne Physik speziell für das Lehramt Physik (Sekundarstufe I und II im Masterstudium) entwickelt und mehrfach durchgeführt wurden: Kern- und Elementarteilchen-Physik sowie Einführung in die Astrophysik, jeweils einsemestrig. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung von Stoffauswahl und Aufbau, an denen einige zu Grunde gelegte Gestaltungsprinzipien exemplarisch erläutert werden.

Ergänzt wird dies durch einen Rückblick auf diese Veranstaltungen aus Sicht eines ehemaligen Studenten und jetzigen Lehrers.

2. Inhalte und Aufbau der Veranstaltungen

2.1. Kern- und Elementarteilchen-Physik für Lehramtsstudierende

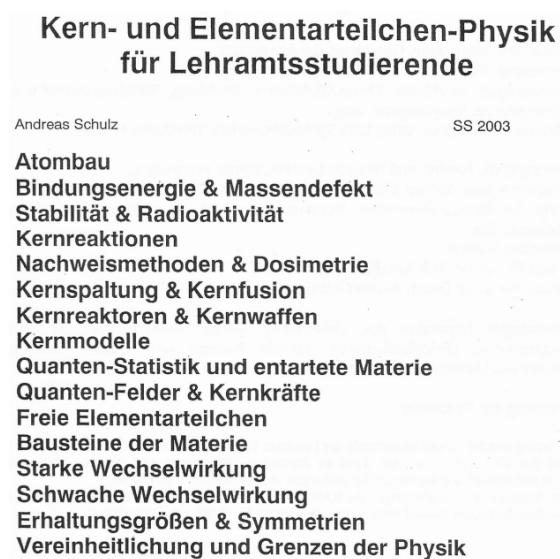


Abb. 1: Übersicht über die behandelten Themen in der Kern- und Elementarteilchenphysik

Behandelt werden die grundlegenden Themenbereiche sowohl der Kern- als auch der Elementarteilchen-Physik. Dabei stehen weniger die detaillierten Arbeitsmethoden in der Forschung (wie z.B. an einem Beschleuniger) Tätiger im Vordergrund, sondern vielmehr die grundlegenden Erkenntnisse und Zusammenhänge über den Bau und die Struktur von Materie und Feldern, sowie deren Bezug zu Vorgängen in Technik, Umwelt und Alltag.

Besonderer Wert wird dabei auf eine plastische Herausarbeitung der zentralen Begriffe und des aktuellen Weltbildes gelegt. Offene Fragen der Physik werden dabei besonders betont, gemäß dem Gestaltungsprinzip (Abbildung 2) „Spannend wird es, wo sich Verstandenes und offene wissenschaftliche Frage treffen.“

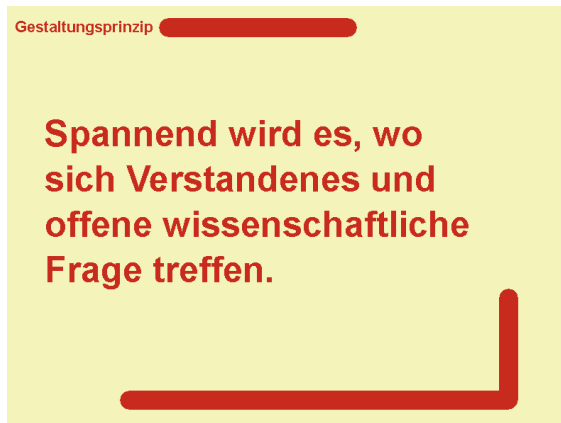


Abb. 2: Gestaltungsprinzip a

Schon länger bekannt und inzwischen empirisch umfassend belegt ist für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften in den ersten Semestern, dass sie selbst unter günstigsten Bedingungen nur einen Bruchteil des Veranstaltungsstoffes mitnehmen. [7],[8] Auch in höheren Semestern und in der Schule, insbesondere in heterogenen Kursen, dürfte im Prinzip das gleiche Problem bestehen. Angesichts dessen wurde in dieser Veranstaltung ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, den Studierenden laufend den Wiedereinstieg in die Vorlesung zu ermöglichen, ohne alles, was vielleicht vorher nicht mitgenommen wurde, zunächst aufarbeiten zu müssen. Dafür wurde die Stabilitätskurve der Kernphysik (Abbildung 4) als zentraler Bezugspunkt der Veranstaltung gewählt, die als Ausgangs- und Endpunkt der Besprechungen fast aller Veranstaltungsthemen diente.

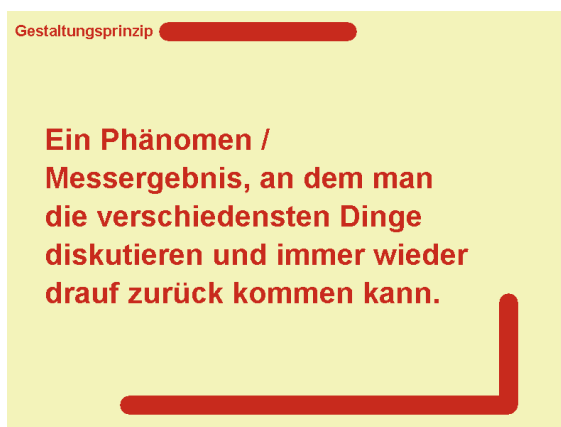


Abb. 3: Gestaltungsprinzip b

Das Gestaltungsprinzip „Ein Phänomen / Messergebnis, an dem man die verschiedensten Dinge diskutieren und immer wieder drauf zurück kommen kann.“ (Abbildung 3) wurde dabei in drei Teilen realisiert, wobei immer Exkurse zu gesellschaftlichen Debatten eingeschoben wurden. Dabei wurden die Argumente der öffentlichen Debatte in Bezug zum

erlernten Fachwissen gestellt, ohne die Position des Dozenten zu verheimlichen. Dem liegt die Auffassung zu Grunde, dass Objektivität, aber nicht Neutralität möglich ist und dass es dem Beutelsbacher Konsens [9] am ehesten gerecht wird, wenn die Position des Sprechers transparent aber nicht dominant gemacht wird.

2.1.1. Atombau und Stabilitätskurve?

Im einführenden Kapitel Atombau werden grundlegende atomare Größen wie Ordnungszahl A und Ladungszahl Z sowie atomare Massezahl der Elemente im Periodensystem und eine sinnvolle Energieeinheit (Elektronenvolt, eV) definiert. Auch die Isotopie wird hier behandelt. In Bindungsenergie & Massendefekt wird die Bindungsenergie der Atomkerne pro Nukleon in Abhängigkeit von der Ordnungszahl A behandelt. Sie steigt zunächst bis zum Eisen ($A = 56$, $Z = 26$) an um dann allmählich wieder langsam zu sinken.

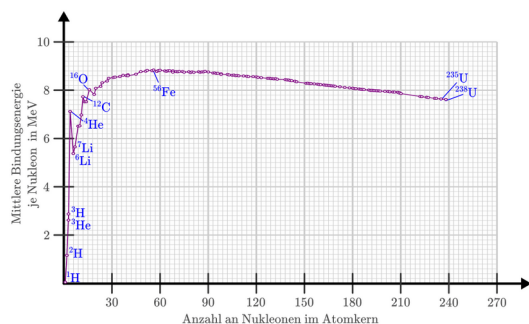


Abb. 4: Stabilitätskurve. (Quelle: Meyer, L (2023) Leserbrief zu [3]. Leserbrief in Physik Journal 23, Nr. 8 [10])

2.1.2. Was lässt sich aus der Stabilitätskurve lernen?

Diese Betrachtung führt nahtlos zum Kapitel Stabilität und Radioaktivität. Das letzte stabile Element ist Blei ($Z = 82$), danach werden die Elemente immer instabiler, ab dem Neptunium ($Z = 93$) kommen die Elemente nicht mehr natürlich auf der Erde vor, da ihre Zerfallszeit erheblich kürzer als das Alter der Erde ist. Zwei Elemente zwischendrin im Periodensystem kommen nicht natürlich vor, da sie kein stabiles Isotop besitzen (Technetium und Promethium). Die zunehmende Radioaktivität der schweren Kerne rührt von der zunehmenden Abstoßung der Protonen im Kern her, die von der Starken Kernkraft nicht mehr kompensiert werden kann. Zunächst (bis zum Blei) „schützen“ sich die Kerne, indem sie – ab dem Scandium, $Z = 21$ – mehr Neutronen als Protonen im Kern einlagern, die ja der Starken Kernkraft, nicht aber der elektrischen Abstoßung unterliegen. In die-

sem Kapitel wird auch das radioaktive Zerfallsgesetz (eine Exponentialfunktion wie alles Wachsen und Zerfallen in der Natur) hergeleitet und die Geiger-Nuttal-Regel behandelt. Radioaktivität ist im Alltag allgegenwärtig und somit ein wichtiges Schulthema. Hier werden dann auch Alpha-Zerfall, Beta-Zerfall und Gamma-Emission ausführlich diskutiert.

Im nächsten Kapitel werden Kernreaktionen behandelt, inklusive Kernspaltung, Neutroneneinfang und Kernfusion – durch letzteren Prozess werden im Universum alle Elemente jenseits von Helium bis zum Eisen ($Z = 26$) erzeugt, die viel selteneren Elemente danach durch Neutroneneinfang und anschließenden Beta-Zerfall. Hier wird auch auf den Begriff des Wirkungsquerschnitts eingegangen, ohne damit quantitativ zu arbeiten.

Das praxisnahe Kapitel Nachweismethoden und Dosimetrie ist wieder sehr schulelevant und schließt das so wichtige Thema Strahlenschutz ein.

Das auch nach der Schließung aller Kernkraftwerke in Deutschland immer noch akute Thema Kernspaltung und Kernfusion wird uns alle noch lange in die Zukunft hinein beschäftigen. Insbesondere die Kernfusion, wie sie in der Sonne geschieht, ist wieder zunehmend in der Debatte.

Daran schließt sich nahtlos an das Kapitel Kernreaktoren und Kernwaffen. Insbesondere sollte jede(r) Schüler*in am Ende ihrer/seiner Schulzeit über Techniken und Arbeitsweisen hierzu Bescheid wissen. Angesichts der öffentlichen Debatte um diese Technologien wurde dabei besonderer Wert darauf gelegt, herauszuarbeiten, inwiefern Kernreaktoren und Kernwaffen eine gemeinsame technologische Grundlage haben.

2.1.3. Wie kommt die Stabilitätskurve zu Stande?

Im Kapitel Kernmodelle stehen zwei Modelle im Vordergrund: Das Tröpfchenmodell nach Gamow bzw. von Weizsäcker und das jüngere Schalenmodell nach Jensen bzw. Mayer-Göppert. Das Tröpfchenmodell ist geeignet, die Kernspaltung zu veranschaulichen. Das Kernschalenmodell verdeutlicht, dass – ebenso wie in der Atomhülle – auch im Kern ein Schalenbau aufgrund des Pauli-Verbots (das auch für Protonen und Neutronen gilt) vorliegt.

¹ Eine personifizierende Sprache wie hier verwendet ist durchaus umstritten, es gibt aber auch gute Gründe dafür, siehe z.B. [11] und [12]

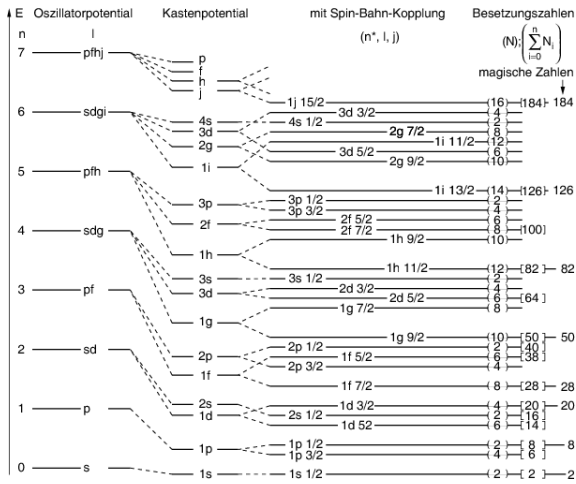


Abb. 5: Schalenmodell der Protonen. (Quelle: Demtröder, W. (2014). Kernkräfte und Kernmodelle. In: Experimentalphysik 4. Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg [13]. Abbildung 5.34, Seite 135)

Nur ist der Aufbau der Schalen völlig anders als in der Atomhülle, da insbesondere im Kern die Spin-Bahn-Kopplung der Niveaus – anders als in der Hülle – extrem stark ist, womit die Hauptquantenzahlen im Kern ihre Bedeutung verlieren, vergleiche Abbildung 5. Dabei wird die Spin-Bahn-Kopplung nicht im Detail behandelt; vielmehr geht es darum, herauszuarbeiten, dass das Kernschalenmodell wie viele andere darauf beruht, dass eine Hierarchie der Wechselwirkungen angenommen wird, die nur eine Näherung ist, und man es bei Atom und Kernphysik mit demselben Modell aber entgegen gesetzten Extremfällen zu tun hat. Realisiert und diskutiert wurden dabei zwei Gestaltungsprinzipien, die auch für den Schulunterricht von Bedeutung sind: „Die Kunst der Physik ist (auch) die Kunst der Näherung – und die Näherungen sind in Atom- und Kernphysik, die sich ansonsten sehr ähnlich sind, verschieden.“ (Abbildung 6) ist ein wichtiger Aspekt der „nature of physics“, der in der Schule oft zu kurz kommt. „Vergleiche zwischen verschiedenen Gebieten der Physik herstellen: Was ist gleich / ähnlich, was verschieden?“ (Abbildung 7) ist auch für den Schulunterricht hilfreich.

Hieran anschließend wird die Quantenstatistik nach Fermi und entartete Materie durchgerechnet, ausgehend von der Boltzmann-Statistik, nun aber unter Einschluss der Tatsache, dass – anders als bei Boltzmann – hier nicht mehr unendlich viele Energieniveaus zur Besetzung zur Verfügung stehen, sondern die Anzahl der Niveaus bei sehr hohen Materiedichten beschränkt ist. Dies wird aus zwei Gründen relativ ausführlich behandelt: Es ist ein einleuchtendes Beispiel dafür, wie mit Hilfe der Statistischen Physik bereits mit sehr einfachen Annahmen und machbaren Rechnungen sehr weitreichende Ergebnisse erzielt werden können. Zudem spielt entartete Materie sowohl bei Nukleonen im Kern eine wichtige Rolle,

als auch in den Endstadien von Sternen (Weißen Zwergen, Neutronensternen, Schwarzen Löchern). Das Thema bietet somit einen Anknüpfungspunkt zur (nuklearen) Astrophysik im Sinne des bereits erwähnten Gestaltungsprinzips. (Abbildung 7)

Gestaltungsprinzip

Die Kunst der Physik ist (auch) die Kunst der Näherung – und die Näherungen sind in Atom- und Kernphysik, die sich ansonsten sehr ähnlich sind, verschieden.

Abb. 6: Gestaltungsprinzip c

Das folgende Kapitel Quanten-Felder und Kernkräfte leitet den Übergang zur Elementarteilchen-Physik ein. Es behandelt alle 4 im Kosmos vertretenen Kräfte (Wechselwirkungen) und ihre Potenziale. Dabei wird auch die Schwierigkeit betont, dass es bisher noch nicht gelungen ist, die Gravitation zu quantisieren, was zu großen theoretischen Problemen insbesondere bei sehr kleinen Längenskalen führt. Ein vorgeschlagener theoretischer Ansatz, die String-Theorie, ist noch völlig unzureichend ausgearbeitet (es sei bemerkt, dass sie statt der 4 als gesichert geltenden Dimensionen im Kosmos – siehe Allgemeine Relativitätstheorie – derer mindestens 11 benötigt, von denen sich 7 bisher einem Nachweis durch Beobachtung entziehen).

Gestaltungsprinzip

Vergleiche zwischen und Bezüge zu verschiedenen Gebieten der Physik herstellen: Was ist gleich / ähnlich, was verschieden?

Abb. 7: Gestaltungsprinzip d

Eine Wechselwirkung (Kraft) kann grundsätzlich zweierlei: Bewegungszustand ändern (also anziehen oder abstoßen) oder umwandeln. So ist z.B. die umwandelnde Wirkung der elektromagnetische Kraft die Paarerzeugung bzw. Paarvernichtung (z.B. zerstrahlen sich ein Elektron und sein Antiteilchen Po-

sitron zu zwei Gamma-Quanten, also elektromagnetischer Strahlung). Zu jeder Wechselwirkung gehört eine zugehörige Ladungseigenschaft, die elektrische, die gravitative (das ist nichts anderes als die Masse), die starke und die schwache Ladung; zu jeder Ladungsart gibt es auch eine Anti-Ladung. Kraftwirkung ist nun nicht, dass „einer am anderen zieht“, sondern dass es aufgrund der entsprechenden Ladung zum Austausch von Wechselwirkungsquanten kommt. Dieser Prozess erzeugt die Wechselwirkung. Wichtig ist, dass dabei betont wird, dass die Analogie von Gravitation und den übrigen Wechselwirkungen zu Problemen mit der Allgemeinen Relativitätstheorie führt.

Gestaltungsprinzip

Physik lebt auch von der großen Erzählung:

Hier: Wie die Physik ihre postmoderne Phase überwunden hat (Vom „Teilchenzoo“ zum Standardmodell)

Abb. 8: Gestaltungsprinzip e

Im folgenden Abschnitt geht es um die Geschichte „postmoderne Phase“ der Physik und ihre Überwindung, denn „Physik lebt auch von der großen, oft zeitgeschichtlichen Erzählung“ (Abbildung 8): Zunächst werden der Geschichte folgend phänomenologisch freie Elementarteilchen, Hadronen (die der Starken Wechselwirkung unterliegen), Leptonen (für die das nicht gilt) und Austauschteilchen (Wechselwirkungs-Quanten) unterschieden. Zu ihnen zählen die Photonen, Gluonen, Weakonen und Gravitonen – letztere sind noch nicht entdeckt, wohl aber die Gravitationsstrahlung. Zu diesen Quanten zählt auch das Higgs-Teilchen (entdeckt 2012). Die Nukleonen im Kern zählen zu den Hadronen, die Elektronen der Atomhülle zu den Leptonen. Hadronen sind Baryonen (zu denen auch die Nukleonen zählen) und Mesonen. Die Gruppe der Baryonen mit Spin $\frac{1}{2}$ wird mit ihren Multipletts vorgestellt. Im zweiten Teil dieses Abschnitts wird dann erläutert wie dieser „Teilchen-Zoo“ wenig später mit Hilfe des Standardmodells der Teilchenphysik und den elementaren Bausteinen der Physik, den Quarks und Leptonen, geordnet werden konnte: Hadronen (also Baryonen und Mesonen) sind zusammengesetzt aus Quarks (Baryonen aus 3 Quarks, Mesonen aus einem Quark-Antiquark-Paar), Leptonen sind, soweit bekannt, elementar. Es gibt 6 verschiedene Quarks (Up und Down, Charm und Strange, Top und Bot-

tom) in 3 „Generationen“, wobei nur die unterste mit Up und Down stabil ist, die beiden anderen zerfallen nach sehr kurzer Zeit. Ebenso gibt es 3 „Generationen“ von Leptonen (Elektron, elektronisches Neutrino, Myon, myonisches Neutrino, Tauon, taonisches Neutrino), auch hier ist nur die unterste stabil ist, Myon und Tauon zerfallen rasch (ob Myon-Neutrino und Tauon-Neutrino auf Dauer stabil sind, ist noch nicht gesichert). Neutrinos wechselwirken mit Materie so gut wie nicht, sie können z.B. durch den menschlichen Körper ungehindert hindurchtreten, sogar großteils durch die ganze Erde. Allerdings können die Neutrino-Arten ineinander oszillieren, wenn sie genügend große Strecken fliegen (z.B. durch den Erdkörper). Dies wird gemäß des Grundsatzes „Und jetzt nicht mehr nur staunen: Meldungen zu aktueller Forschung können wir jetzt selbst verstehen.“ (Abbildung 9) am berühmten Super-Kamiokande-Experiment diskutiert.

Gestaltungsprinzip

Und jetzt nicht mehr nur staunen:

Meldungen zu aktueller Forschung können wir jetzt selbst verstehen.

Abb. 9: Gestaltungsprinzip f

Im letzten Abschnitt der Vorlesung werden Starke und Schwache Wechselwirkung im Lichte des Standardmodells betrachtet und die Rolle der Symmetrie in diesem Modell besprochen:

Was die Hadronen bzw. deren Quarks zusammen hält, ist die Starke Wechselwirkung, die durch die Theorie der Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben wird. Die starke Wechselwirkung ist besonders kompliziert. Von den starken Ladungen („rot“, „grün“, „blau“, man nennt sie auch „Farbladungen“) gibt es 3 und 3 Antiladungen. Die Kraftübertragung geschieht – wie bei den anderen Wechselwirkungen auch – durch Austausch von Wechselwirkungsquanten, das sind hier die Gluonen, die ihrerseits eine Doppel-Farbladung besitzen (eine Farbe und eine Anti-Farbe). Beim Austauschprozess „kasiert“ das Gluon über seine Antifarbe die Farbe des Quarks und gibt ihm seine Farbe als neue Quark-Farbe. Eine weitere Besonderheit ist, dass die Kraft mit dem Abstand der Quarks nicht ab-, sondern zunimmt, Quarks sind „in freier Wildbahn“ niemals frei, sondern stets aneinander gebunden (Quark-Confinement). Zieht man sie mit Gewalt auseinan-

der, so bilden sich aus den – nunmehr hochenergetischen – Gluonen neue Quarks (meist Quark-Antiquark-Paare), was bei hochenergetischen Stoßprozessen an Teilchenbeschleunigern zu beobachten ist.

Eine noch größere Herausforderung für Lehramtsstudierende für ihren künftigen Oberstufenunterricht ist die Schwache Wechselwirkung. Eine anziehende oder abstoßende Wirkung ist (noch?) nicht bekannt, aber die umwandelnde Wirkung. Dies sind u.a. die Beta-Prozesse. Diese sind fundamental wichtig für unsere Existenz als Menschen, da der erste Teilprozess der Kernfusion von 4 Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern in der Sonne ein solcher Beta-Prozess ist, der die gesamte Energiebereitstellung für unsere Erde bestimmt. Die Schwache Wechselwirkung hat – im Gegensatz zu den anderen Wechselwirkungen – keine Inversionsymmetrie: Prozesse können nicht „gespiegelt“ werden (C-P-Verletzung), die Austauschquanten (W und Z Teilchen) sind instabil und zerfallen rasch in unsymmetrische Teilchenpaare. Ihre enorme Masse war Anstoß zur Entwicklung der Higgs-Theorie.

Erhaltungsgrößen und Symmetrien sowie Vereinheitlichung und Grenzen der Physik runden die Veranstaltung ab. Hier überschneiden sich abermals diese Vorlesung und die Astrophysik. Aus der Homogenität des Kosmos’ in der Zeit folgt die Energieerhaltung, aus der Homogenität des Kosmos bzgl. des Ortes die Impulserhaltung, aus der Richtungshomogenität die Drehimpulserhaltung. Der Urknall wird als eine Heisenbergsche Fluktuation vor 13,8 Mrd. Jahren gedeutet. Ganz heranrechnen an den Urknallzeitpunkt können wir allerdings u.a. wegen der nicht gelungenen Quantisierung der Gravitation nicht, sondern nur bis an 10^{-43} s heran (Planck-Zeit). Diese Grenzen, wie sie z.B. auch in Abbildung 11 illustriert sind, werden angesichts im Sinne des Grundsatzes „Wo und wie sieht man die Grenzen der aktuellen physikalischen Beschreibungen?“ (Abbildung 10) explizit thematisiert.

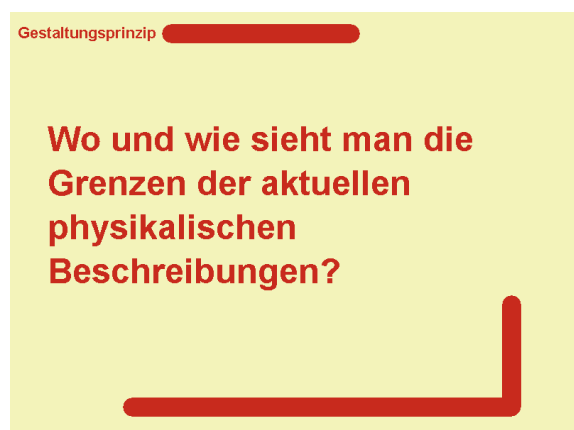


Abb. 10: Gestaltungsprinzip g

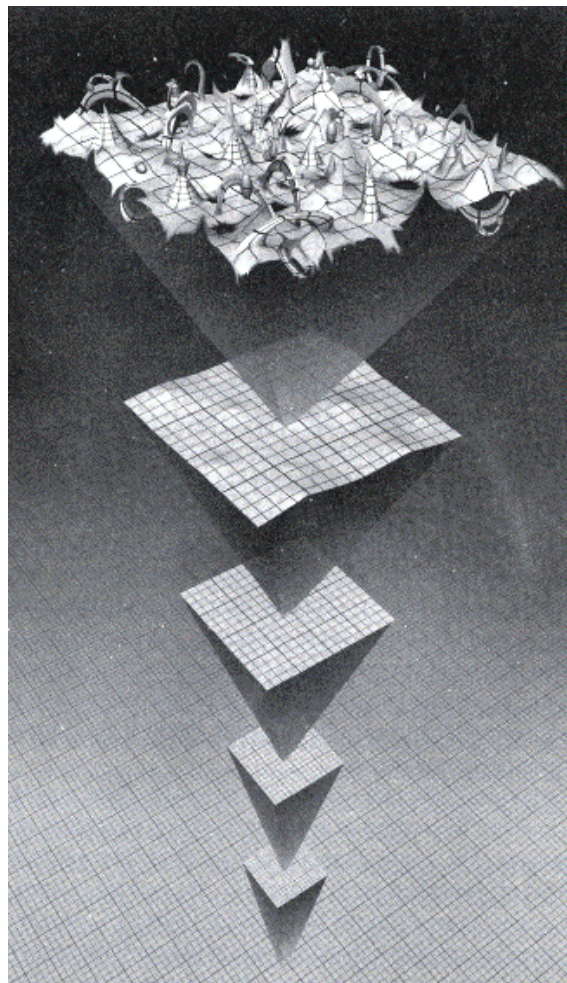


Abb. 11: Künstlerische Illustration der Quanten-Raumzeit. (Quelle: unification, spacetime foam, quantum vacuum, quantum fluctuations, <http://web.archive.org/web/20221105225045/http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec17.html> [14])

2.2. Einführung in die Astrophysik

Die Veranstaltung wendet sich an Studierende des Lehramts der Physik der Sekundarstufen. Sie entwickelt ein Bild des Universums mit den darin zu findenden Phänomenen und den physikalischen Prozessen und entwirft die derzeitigen Vorstellungen unseres modernen Weltbildes. Sie folgt damit u.a. den Empfehlungen der Kultusministerkonferenz der Länder zum Wissensstand der Schüler*innen am Abschluss der beiden Sekundarstufen der weiterführenden Schulen in Deutschland.

Es kann festgehalten werden, dass die Astronomie ein „Magnet“ für Schüler*innen allen Alters darstellt, sich für Naturwissenschaften zu interessieren, wobei astronomische Themen in gleicher Weise Jungen und Mädchen interessieren, was sich für viele andere Bereiche der Naturwissenschaften sehr unterschiedlich darstellt.[15]

Einführung in die Astrophysik

- .) „Zweck“ der Astronomie, Geschichte der Astronomie
- .) Orientierung: Koordinaten am Himmel, Zeitmessung
- .) Elektromagnet. Strahlung: Therm./nichttherm. Strahlung, Strahlungsentstehung, Strahlungsgesetze, Strahlungsmessung
- .) Geräte zur Strahlungsmessung (alle Spektralbereiche): Teleskope, Detektoren

- .) Planetenphysik, Kepler- und Newton-Gesetze, Planetenentstehung
- .) Physik der Sonne: Aufbau, Charakteristika, Kernprozesse und Sonnenevolution
- .) Physik der Sterne: Sterntypen, Sternentstehung und -entwicklung, Endstadien, Gravitationswellen
- .) Interstellare Materie
- .) Bau und Physik der Milchstraße
- .) Galaxien (reguläre Typen, Aktive Galaxien)

- .) Kosmologie: Expansion des Universums, 4-dim. Struktur, spez. u. allg. Relativitätstheorie (Feldgleichungen), Dunkle Materie und Dunkle Energie, Frühphasen des Universums, Spätphasen des Universums

- .) Verbindung zur Philosophie

Abb. 12: Übersicht über die behandelten Themen in der Astrophysik

Die Veranstaltung beginnt mit einem relativ umfangreichen astronomischen Einleitungsteil, der die Geschichte der Astronomie und ihre Beobachtungsmethoden und -geräte thematisiert. Nach dieser Einleitung folgt die eigentliche Astrophysik, die – neben einem vollständigen generellen Überblick – vier Schwerpunktbereiche, die für die Entwicklung eines modernen Weltbildes wesentlich bzw. unverzichtbar sind, thematisiert: Die Planetenphysik, die Physik der Sonne und der Sterne und die Kosmologie. Sie folgt dabei einem klassischen Aufbau von unserer unmittelbaren Umgebung bis hin zu den größten Strukturen im Kosmos.

2.2.1. Astronomische Einleitung

Das einleitende Kapitel trägt der Besonderheit der Astrophysik Rechnung, dass Experimente im Gegensatz zum Rest der Physik nicht möglich sind, sondern nur Beobachtungen. Dabei wird besonders heraus gearbeitet, wie ohne gezielte Experimente systematisch Erkenntnisse gebildet werden können, was zu einer besonderen Bedeutung der Orientierung und Kartierung am Himmel und der Instrumentierung führt.

In diesem einleitenden Kapitel wird zunächst der „Zweck“ der Astronomie betrachtet und ein Blick auf ihre Geschichte von den ersten (bekannten) Anfängen im Neolithikum bis hin zu modernsten Entwicklungen in jüngster Zeit geworfen. Sodann folgt ein Kapitel zur Orientierung in Ort (Koordinaten am Himmel) und Zeit (Zeitmessung, Kalender).

Bis in allerjüngster Zeit stand als Informationsquelle lediglich die elektromagnetische Strahlung zur Verfügung. Elektromagnetische Strahlung wird hier nun in aller Systematik behandelt: Thermische und nicht-thermische Strahlung und ihr jeweiliges Vorkommen im Kosmos, Strahlungs-Entstehungsprozesse, Strahlungsgesetze (einschließlich der Herleitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes) sowie Strahlungsmessung. Daran schließen sich nahtlos Geräte zur Strahlungsmessung für alle Teile des elektromagnetischen Spektrums vom Radiobereich bis zum Gam-

ma-Bereich an, zunächst Teleskope für alle Bereiche, dann Detektoren und Nachweismethoden.

2.2.2. Astrophysik im engeren Sinne

Nach diesen methodischen Betrachtungen zur astronomischen Forschung kommt nun der Einstieg in die physikalischen Phänomene und Prozesse. Hier wird der „klassische“ Weg vom Nahbereich bis zu den größten bekannten Entfernungen gewählt. Eingegliedert sind in alle Kapitel auch die Methoden der Entfernungsmessung, ein historisch gesehen oft recht mühsames Unterfangen mit etlichen Irrwegen und Fehleinschätzungen.

Am Beginn steht als erstes von 3 Schwerpunktt Themen die Planetenphysik, wobei die Erde eine besondere Stellung einnimmt (Übersicht über die Physik der Oberfläche und der Atmosphäre als unser Lebensraum). Es schließt sich eine Betrachtung der anderen 7 Planeten unseres Sonnensystems an. Die 8 Planeten gliedern sich in 2 verschiedene Gruppen, die erdähnlichen und die Jupiter-ähnlichen. Erstere sind – vergleichsweise kleine – Gesteinsplaneten in der Nähe der Sonne mit fester dünner Kruste und flüssigem Aufbau im Inneren. Von ihnen ist lediglich die Erde ohne erhebliche technische Hilfsmittel bewohnbar (dies wird im Detail diskutiert). Die jupiterähnlichen Planeten werden auch als Gasplaneten bezeichnet. Sie befinden sich im Außenbereich des Sonnensystems. Sie besitzen auch einen Gesteinskern, darüber aber riesige Hüllen aus Gas, das im Inneren flüssig wird, zum größten Teil aus Wasserstoff und Helium.

Auch die Kleinkörper im Sonnensystem werden behandelt: die Kleinplaneten und Kometen. Behandelt wird auch die Entstehung der Planeten und Kleinkörper, ebenso das, was über die mehr als 5000 entdeckten Exoplaneten, also Planeten bei anderen Sternen, bekannt ist – eine „Erde 2.0“ ist allerdings noch nicht entdeckt.

Logischerweise schließt sich als zweites Schwerpunktt Thema die Physik der Sonne an: Aufbau, Charakteristika, Kernprozesse (im Wesentlichen Fusion von Wasserstoff zu Helium) und Strahlungsleistung, sowie Sonnenevolution und Konsequenzen für die Erde.

Auf der nächst größeren astrophysikalischen Skala schließt sich das dritte Schwerpunktt Thema der Veranstaltung, die Physik der Sterne, an. Darunter fällt die Behandlung und Einordnung der verschiedenen Sterntypen und deren Zusammenhang mit Sternentstehung und Sternentwicklung Beide Phänomene werden ausführlich mit den damit zusammenhängenden physikalischen Vorgängen und Gesetzmäßigkeiten behandelt inklusive der Endstadien von Sternen: Weiße Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher. Da es sich hier um Entartete Materie handelt (s. Kernphysik), wird auch in dieser Veranstaltung die Quantenstatistik hergeleitet. Im Zusammenhang mit

den Endstadien findet auch die Gravitationswellen-Astronomie Erwähnung, ein in jüngster Zeit aufkommender Forschungszeit zur Detektion sehr hochenergetischer Prozesse wie der Verschmelzung von Neutronensternen und Schwarzen Löchern.

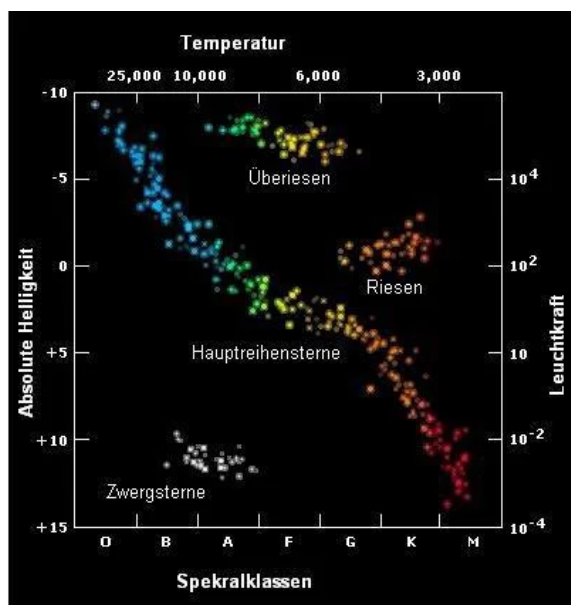


Abb. 13: Hertzsprung-Russell-Diagramm (Bild: Christoph Schneider In: Hornung, H. Stellare Klassengesellschaft. Max-Planck-Gesellschaft. <https://www.mpg.de/4628994/stellare-klassengesellschaft> [16])

Unsere Milchstraße, eine Scheiben-Galaxie (s.u.), enthält zu 80 – 90 % Sterne und 10 – 20 % Interstellare Materie, bestehend zu 99 % aus Gas und 1 % aus Staub, die größtenteils wolkenartig auftritt. Diese interstellaren Wolken sind die Orte von Sternentstehung, die auch heute noch auftritt. Prozesse der Heizung und Kühlung dieser Wolkenmaterie werden ausführlich erklärt, weil sie für die Sternentstehung, einen der Prozesse, die die Entwicklung des Universums maßgeblich bestimmen, von zentraler Bedeutung ist. Dabei wird heraus gearbeitet, wie universell diese Prozesse sind und wie wenige grundsätzlich verschiedene Varianten es letztlich bei Sternentstehung und -leben (Abbildung 13) und auch auf der nächst größeren Skala, den Galaxien gibt:

Ausgehend von Bau und Physik der Milchstraße werden Galaxien und ihre Entwicklung insgesamt behandelt. Die verschiedenen Typen von regulären Galaxien werden aufgezeigt (Scheibengalaxien, sehr häufig als Spiralgalaxien, elliptische Galaxien, irreguläre Galaxien – letztere treten häufig als Zwerggalaxien auf (mit jeweils erheblich geringerer Anzahl an Sternen als die großen Galaxien). Anschließend werden Aktive Galaxien behandelt, die häufig im Zentrum ein aktives Objekt besitzen, meist wohl in Form eines supermassiven Schwarzen Lochs, das intensiv mit seiner Umgebung wechselwirkt – es sei bemerkt, dass im Zentrum unserer

Milchstraße ebenfalls ein Schwarzes Loch sitzt, das gegenwärtig inaktiv zu sein scheint.

In diesem Kapitel wird auch die Dunkle Materie thematisiert, die 6-mal häufiger ist als „normale“ Materie, die sich durch Strahlung manifestiert. Woraus diese Dunkle Materie besteht, ist noch völlig unklar. Es kann keine baryonische Materie sein (die sich eben durch elektromagnetische Strahlung „verraten würde“), ihre Teilchen haben lediglich einen Arbeitsnamen: WIMP's (Weakly Interacting Massive Particles).

Zwar zeigen jüngste Ergebnisse, dass die Phänomene im Universum deutlich diverser sind und die Entwicklung des Universums auf den verschiedenen Skalen stärker miteinander zusammen hängt, als noch vor wenigen Jahren gedacht. Dennoch ist die Idee, die Natur und ihre Entwicklung auf verschiedenen Skalen zu betrachten und dort auf jeweils wenige Grundphänomene reduzieren zu können, nach wie vor valide und ein Umgang mit Komplexität, der für die Physik spezifisch ist und zu sehr weitreichenden Einsichten verhilft. Deshalb wird diese Idee explizit gemäß der Grundidee „Spezifische Denkweisen und -strategien explizit machen“ (Abbildung 14) herausgearbeitet.

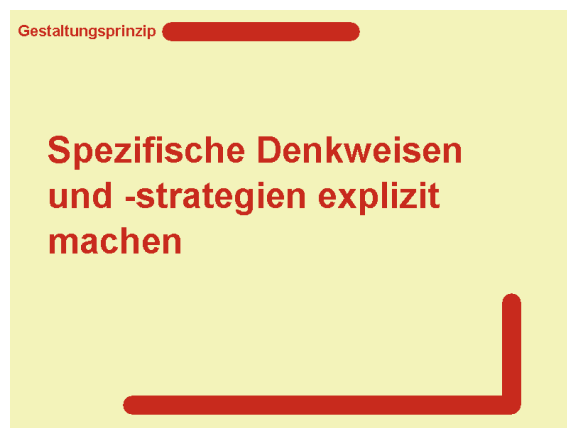


Abb. 14: Gestaltungsprinzip h

Im 4. Schwerpunktthema wird nun ausführlich die Kosmologie behandelt. Darunter fällt zunächst die Expansion des Kosmos', die zeitlich betrachtet nicht gleichmäßig voranschreitet. Sodann wird die 4-dimensionale Struktur des Kosmos' über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie eingeführt (Feldgleichungen). Im isotropen Raum reduzieren sie sich zu zwei Gleichungen, die analog zur klassischen Bewegungs- und Energiegleichung sind, und sich so leicht in Ähnlichkeiten und Unterschieden plausibel machen lassen. Auch hier spielt die Dunkle Materie eine wichtige Rolle bei der großräumigen Verteilung von Galaxien und Galaxienhaufen, die man heute in großen Modellierungsrechnungen gut reproduzieren kann. Zusätzlich tritt noch die Dunkle Energie hinzu, die ca. 70 % des Energieinhalts des

Kosmos ausmacht und über die man bisher noch überhaupt nichts weiß.

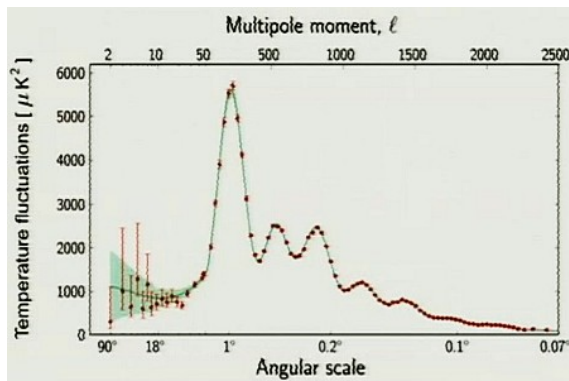


Abb. 15: Fluktuationen der Kosmischen Hintergrundstrahlung: links Sachsse-Wolfe-Effekt, Hauptpeak: Akustische Schwingungen im frühen Universum, rechts: Silk-Dämpfung. (Quelle: Fischer, D. (2013) Planck bestätigt die Standardkosmologie – aber... Auf: Skyweek Zwei Punkt Null <https://skyweek.wordpress.com/2013/03/21/planck-bestaetigt-die-standardkosmologie-aber/> [17])

Die Herausbildung von Struktur im Kosmos kann durch Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (Abbildung 15) bei 2,7 K und Vergleiche mit Modellen bestimmt werden, wobei die abgeleiteten Parameter recht genau verifiziert werden können. Sodann wird die Frühphase des Kosmos 10^{-43} s nach dem Einsetzen des Urknalls – früher geht nach dem oben Erwähnten ja nicht, weil die Quantisierung der Gravitation nach wie vor nicht gelungen ist – sowie die Spätphase des Kosmos nach unserem heutigen Wissensstand vorgestellt. Hier erfahren wir die Grenzen der heutigen Physik, was für Schüler*innen der Oberstufe ebenso spannend wie wichtig ist – Alle Physiker*innen und auch alle Physiklehrer*innen stoßen im wahrsten Sinn des Wortes an ihre Grenzen!

Den Abschluss der Veranstaltung bilden einige Bemerkungen zum Erkenntnisprozess und zur Philosophie.

3. Zugänge

Die beschriebenen Veranstaltungen sind nicht in der heutigen Form ad hoc konzipiert, sondern über die Jahre immer weiter entwickelt worden. In diesem Abschnitt wird noch einmal zusammen gefasst, welche Spezifika dabei heraus kristallisiert wurden.

3.1. Was ist der spezifische Blick auf die Themenfelder?

- Teilchenphysik mit dem Standardmodell der Elementarteilchen – das noch etliche Lücken und Baustellen aufweist – ist wissenschaftliche Grundlegung des atomistischen Weltbildes. Dazu gehört auch das gegenwärtige und bislang noch

mit großen „Lücken“ versehene Verständnis der 4 Grundkräfte im Kosmos.

- Astronomie ist „weit weg“? Nein, sie bestimmt und beschreibt unseren Lebensraum, z. B. die Bewohnbarkeit unseres Planeten (und auch aller Exoplaneten), und Sterne (inklusive der Sonne) sind das wichtigste Strukturmerkmal des Kosmos' für unser Leben! Die Physik der Sterne gilt es möglichst tiefgreifend zu verstehen. Viele Objekte und Phänomene sind direkt beobachtbar, und sie müssen hinreichend systematisiert werden. Und die Frage nach dem Woher und Wohin ist eine der Kernfragen menschlichen Forschens, sie zieht sich durch alle Kulturen und alle Zeiten.

3.2. Prinzipien des Veranstaltungsaufbaus

- Es gilt, mit Phänomenen und Messergebnissen zu arbeiten, an denen man die verschiedensten Dinge diskutieren und immer wieder darauf zurück kommen kann. Auf der Basis gewonnener Ergebnisse gilt es, sich an Unbekanntes „heranzupirschen“. Dies spiegelt einerseits den Erkenntnisprozess in der Forschung wieder, bei dem es nicht nur bei Irrwegen immer wieder notwendig ist, zum Ausgangspunkt zurück zu kehren, sondern ermöglicht Schüler*innen bzw. Studierenden auch immer wieder neu Anschluss an das Lerngeschehen zu finden.
- Physik lebt auch von der „großen Erzählung“, die immer wieder zu elementaren zentralen Phänomenen zurückkehrt. Dabei kann und soll man Vergleiche zwischen verschiedenen Gebieten der Physik herstellen: Was ist gleich, ähnlich oder verschieden?
- Die Kunst der Physik ist die Kunst der Näherung. Modelle sind letztendlich immer „falsch“, weil sie von Vereinfachungen durchsetzt sind, ohne die Theorien im Chaos enden und Verstehen verdecken.
- Spezifische Denkweisen und -strategien explizit machen
- Spannend wird es, wo sich Verstandenes und offene wissenschaftliche Fragen treffen. Wo sieht man die Grenzen der aktuellen Beschreibungen?
- Woher kommen die Erkenntnisse über direkt nicht zugängliche Phänomene (wie z.B. Entstehung und Entwicklung unseres Kosmos)? Wo und wie sieht man die Grenzen der aktuellen physikalischen Beschreibungen, die es in den Blick zu nehmen gilt (z.B. vom „Teilchenzoo“ bis ca. 1973 zum Standardmodell der Elementarteilchen).
- Zuletzt gilt es, nicht mehr nur zu staunen, sondern zu versuchen, selbst zu verstehen.

4. Bedeutung für den Schulunterricht

Viele der in den Veranstaltungen behandelten Themen sind Bestandteil des aktuellen Schulcurriculums. So behandeln die Veranstaltungen nahezu alle der 25 Schlüsselexperimente im Grundkurs Physik der Oberstufe in NRW. Insbesondere Themen, die sowohl Aspekte aus der Astronomie und der Atomphysik behandeln, wie z.B. die Untersuchung von Sternspektren sind für die Schüler*innen äußerst attraktiv. In den meisten Physikgrundkursen der Qualifikationsphase an der Gesamtschule Holweide in den letzten fünf Jahren erarbeiteten sich die Schüler*innen im Rahmen des Unterrichtsvorhabens Erforschung des Mikro- und Makrokosmos im Kernlehrplan vorgesehene Kompetenzen, indem sie sich mit den Funktionsprinzipien verschiedener Weltraumteleskope und der Entstehung der detektierten Strahlung sowie mit den Objekten, die diese Strahlung emittieren, beschäftigten. Ihre Ergebnisse präsentierten sie in Form von Wandzeitungen. Die Unterrichtseinheit zeichnete sich stets durch eine hohe Beteiligung aus und erfuhr eine positive Rückmeldung von Seite der Schüler*innen. Auch in der Mittelstufe können die Inhalte der Veranstaltung als Unterrichtsinhalte dienen. So erscheint eine Implementierung der Inhalte der Vorlesung in didaktisch reduzierter Form in Inhaltsgebieten des Naturwissenschaftsunterrichts, wie z.B. den Gebieten „Lebensbedingungen auf der Erde“ (in Jahrgangsstufe 7) oder „Entstehung und Entwicklung der Erde“ (in Jahrgangsstufe 8) empfehlenswert. Themen, die über die im Curriculum vorgesehenen hinausgehen, finden im Unterricht dennoch Anwendung. Und einige Themen können im Rahmen von Facharbeiten von den Schüler*innen erarbeitet werden. Die Auswahl der Themen für Facharbeiten der Schüler*innen im Fach Physik an der Gesamtschule Holweide in den letzten fünf Jahren spiegelt dies deutlich wieder. Zwar wurden auch klassische Facharbeitsthemen wie z.B. der Magnuseffekt behandelt, die meisten Facharbeiten widmeten sich jedoch Themen aus den Bereichen Astrophysik, Atomphysik und Quantenmechanik. Beispiele für Facharbeitsthemen sind das Borexino-Experiment, Quantenverschränkung, die Rolle von Dunkler Energie und Materie in aktuellen kosmologischen Modellen, eine Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte von Kernfusion oder die Detektion von extrasolaren Planeten. Diese Themen üben auf Schüler*innen eine enorme Faszination aus. Vor allem Themen aus dem Bereich der Astronomie begeistern Schüler*innen und insbesondere Schülerinnen aller Jahrgangsstufen.

Um die hier vorgestellten Veranstaltungen zur modernen Physik in den Schulunterricht der Oberstufe zu integrieren, muss der Stoff geeignet didaktisch reduziert werden. Dazu enthalten die Veranstaltungen an vielen Stellen Hinweise, die an fachdidaktische Veranstaltungen anknüpfen und die natürlich in den

Veranstaltungen für den Master of Science komplett fehlen. Außerdem ist es für das Lehramt ein großer Vorteil, dass die Veranstaltungen einsemestrig stattfinden – die Lehramtsstudierenden müssen ja noch ein zweites Fach und Bildungswissenschaften studieren.

Die Unterrichtspraxis zeigt, dass die späteren Lehrenden in die Lage versetzt werden, ein ausgewogenes Verhältnis von Anschaulichkeit und quantitativer Beschreibung zu erzielen, was bewirkt, dass diese Veranstaltungen denen für den Master of Science weit voraus sind. Ferner werden die Studierenden dazu angehalten, an aktuelle Berichte aus den Medien anzuknüpfen.

Der Einklang mit den Vorgaben der KMK ist bereits betont worden.

Ein wesentliches Merkmal für den Unterricht ist es, dass Lehrende den Lernenden aufzeigen, welche riesigen Lücken im Verständnis unserer Welt bestehen und Lehrende keineswegs „allwissend“ sind, sondern die Lernenden als „Coach“ an die Hand nehmen, das bestehende Wissen Schüler*innen-gerecht zu vermitteln und die Wissensdefizite klar aufzuzeigen.

Da etliche der behandelten Themen in den beiden Veranstaltungen überlappen, sind sie sehr gut in Astronomie-Arbeitsgemeinschaften an den Schulen behandelbar. Eine solche Astro-AG befindet sich gerade in der Gesamtschule Köln Holweide durch die Autoren im Aufbau. Ein Beispiel für ein Projekt des ISA-Kurses Astronomie in der neunten Klasse ist das Erstellen eines Stop-Motion-Films zur Lebensgeschichte der Sonne. Das Thema eignete sich in diesem Kurs gut zur Binnendifferenzierung für eine recht heterogene Gruppe. Während sich alle Schüler*innen an der Erstellung eines Lernprodukts gemeinsam beteiligten und alle das Gleichgewicht von Gas- und Gravitationsdruck nachvollziehen und erklären konnten, erarbeitete sich eine Schülerin durch Lernmaterial angeleitet den Prozess der Kernfusion in der Sonne unter Berücksichtigung von Massendefekt und Kernbindungsenergie.

Um als Lehrende in die Lage versetzt zu werden, den Stoff didaktisch aufbereiten zu können, ohne dass sich Fehlvorstellungen bilden, ist eine entsprechende Ausbildung an der Universität nötig.

5. Fazit

Wir haben hier deutlich gemacht, dass Veranstaltungen speziell für das Lehramtsstudium der Physik für ein Lehramt „sui generis“ sinnvoll wenn nicht gar dringend erforderlich sind. Im Rahmen von einer Studienreform, von deren Notwendigkeit an vielen Stellen in der Literatur die Rede ist (aber bisher wenig Taten zur Folge hatte), sollten diese Gedanken konsequent umgesetzt werden.

Allerdings: Ein Blick auf die im Abschnitt 3 herausgearbeiteten Zugänge und Gestaltungsprinzipien der Vorlesungen lässt die Frage aufkommen, ob diese nicht eigentlich auch für nicht-Lehramts-Veranstaltungen sinnvoll sind. Das Lehramtsstudium sollte ganz sicher kein Anhängsel des rein fachwissenschaftlichen Studiums sein, aber vielleicht kann ja das rein fachwissenschaftliche Studium als Lehramtsstudium+ gedacht werden?

6. Literatur

- [1] Deutsche Physikalische Gesellschaft (2006), Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V. Bad Honnef
- [2] Woitzik, A., Mecke, K., Düchs, G. (2023) Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V. Bad Honnef
- [3] Woitzik, A., Mecke, K., Düchs, G. (2023) Aufbruch zu Verbesserungen. Physik Journal 22, Nr. 7
- [4] Meyer, L (2023) Leserbrief zu [3]. Leserbrief in Physik Journal 23, Nr. 8
- [5] Merzyn, G. (2023) Leserbrief zu [3]. Leserbrief in Physik Journal 23, Nr. 8
- [6] Heinicke, S., Kulgemeyer, C., Krabbe, H., Klein, P., Korneck, F., Zügge, T., Feser, M. (2023), Das „perfekte“ Lehramtsstudium. Physik Journal 22, Nr. 12
- [7] Finkelstein, Noah (2023), Educational Transformation at a Critical Time: The essential roles and promise of physicists. Plenarvortrag auf der DPG-Frühjahrstagung in Hannover 2023
- [8] Henderson, H., Beach, A., Finkelstein, N. (2011) Facilitating change in undergraduate STEM instructional practices: An analytic review of the literature. Journal of research in science teaching 2011/10, S. 952-984
- [9] Gloe, M., Oeftering, T. (2020) Didaktik der politischen Bildung. Ein Überblick über Ziele und Grundlagen inklusiver politischer Bildung. In: Externer Link: Meyer, D./Hilpert, W./Lindmeier, B. (Hrsg.): Grundlagen und Praxis inklusiver politischer Bildung. Bonn, S. 87 - 132.
- [10] Grotz, B. (2011-2022) Radioaktivität. <https://www.grund-wissen.de/physik/atomphysik/radioaktivitaet.html> abgerufen am 31.5.2024
- [11] Kattmann, Ulrich. (2005). Lernen mit anthropomorphen Vorstellungen? – Ergebnisse von Untersuchungen zur Didaktischen Rekonstruktion in der Biologie. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften. 11. 165–174.
- [12] Schmitt, R. (2011) Metaphern für Lernen und Lehren: Drei Annäherungen. In: Forum Qualitative Sozialforschung 12/2011 <https://www.qualitative-research.net/index.php/fqs/article/download/1726/3223?inline=1> abgerufen am 31.5.2024
- [13] Demtröder, W. (2014). Kernkräfte und Kernmodelle. In: Experimentalphysik 4. Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21476-9_5
- [14] unification, spacetime foam, quantum vacuum, quantum fluctuations, <http://web.archive.org/web/20221105225045/http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec17.html> abgerufen am: 11.9.2024
- [15] Elster, D. (2007). Zum Interesse Jugendlicher an naturwissenschaftlichen Inhalten und Kontexten.
- [16] Hornung, H. Stellare Klassengesellschaft. Max-Planck-Gesellschaft. <https://www.mpg.de/4628994/stellare-klassengesellschaft> abgerufen am 31.5.2024
- [17] Fischer, D. (2013) Planck bestätigt die Standardkosmologie – aber... Auf: Skyweek Zwei Punkt Null <https://skyweek.wordpress.com/2013/03/21/planck-bestatigt-die-standardkosmologie-aber/> abgerufen 31.5.2024