

Dunkle Materie
Lehr-Lern-Module für den Einsatz in der
gymnasialen Oberstufe

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Philosophie

vorgelegt von

Philipp Krumm

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität Siegen

Siegen 2021

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

Betreuer und erster Gutachter

Prof. Dr. Oliver Schwarz

Universität Siegen

Zweiter Gutachter

Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze

Universität Jena

Tag der mündlichen Prüfung

7. April 2022

Für meine Eltern.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract	3
1 Einleitung und Motivation	5
1.1 Vorbemerkungen	5
1.2 Hauptziel und Aufbau der Arbeit	8
2 Wissenschaftliche Fragestellungen	9
3 Erhebungen	12
3.1 Analyse ausgewählter Lehrbuch- und Lehrplanliteratur	12
3.1.1 Auswahl der Lehrbücher und Lehrpläne	12
3.1.2 Die verwendete Methode der qualitativen Inhaltsanalyse	16
3.1.2.1 Bestimmung der Analyseeinheiten	19
3.1.2.2 Festlegung der Strukturdimension und Zusammenstel-	
lung der Kategorien	20
3.1.2.3 Formulierung von Ankerbeispielen und Kodierregeln zu	
den einzelnen Kategorien	22
3.1.2.4 Materialdurchlauf	23
3.1.2.5 Überarbeitung und Revision von Kategoriensystem und	
Kategoriendefinition	28
3.1.2.6 Ergebnisaufbereitung	28
3.1.3 Ergebnisse der Analyse	31
3.2 Befragungen	33

3.2.1	Stichprobenbefragung von Schülerinnen und Schülern	34
3.2.2	Stichprobenbefragung von Lehrkräften	40
3.3	Schlussfolgerungen	42
4	Fachdidaktische und methodische Einführung	44
4.1	Astronomie und die Frage nach ihrer Relevanz in Schule und Gesellschaft	44
4.2	Elementarisierungen	51
4.3	(Analogie-)Experimente	54
4.3.1	Die Bedeutung des Experiments in der Physik	55
4.3.2	Konzeption von Analogieexperimenten	60
4.3.3	Digitale Messwerterfassung und Datenanalyse	61
4.4	Beobachtung, Simulation und Analogieexperiment	67
4.5	Konstruktion von Lehr-Lern-Modulen	69
5	Modul 1: Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik	72
5.1	Lernziel dieses Moduls	72
5.2	Rotationskurven von Spiralgalaxien	74
5.2.1	Fachliche Grundlagen	74
5.2.1.1	Theoretische Erwartung und experimentelle Beobachtung	74
5.2.1.2	Prinzipielles Vorgehen bei der Aufnahme einer Rotationskurve	77
5.2.2	Historische Entwicklung	81
5.2.3	Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion .	87
5.2.4	Analogieexperiment zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie	89
5.2.4.1	Experimenteller Aufbau, Kalibrierung und Durchführung	89
5.2.4.2	Analyse	95
5.2.4.3	Resultate und Bewertung	103
5.2.5	Vertiefende Aufgaben für den Unterricht	105
5.3	Gravitationslinseneffekt	109

Inhaltsverzeichnis

5.3.1	Fachliche Grundlagen	109
5.3.1.1	Das Prinzip der Lichtablenkung durch Gravitation	109
5.3.1.2	Ablenkungswinkel	112
5.3.1.3	Massenabschätzung durch die Beobachtungswinkel für Arcs und EINSTEIN-Ringe	114
5.3.1.4	Verallgemeinerung auf dreidimensionale Massenverteilungen und Folgerungen für den starken und schwachen Gravitationslinseneffekt	117
5.3.2	Historische Entwicklung	121
5.3.3	Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion	125
5.3.4	Analogieexperimente und Simulationen zum Gravitationslinseneffekt	127
5.3.4.1	Analogieexperiment zur Veranschaulichung von Verzerrungseffekten aufgrund inhomogener Massendichte	127
5.3.4.2	Simulation einer Gravitationslinse durch eine Glaslinse	129
5.3.4.3	Analogieexperiment zur Veranschaulichung eines EINSTEIN-Rings	135
5.3.5	Vertiefende Aufgaben für den Unterricht	138
5.4	Erprobung	145
5.4.1	Vorgehensweise	145
5.4.2	Ergebnisse und Auswertung	146
5.5	Fazit	157
6	Modul 2: Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie	159
6.1	Lernziel dieses Moduls	159
6.2	Entwicklungen im frühen Universum	161
6.2.1	Fachliche Grundlagen	161
6.2.1.1	Vorgänge während der primordialen Nukleosynthese	163
6.2.1.2	Abschätzungen zu Elementhäufigkeiten	168

6.2.1.3	Vergleich mit Beobachtungsdaten und Konsequenzen für den Anteil Dunkler Materie im Universum	171
6.2.2	Historische Entwicklung	179
6.2.3	Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion .	182
6.2.4	Simulation zur Abschätzung des Anteils nicht-baryonischer Dunk- ler Materie an der Gesamtmaterie	183
6.2.5	Vertiefende Aufgaben für den Unterricht	187
6.3	Erkenntnisse aus der kosmischen Hintergrundstrahlung	193
6.3.1	Fachliche Grundlagen	193
6.3.1.1	Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung	193
6.3.1.2	Spektrum und Temperatur der kosmischen Hintergr- undstrahlung	194
6.3.1.3	Anisotropien in der kosmischen Hintergrundstrahlung . .	195
6.3.2	Historische Entwicklung	201
6.3.3	Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion .	202
6.3.4	Analogieexperimente zur Entkopplungsphase und Temperaturver- teilung der kosmischen Hintergrundstrahlung	204
6.3.4.1	Analogieexperiment zur Veranschaulichung des Entkopp- lungsvorgangs	204
6.3.4.2	Analogieexperiment zur Temperaturverteilung der kos- mischen Hintergrundstrahlung	205
6.3.5	Vertiefende Aufgaben für den Unterricht	208
6.4	Erprobung	215
6.4.1	Vorgehensweise	215
6.4.2	Ergebnisse und Auswertung	215
6.5	Fazit	224
 7 Modul 3: Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie		 226

Inhaltsverzeichnis

7.1	Lernziel dieses Moduls	227
7.2	Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit Dunkler Materie	228
7.2.1	Fachliche Grundlagen	228
7.2.1.1	Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik	229
7.2.1.2	Baryonische Dunkle Materie	230
7.2.1.3	Nicht-Baryonische Dunkle Materie	232
7.2.2	Historische Entwicklung	234
7.2.3	Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion .	237
7.2.4	Anschauungsexperiment und Strukturdiagramm	240
7.2.4.1	Analogieexperiment zur Veranschaulichung der weitläu- figen Verteilung heißer Dunkler Materie	240
7.2.4.2	Strukturdiagramm zur Einordnung der verschiedenen Kan- didaten für Dunkle Materie	242
7.2.5	Vertiefende Aufgaben für den Unterricht	244
7.3	Kritik an der Dunklen Materie und alternative Erklärungsansätze	247
7.3.1	Fachliche Grundlagen	247
7.3.1.1	Modifizierte NEWTON'sche Dynamik	247
7.3.1.2	Weitere Modifikationsmöglichkeiten	250
7.3.1.3	Resultate und kritische Analyse	252
7.3.2	Historische Entwicklung	253
7.3.3	Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion .	254
7.3.4	Vertiefende Aufgaben für den Unterricht	255
7.4	Erprobung	259
7.4.1	Vorgehensweise	259
7.4.2	Ergebnisse und Auswertung	259
7.5	Fazit	264
8	Schlussbetrachtung und Ausblick	265
8.1	Ergebnisse dieser Arbeit unter Rückgriff auf die Fragestellungen	265

8.2 Ausblick	270
Verwendete Abkürzungen und Symbole	271
Verzeichnis historisch relevanter Persönlichkeiten	274
Literaturverzeichnis	278
Abbildungsverzeichnis	301
Tabellenverzeichnis	303
A Erhebungen zum Thema „Dunkle Materie“ für den Schulunterricht aus Sicht der Lernenden und Lehrenden	304
A.1 Fragebogen für Schülerinnen und Schüler	304
A.2 Interview mit Schülerinnen und Schülern	308
A.3 Interview mit Lehrkräften	314
B Anleitung und Auswertung des Analogieexperiments zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie (Modul 1)	320
B.1 Anleitung zur Durchführung des Experiments	320
B.2 Automatisierte Auswertung mit Root	323
B.2.1 Bedienung der Auswertungssoftware	323
B.2.2 Programmcode	325
C Computer-Simulationen	332
C.1 Simulation zum Aussehen einer als Gravitationslinse wirkenden Glaslinse (Modul 1)	333
C.2 Simulation zur Abschätzung des Anteils Dunkler Materie an der Gesamt- materie des Universums (Modul 2)	334
D Test-Fragen und Aufgaben zur Auswertung der Module nach erfolgter Erprobung im Schulunterricht	335

Inhaltsverzeichnis

D.1 Modul 1	335
D.2 Modul 2	338
D.3 Modul 3	340
Danksagung	343
Eidesstattliche Erklärung	345

Kurzfassung

„Was wir wissen ist ein Tropfen, was wir nicht wissen ist ein Ozean.“

Isaac Newton

Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik und der Kosmologie lassen darauf schließen, dass die uns bekannte Materie lediglich knapp 5% der gesamten Massendichte des Universums ausmacht. Die restlichen 95% sind bis heute nicht verstanden und legitimieren gleichermaßen die enormen Mühen, welche die moderne astronomische Forschung unternimmt, um diesen hohen Anteil an unbekannter Masse zu untersuchen. Ein beträchtlicher Teil scheint aus für uns nicht-sichtbarer Materie zu bestehen. Die Befunde zu dieser Dunklen Materie sind vielfältig und bieten damit ein großes didaktisches Potential. Dennoch wird in Schulen und auch in der Fachlehrerausbildung an Hochschulen häufig nur die Physik vermittelt, welche sich mit der bekannten, sichtbaren und überwiegend baryonischen Masse im Universum beschäftigt. Es sollte und muss ein klares Ziel des Physikunterrichts und des Physikstudiums für angehende Lehrkräfte sein, die bisherigen Erkenntnisse zur Hellen und zur Dunklen Materie zu vermitteln.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Wege und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie das Themengebiet der Dunklen Materie für Schülerinnen und Schüler sachgerecht aufbereitet werden kann. Dazu wird zunächst analysiert, inwieweit die Dunkle Materie in aktuellen Schulbüchern und ausgewählten Lehrplänen vertreten ist. Das Kapitel „Erhebungen“ schließt ebenfalls Befragungen von Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften ein, in welchen das Interesse und die fachlichen Kenntnisse bezogen auf die Dunkle Materie stichprobenhaft evaluiert werden. Aus den daraus gezogenen Kenntnissen werden anschließend drei Module entwickelt, die die Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik (Modul 1), aus der Kosmologie (Modul 2) sowie die offenen Fragen und das

sich daraus ergebende Diskussionspotential (Modul 3) thematisieren. Im Rahmen dieser Module werden durch Analogieexperimente mit einem vom Lernenden real vorzunehmenden Versuchsteil mit entsprechender Analysesoftware sowie durch Analogieexperimente, bei denen der Beobachtungsanteil besonders hoch ist, die fachlichen Grundlagen für Schülerinnen und Schüler in didaktisch reduzierter Weise zugänglich gemacht. Ergänzt wird dies durch mathematische Elementarisierungen und Simulationen. Die vorliegende Arbeit bietet außerdem Begleitmaterial in Form von vertiefenden Aufgaben für die Umsetzung im Unterricht, sodass vollwertige Lehr-Lern-Konzepte für unterrichtende und zukünftig unterrichtende Lehrkräfte in dieser Promotionsschrift bereitgestellt werden können. Der Verfasser hat diese Konzepte bereits im Unterricht eingesetzt, sodass zu den einzelnen Modulen auch eine Evaluation der unterrichtlichen Erprobung erfolgt.

Abstract

„What we know is a drop, what we don't know is an ocean.“

Isaac Newton

Observations and findings from gravitational physics and cosmology lead us to the assumption that the matter known to us only makes up just 5% of the total matter of the universe. The remaining 95% are still not understood and legitimize because of that reason the enormous effort of modern astronomical research in order to study this high proportion of unknown matter. A considerable part seems to consist of matter that is invisible to us. The findings on this dark matter are diverse and therefore offer great didactic potential. Nevertheless, only the physics that deals with the known, visible and largely baryonic masses in universe is often taught in schools and also in the teacher trainings at universities. It should and must be a clear aim of physics teaching and physics studies for prospective teachers to convey the previous knowledge about light and dark matter.

The aim of the present work is to show ways and possibilities how the subject matter of dark matter can be properly prepared for pupils. First, it is analyzed how strongly dark matter is represented in current school books and selected curricula. This chapter also includes surveys of pupils and teachers, in which the interest and knowledge related to dark matter are randomly evaluated. Based on the results gained from this, three modules are developed that treat the observations and findings from gravitational physics (module 1), from cosmology (module 2) as well as the open questions and the resulting potential for critical discussions (module 3). In this context, the foundations are made accessible to pupils in a didactically reduced manner by means of analogy experiments,

mathematical elementalizations and simulations. The analogy experiments are either real experiments with corresponding evaluation by developed software or experiments in which the observation portion is particularly high.

The present work also offers exercises and additional material for implementation in the lessons. All in all full teaching-learning concepts for teachers and future teachers can be provided in this doctoral thesis. The author has already used these concepts in the classroom so that the individual modules are also evaluated in the course of teaching trials.

KAPITEL 1

Einleitung und Motivation

1.1 Vorbemerkungen

Bereits seit Jahrzehntausenden schauen Menschen in den Himmel und versuchen durch ihre Beobachtungen Antworten auf Fragen in ihrem Leben zu finden, Phänomene in der Natur zu erklären und Ereignisse in der Zukunft vorherzusagen. Das Universum übt eine große Faszination auf uns Menschen aus und diese Faszination ist heute kaum geringer als in unserer Frühgeschichte. Der Blick zum Himmel ist dabei nicht nur faszinierend, sondern befähigt uns Menschen durch gezielte Beobachtungen ein gewisses Verständnis von unserer Welt und unserem Universum aufzubauen. Dieses Verständnis versucht man seit dem Aufkommen der Naturwissenschaften in der Antike weiter zu entwickeln, woraus sich als erste Teildisziplin die Astronomie entwickelte. Im Gefolge der Neuzeit entstanden dann die uns heute bekannten Teildisziplinen wie die Physik, die Chemie, die Biologie oder auch die Geologie. Dabei waren und sind die Übergänge zum Teil fließend. So war die Erforschung unseres Universums über Jahrtausende hinweg zentrales Aufgabengebiet der Astronomie doch mit dem Voranschreiten der physikalisch-gedanklichen und der gerätetechnischen Entwicklung wurden nach und nach physikalische Forschungstechniken in die Astronomie aufgenommen, sodass im 19. Jahrhundert mit der Astrophysik ein neues Teilgebiet der Physik entstand.

Wie überhaupt bei allen Naturwissenschaften können wir auch in der Himmelskunde einen überraschenden Befund feststellen: Eigentlich sollten aus naheliegenden Gründen praktische lebensweltliche Erkenntnisse im Vordergrund der Forschungsbemühungen stehen. Doch beim näheren Hinsehen erweisen sich die dahinter liegenden Forschungsziele auch als Geflecht weltanschaulicher, erkenntnistheoretischer und übergeordneter philoso-

phischer Motive. Der Mensch will neben allen materiellen Vorzügen eben auch erkennen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“ [1]. Bekanntermaßen ist dieser intrinsische Wunsch des Menschen auch in großen literarischen Werken, wie Goethes *Faust* zum Ausdruck gebracht worden. Um den Bogen zurück zur Astronomie zu spannen, bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass sie von der Antike bis zur Neuzeit immer ein kompositorisches Gebilde aus praxisrelevanten Erkenntnissen, wie Ortsbestimmung oder Zeit- und Kalenderrechnung und den verschiedenen gedanklichen Konzepten zur Erschaffung eines konsistenten Weltbildes war. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf den bekannten Holzstich *Ein Wanderer am Weltenrand* verwiesen, siehe Abbildung 1.1, welcher eben diese Suche nach einem konsistenten Weltbild eindrucksvoll verdeutlicht.

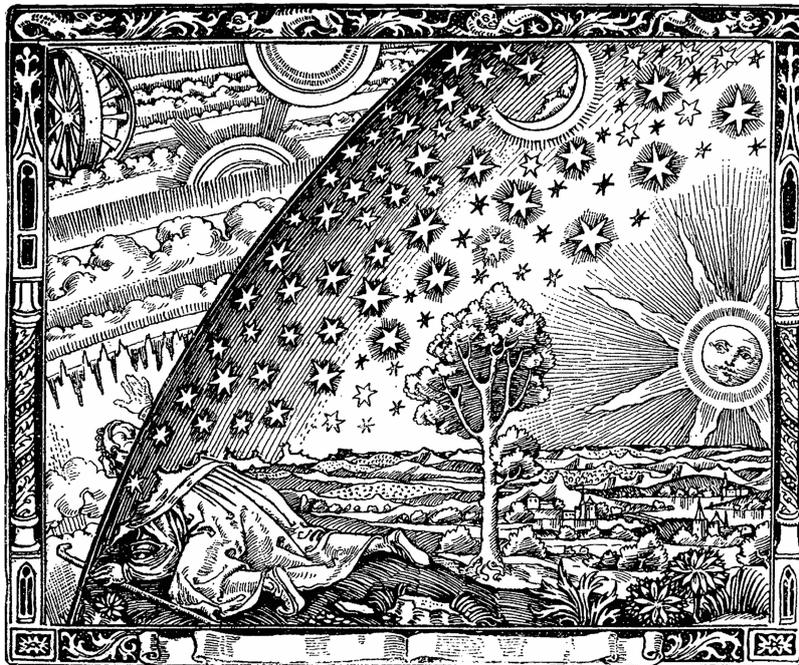


Abbildung 1.1: Holzstich: *Ein Wanderer am Weltenrand*. Symbolhaft wird der intrinsische Wunsch des Menschen nach einem konsistenten und erklärenden Weltbild dargestellt. [2]

Allenfalls für Außenstehende ist überraschend, dass es vielfältige Wechselbeziehungen zwischen beiden Sphären der Forschung gibt. Dass diese Wechselbeziehungen schon seit Jahrhunderten bestehen, sei hier nur exemplarisch an den Forschungsreisen von James

Cook im 18. Jahrhundert gezeigt. Sie waren ursprünglich dadurch motiviert, den Venusdurchgang vor der Sonne zu beobachten, um so den Zahlenwert der Astronomischen Einheit zu bestimmen und dadurch endlich einen Größenmaßstab in die kosmischen Dimensionen unseres Planetensystems einzuführen [vgl. z. B. 3]. Die während der Reise durchgeführten geografisch-geodätischen Vermessungen und sonstigen Entdeckungen führten zu neuen kartografischen Erkenntnissen und haben das damals vorherrschende Bild unseres Heimatplaneten maßgeblich beeinflusst.

In einer fortschrittlichen Didaktik sollten immer beide Aspekte des wissenschaftlichen Strebens, nämlich die praxisrelevanten Erkenntnisse und die gedanklichen Konzepte zur Erschaffung eines konsistenten Weltbildes, Beachtung finden. Gelegentlich verklausuliert und mit verschiedensten Begriffen belegt, versteht man unter dem Praxisbezug heute das, was als allgemeine Lebensweltorientierung in der Bildungstheorie eingefordert wird. Je nach Zeitgeist wird in Bildungstheorien eine zusätzliche Komponente im Bereich der philosophisch-weltanschaulichen Verortung des Individuums im Universum angemahnt. Wenn in der vorliegenden Promotionsschrift nach Wegen gesucht wird, das Thema der Dunklen Materie in die physikalisch-naturwissenschaftlichen Bildungsgänge in Schule und Hochschule zu integrieren, dann ist dies offenkundig zunächst darin motiviert, ein adäquates Weltbild zu vermitteln. Man könnte auch fragen, warum im gegenwärtigen Physikunterricht lediglich vier bis fünf Prozent der materiellen Bestandteile unseres Universums thematisiert werden und die restlichen 95 Prozent allenfalls am Rande Erwähnung finden. Hier scheint unbewusst das, was wir unter lebensweltlicher Orientierung des Unterrichts verstehen wollen, so tief auf die Curricula durchgeschlagen zu haben, dass der übergeordnete Blick verloren gegangen ist. Die Vermutung liegt nahe, dass die Tradition aufeinander folgender Bildungspläne seit über 100 Jahren weitgehend ungebrochen ist, was letztendlich die Übertragung des Bisherigen auf das Gegenwärtige bedeutet. Ohne die physikalische Fachsystematik in Frage zu stellen, darf man durchaus darauf hinweisen, dass sich unser schrittweise entwickelndes Weltbild nur einen unbefriedigenden Eingang in die Lehrpläne gefunden hat. Damit werden Jahrzehnte der Forschung nicht mehr im Bildungsgang berücksichtigt.

1.2 Hauptziel und Aufbau der Arbeit

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, Wege aufzuzeichnen, wie man das große Thema Dunkle Materie für angehende und unterrichtende Lehrkräfte fachdidaktisch aufbereiten und an sie vermitteln kann. Legitimiert wird diese Arbeit in einem eigenständigen Kapitel am Eingang, auch durch die Analyse der gegenwärtig vorliegenden Lehrplan- und Lehrbuchliteratur für die Schule, die als großes Desiderat die Behandlung der Dunklen Materie konstatieren muss. So wird im Rahmen dieser Arbeit ein Kurs entwickelt, der ausschließlich der Behandlung dieser Thematik gewidmet ist und in einem modularen Aufbau die jeweiligen fachlichen Grundlagen, die historische Entwicklung sowie die notwendigen Elementarisierungen für die Umsetzung im Unterricht behandelt. Da für die bezeichnete Personengruppe bislang noch keinerlei Zugänge elaboriert sind, werden durch die Entwicklung von Analogieexperimenten, Simulationen und konkrete Berechnungen verschiedene umfangreiche Möglichkeiten zur didaktischen Erschließung des Themas der Dunklen Materie bereit gestellt. Der Ansatz eines durchgängig konzipierten „Lehrgangs“ in Form von aufeinander aufbauenden Modulen erscheint dabei durchaus zweckmäßig, da sich diese jeweils in einen eigenen fachlichen und didaktischen Erklärungsraum einbetten lassen und sich die neu entwickelten Vermittlungswege schlussendlich doch zu einer Gesamtheit zusammenfügen. Die im folgenden Kapitel formulierten Forschungsfragen, die in diesem Zusammenhang zu stellen sind, werden zum Abschluss der Arbeit umfassend beantwortet. Es liegt auf der Hand, dass Umfang und Ziel der vorliegenden Promotionsschrift keine ausufernde Erprobung der vorgestellten Module im Sinne der empirischen Lehr-Lern-Forschung bieten kann, trotzdem wollte der Autor natürlich nicht auf die Rückkopplung zu Lernenden verzichten und hat bei seiner Entwicklungsarbeit immer wieder die praktische Umsetzbarkeit hinterfragt. Die Resultate einer Erprobung werden im Anschluss an die Lernmodule präsentiert.

KAPITEL 2

Wissenschaftliche Fragestellungen

Im Rahmen dieser Dissertation sollen verschiedene wissenschaftliche Fragestellungen untersucht werden, welche in diesem Kapitel aufgeführt werden. Es handelt sich hierbei um übergeordnete Fragestellungen, welche eine strukturierte Erarbeitung der Promotions-thematik ermöglichen sollen. Bezüglich der momentanen Ausgangssituation, der Relevanz und bezogen auf die konkrete Umsetzung eines Lehr-Lern-Programms zur Dunklen Materie werden im Folgenden sechs Forschungsfragen formuliert.

1. Zur aktuellen Situation:

Ein Blick in die gegenwärtigen Lehrpläne zeigt, dass astrophysikalische Themen in den Bundesländern kaum bis gar nicht behandelt werden. Nach den Inhalten für die Unterstufe wie die Entstehung der Jahreszeiten, die Sonnen- und Mondfinsternisse sowie grundsätzlichen Informationen zum Sonnensystem scheint sich die Anzahl an astronomischen und astrophysikalischen Themen mit Blick auf die Oberstufe dramatisch zu reduzieren. Die Lehrerfahrung des Autors zeigt, dass die KEPLER'schen Gesetze in der Regel noch behandelt werden. Jedoch scheint weder die Entwicklung des Universums noch die der Strukturen in unserem Kosmos Einzug in die aktuellen Lehrpläne zu finden. Auch die Dunkle Materie wird allenfalls am Rande, beispielsweise als Exkurs-thema, in den Schulbüchern zu finden sein. Es stellt sich damit die Frage nach einer quantitativen Untersuchung bezogen auf die Vermittlung thematischer Inhalte zur Dunklen Materie in Schulbüchern und Lehrplänen. Die Forschungsfrage lautet:

Forschungsfrage 1:

Inwieweit wird die Dunkle Materie in modernen Schulbüchern und Lehrplänen behandelt?

2. Zur Bedeutung aus Sicht der Lernenden:

Studien zeigen, dass sich Kinder und Jugendliche für astrophysikalische Themenstellungen interessieren (vgl. z. B. ROSE-Studie [4, 5]). Ableitend daraus ließe sich die Hypothese aufstellen, dass die Dunkle Materie als ein großer Bestandteil der Materie unseres Universums daher von zentralem Interesse für die Lernenden sein müsste. Ob diese Hypothese tatsächlich so im Stichprobenumfang bestätigt werden kann, soll mit der zweiten Forschungsfrage untersucht werden.

Forschungsfrage 2:

Zählt das Themenfeld der Dunklen Materie zu den Bereichen, für welches sich Lernende interessieren?

3. Zur konkreten Umsetzung eines modularen Lehr-Lern-Programms:

Ziel dieser Arbeit ist es, ein modulares Lehr-Lern-Programm zu entwickeln, nach welchem die Thematik der Dunklen Materie im Unterricht vermittelt werden kann. Dazu müssen zunächst die einzelnen Module festgelegt, die fachlichen Inhalte geklärt, didaktische Hinweise formuliert und Arbeitsmaterialien erstellt werden.

Forschungsfrage 3:

Wie würde ein modulares Lehr-Lern-Programm zur Dunklen Materie aussehen und welche fachlichen Inhalte sollte es enthalten?

4. Zur Möglichkeit des Verständnisses mittels Analogieversuchen und Simulationen:

Experimente und Simulationen bieten grundsätzlich die Möglichkeit, gewisse Sachverhalte für Lernende verständlicher, nachvollziehbarer und anschaulicher zu machen. Hier können auch Analogieversuche helfen, da so das grundlegend zu betrachtende

Phänomen in einem anderen, möglicherweise bereits bekannten, Kontext veranschaulicht wird oder gar erst zugänglich gemacht wird. Es soll sich in dieser Promotionschrift also auch mit der Frage auseinandergesetzt werden, an welchen Stellen welche Analogieversuche und Simulationen nützlich sind, um den Lernenden speziell die Thematik der Dunklen Materie verständlicher zu machen. Die Forschungsfrage lautet:

Forschungsfrage 4:

Welche Möglichkeiten gibt es, etwa durch Analogieversuche oder einfache Simulationsprogramme, Lernenden Verständniswege bei der Erkundung der Eigenschaften der Dunklen Materie zu eröffnen?

5. Zu den Ergebnissen dieser Promotion:

Abschließend soll aufgezeigt werden, welche neuen Elementarisierungen, Analogieversuche und Simulationen in dieser Promotion aufgezeigt und realisiert wurden. Die Promotion fußt auf Elementarisierungen, die bereits in der Literatur angegeben wurden und im Laufe dieser Arbeit immer wieder zitiert werden. In der vorliegenden Promotionschrift liegt das Hauptaugenmerk darauf, neue Beiträge hierzu zu leisten. Somit werden die innovativen und neuen didaktischen Überlegungen und Ansätze zum Abschluss der Arbeit zusammenfassend dargestellt. Die entsprechende Forschungsfrage lautet:

Forschungsfrage 5:

In welchem Umfang konnten im Rahmen dieser Promotion bisher noch nicht bekannte Elementarisierungen, Analogieversuche und Simulationen aufgezeigt und realisiert werden?

3.1 Analyse ausgewählter Lehrbuch- und Lehrplanliteratur

Um sich zunächst einen Überblick darüber zu verschaffen, inwieweit das Themenfeld der Dunklen Materie gegenwärtig in Lehrbüchern und Lehrplänen vertreten ist, werden nachfolgend ausgewählte Lehrbücher und Lehrpläne analysiert. Dabei sollen zunächst die Vorstellung und eine begründete Auswahl der Lehrbücher und Lehrpläne erfolgen, anschließend wird die verwendete Methode vorgestellt und schlussendlich die Ergebnisse der Analyse dargelegt.

3.1.1 Auswahl der Lehrbücher und Lehrpläne

Für die Analyse wurden exemplarisch fünf in Deutschland weit verbreitete Schulbücher bzw. Schulbuchreihen ausgewählt. Die vorliegenden Ausgaben sind jeweils für das Bundesland Nordrhein-Westfalen zugelassen, aber ohne große Änderungen auch in anderen Bundesländern erhältlich und werden dort im Unterricht ebenfalls eingesetzt. Alle Bände liegen als originales Schulbuch vor. Nachfolgend werden die jeweils vorliegenden Ausgaben in alphabetischer Reihenfolge des Namens der jeweiligen Schulbuchreihe aufgelistet und der Inhalt des Buches gemäß der Kapitelüberschriften kurz dargestellt.

- *Fokus Physik. Einführungsphase SII.* Cornelsen-Verlag, 2014. [6]

– 168 Seiten

- Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Mechanik und Gravitation (Kinematik, Dynamik, Kreis- und Drehbewegungen, Gravitation), Schwingungen und Wellen (Schwingungen, Wellen).

Fokus Physik. Qualifikationsphase SII. Cornelsen-Verlag, 2014. [7]

- 400 Seiten
- Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Elektrizität (Elektrische Ladung und elektrisches Feld, Magnetisches Feld, Elektromagnetische Induktion), Schwingungen und Wellen (Schwingungen, Wellen, Wellenerscheinungen des Lichts), Struktur der Materie (Quanten, Quantenphysikalisches Atommodell, Eigenschaften von Festkörpern, Atomkerne, Elementarteilchen, Radioaktivität und Kerntechnik), Relativität und Astrophysik (Relativitätstheorie, Astrophysik).

• *Dorn Bader. Physik Einführungsphase.* Schroedel-Verlag, 2014. [8]

- 144 Seiten
- Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Bewegungen und Kräfte im Straßenverkehr, Erhaltungssätze im Straßenverkehr, Fall- und Wurfbewegungen im Sport, Unser Planetensystem, Schwingungen und Wellen bei Musikinstrumenten.

Dorn Bader. Physik Qualifikationsphase Grundkurs. Schroedel-Verlag, 2015. [9]

- 208 Seiten
- Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Quantenobjekte (Erforschung des Photons, Erforschung des Elektrons, Wellig und körnig), Elektrodynamik (Elektrische Energie gewinnen und verteilen), Strahlung und Materie (Erforschung des Mikro- und Makrokosmos, Mensch und Strahlung, Elementarteilchenphysik), Spezielle Relativitätstheorie (Das Denken übersteigt die sinnliche Erfahrung).

- *Duden Physik. Gymnasiale Oberstufe.* Duden Schulbuchverlag, 2016. [10]
 - 600 Seiten
 - Beiliegend: CD zum Lehrbuch
 - Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Denk- und Arbeitsweisen in der Physik, Mechanik (Bewegungen in Natur und Technik, Kräfte und ihre Wirkungen, Energie, Arbeit und Leistung, Impuls und Drehimpuls, Gravitationsfelder, Mechanische Schwingungen und Wellen), Thermodynamik (Thermisches Verhalten von Körpern und Stoffen, Die kinetische Gastheorie, Hauptsätze der Thermodynamik und Kreisprozesse, Strahlungsgleichgewicht und Strahlungsgesetze), Elektrizitätslehre und Magnetismus (Der Gleichstromkreis - Grundlagen, Elektrische Leitungsvorgänge, Elektrische Felder, Magnetische Felder, Elektromagnetische Induktion, Elektromagnetische Schwingungen und Wellen), Optik (Ausbreitung von Licht und Wechselwirkung mit Stoffen, Spiegel, Linsen und optische Geräte, Beugung, Interferenz, Polarisation, Spektren), Quantenphysik (Photonen und Elektronen als Quantenobjekte, Eigenschaften von einzelnen Quantenobjekten), Atom- und Kernphysik (Physik der Atomhülle, Physik des Atomkerns, Grundbausteine der Materie), Spezielle Relativitätstheorie (Von der klassischen Physik zur Relativitätstheorie, Relativistische Kinematik, Relativistische Dynamik und Ausblick), Astrophysik (Forschungsmethoden der Astrophysik, Das Sonnensystem, Sterne und ihre Entwicklung, Große Strukturen im Universum).

- *Impulse Physik. Oberstufe Einführungsphase.* Klett-Verlag, 2014. [11]
 - 159 Seiten
 - Beiliegend: DVD zum Schülerbuch
 - Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Beschreiben von Bewegungen, Ursache von Bewegungen, Erhaltungssätze, Astronomische Weltbilder, Schwingungen, Wellen.

Impulse Physik. Qualifikationsphase Grundkurs. Klett-Verlag, 2015. [12]

- 218 Seiten
- Beiliegend: CD zum Schülerbuch
- Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Erforschung des Photons, Erforschung des Elektrons, Quantenobjekte, Energieversorgung und Energietransport, Erforschung des Mikro- und Makrokosmos, Mensch und Strahlung, Relativitätstheorie.

• *Metzler Physik.* Schroedel-Verlag, 2000. [13]

- 577 Seiten
- Inhalt des Buches nach Kapitelüberschriften: Mechanik (Kinematik, Dynamik, Energie und Energieerhaltung, Die Rotation starrer Körper), Gravitation (Die Gravitationskraft, Das Gravitationsfeld, Bewegungen im Gravitationsfeld), Mechanische Schwingungen und Wellen (Schwingungen, Überlagerung von Schwingungen, Entstehung und Ausbreitung von Wellen, Wechselwirkung von Wellen), Thermodynamik (Grundlagen, Die kinetische Gastheorie, Energieumwandlungen, Die Entropie, Wärmekraftmaschinen, Die Strahlungsgesetze), Elektrische Ladung und elektrisches Feld (Das elektrische Feld, Energie im elektrischen Feld, Bewegung elektrischer Ladungen im elektrischen Feld, Elektrische Netzwerke), Bewegte Ladungsträger im magnetischen Feld (Kräfte im Magnetfeld, Magnetfelder von Strömen, Elektromagnetische Induktion), Elektromagnetische Schwingungen und Wellen (Wechselstromtechnik, Elektrische Schwingungen und elektromagnetische Wellen, Wellenoptik, Das elektromagnetische Spektrum), Chaotische Vorgänge (Das deterministische Chaos, Ein einfaches System mit chaotischem Verhalten, Wege ins Chaos – Verlust-Dynamik und Feigenbaum-Szenario, Chaos und Fraktale), Die spezielle Relativitätstheorie (Die Relativitätspostulate, Relativistische Kinematik, Relativistische Dynamik), Einführung in die Quantenphysik(Die Quantelung

der Strahlung, Verteilung der Photonen im Raum, Welleneigenschaften der Elektronen, Quantenphysik und klassische Physik), Atomphysik (Energieaustausch mit Atomen, Die Entwicklung der Atommodelle, Das Atommodell der Quantenphysik, Leistungen der Atommodelle), Festkörperphysik und Elektronik (Halbleiter, Das quantenphysikalische Modell des Festkörpers, Analoge Signalverarbeitung), Kernphysik (Radioaktivität, Wechselwirkung von Strahlung und Materie, Aufbau und Energie der Kerne, Nutzung der Kernenergie, Anwendungen der Kernphysik), Elementarteilchenphysik (Vom Elektron zum Teilchenzoo, Das Standardmodell), Astrophysik (Die Erforschung des Weltalls, Die Sterne), Physik und Wissenschaftstheorie (Theorie-Hypothese-Gesetz-Modell, Philosophische Strömungen der Erkenntnisgewinnung).

Die exemplarisch ausgesuchten Lehrpläne sind die der bevölkerungsreichsten Länder Baden-Württemberg [14], Bayern [15] und Nordrhein-Westfalen [16, 17]. Es kann in dieser Arbeit keine umfassende Analyse der Lehrpläne aller Bundesländer erfolgen. Der Autor hat sich daher auf drei Lehrpläne beschränkt.

3.1.2 Die verwendete Methode der qualitativen Inhaltsanalyse

Die qualitative Inhaltsanalyse ist eine Technik, mit welcher Texte, Bilder, Tabellen und anderes Material systematisch unter bestimmten Kriterien ausgewertet werden. Ende des letzten Jahrhunderts haben sich verschiedene Arten der Inhaltsanalyse herausgebildet, welche sich in drei Kategorien unterteilen lassen [z. B. nach 18].

- Die zusammenfassende Inhaltsanalyse

Bei der zusammenfassenden Inhaltsanalyse wird das vorliegende Material paraphrasiert und somit systematisch gekürzt. Die Reduzierung auf die wesentlichen Inhalte ermöglicht es, eine thematische Gliederung zu erstellen und einzelne Abschnitte in Kategorien einzuteilen. Der Pädagoge und Mitbegründer der qualitativen Inhaltsanalyse Philipp A. E. MAYRING schreibt hierzu:

„Ziel der Analyse ist es, das Material so zu reduzieren, dass die wesentlichen Inhalte erhalten bleiben, durch Abstraktion einen überschaubaren Corpus zu schaffen, der immer noch Abbild des Grundmaterials ist.“ [19, S. 58]

- Die explizierende Inhaltsanalyse

Im Gegensatz zur zusammenfassenden Analyse geht es bei der Explikation darum, schwer verständliche Materialabschnitte durch zusätzliches Material verständlicher zu machen. Durch neues Material kann ebenso ein weiterführendes Hintergrundwissen zu bestimmten Kontexten erlangt werden. MAYRING schreibt hierzu:

„Ziel der Analyse ist es, zu einzelnen fraglichen Textteilen (Begriffen, Sätzen, ...) zusätzliches Material heranzutragen, das das Verständnis erweitert, das die Textstelle erläutert, erklärt, ausdeutet.“ [19, S. 58]

- Die strukturierende Inhaltsanalyse

Die strukturierende Analyse hat das Ziel, das vorliegende Material weder zu kürzen noch zu erweitern, sondern vielmehr die Struktur des Materials zu erfassen und jede Materialeinheit bereits zuvor bestimmten Kategorien zuzuordnen. Die Strukturierung kann dabei formal, inhaltlich, typisierend oder skalierend erfolgen. Auf diese vier Strukturdimensionen wird später noch genauer eingegangen. MAYRING schreibt allgemein:

„Ziel der Analyse ist es, bestimmte Aspekte aus dem Material herauszufiltern, unter vorher festgelegten Ordnungskriterien einen Querschnitt durch das Material zu legen oder das Material aufgrund bestimmter Kriterien einzuschätzen.“ [19, S. 58]

Es ist an dieser Stelle klar, dass bei der geplanten Schulbuchanalyse zum aktuellen Stand der Inhalte bezogen auf die Thematik der Dunklen Materie weder eine zusammenfassende noch eine explizierende Inhaltsanalyse sinnvoll ist. Es wird also im Folgenden eine strukturierende Inhaltsanalyse genauer vorgestellt. Diese setzt sich nach MAYRING aus

drei Schritten zusammen:

1. Kategorien definieren

„Es wird genau definiert, welche Textbestandteile unter eine Kategorie fallen.“ [19, S. 83]

2. Ankerbeispiele finden

„Es werden konkrete Textstellen angeführt, die unter eine Kategorie fallen und als Beispiele für diese Kategorie gelten sollen.“ [Ebd.]

3. Kodierregeln formulieren

„Es werden dort, wo Abgrenzungsprobleme zwischen Kategorien bestehen, Regeln formuliert, um eine eindeutige Zuordnung zu ermöglichen.“ [Ebd.]

Anhand dieser drei Analyseschritte entsteht dann ein Ablaufplan zur konkreten Umsetzung am Material. Es sind insgesamt acht Schritte zu durchlaufen, welche Tabelle 3.1 zu entnehmen sind.

1. Schritt Bestimmung der Analyseeinheiten.
2. Schritt Festlegung der Strukturdimensionen (theoriegeleitet).
3. Schritt Bestimmung der Ausprägungen (theoriegeleitet) und Zusammenstellung des Kategoriensystems.
4. Schritt Formulierung von Definitionen, Ankerbeispielen und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien.
5. Schritt Materialdurchlauf: Fundstellenbezeichnung.
6. Schritt Materialdurchlauf: Bearbeitung und Extraktion der Fundstellen.
7. Schritt Überarbeitung, gegebenenfalls Revision von Kategoriensystem und Kategoriendefinition, dann zurück zu Schritt 3.
8. Schritt Ergebnisaufbereitung.

Tabelle 3.1: Ablaufplan der strukturierten Inhaltsanalyse nach MAYRING. [19]

Diese acht Schritte werden im Folgenden durchlaufen, wobei einzelne Vorgänge im Rahmen dieser Arbeit zusammengefasst wurden. Dem Verfasser ist bewusst, dass eine ausführliche Inhaltsanalyse noch tiefer gehende Ausarbeitungen nötig werden lassen. Da

jedoch das Ziel der Inhaltsanalyse an dieser Stelle lediglich ist, sich bewusst zu werden, wie das Thema der Dunklen Materie in aktuell gängigen Schulbüchern und exemplarisch ausgewählten Lehrplänen vertreten ist, scheint eine Reduzierung der oben genannten Schritte auf die wesentlichen Strukturen sinnvoll. Den nachfolgenden Ausführungen ist zu entnehmen, wie bei der hier vorgestellten Analyse vorgegangen wurde.

3.1.2.1 Bestimmung der Analyseeinheiten

Im ersten Schritt der Inhaltsanalyse werden die Analyseeinheiten bestimmt. Es wird also festgelegt, wie eine Kodier- und eine Kontexteinheit aussehen müssen, damit diese in die Analyse mit aufgenommen werden. Als Kodiereinheit wird eine Art Mindestmaß verstanden, welches erreicht werden muss, um überhaupt in die Analyse mit einzufließen. Mit der Wahl einer Kontexteinheit wird die Grenze gezogen, ab der man nicht nur von einer Fundstelle spricht. In der geplanten Analyse wurde sich für Folgendes entschieden: Die vorliegenden Schulbücher werden der Reihe nach analysiert. Anschließend werden die Lehrpläne analysiert. Für die Schulbücher gilt, dass in Textstellen, Grafiken, Bildern, Diagrammen etc. der Begriff Dunkle Materie explizit erwähnt werden muss, um in die Wertung aufgenommen zu werden. Ein Erwähnen dieses Begriffes wird als Kodiereinheit festgelegt. Sollten im Text weitere Informationen zu finden sein, Bilder oder Diagramme folgen oder aber gar eine Erläuterung einzelner physikalischer Zusammenhänge gegeben werden, wird dies als Kontexteinheit festgelegt.

Für die Lehrpläne gilt, dass der Begriff Dunkle Materie explizit als Stichwort genannt werden muss, um in die Wertung aufgenommen zu werden. Ein explizites Erwähnen dieses Begriffes auch in Nebenbemerkungen oder als optionaler Inhalt für den Schulunterricht werden als Kodiereinheit festgelegt. Als Kontexteinheit gilt eine nähere Erläuterung, die Auflistung von Unterthemen oder auch die verbindliche Vorschrift, dass der Bereich der Dunklen Materie als eigenständiger thematischer Inhalt vorgeschrieben ist.

3.1.2.2 Festlegung der Strukturdimension und Zusammenstellung der Kategorien

Nach MAYRING können vier Strukturdimensionen unterschieden werden, durch welche schlussendlich festgelegt wird, wie oder nach welchen generellen Kriterien das vorliegende Material durchforstet wird.

- Formale Strukturierung: Das Material wird nach formalen Merkmalen strukturiert. Diese Merkmale können beispielsweise sprachlicher oder inhaltlicher Art sein.
- Inhaltliche Strukturierung: Das Material wird nach „Themen, Inhalte[n], Aspekte[n]“ [19, S. 89] strukturiert und zusammengefasst.
- Typisierende Strukturierung: Das Material wird auf bestimmte markante Merkmale hin untersucht.
- Skalierende Strukturierung: Das Material wird auf einzelne Ausprägungen hin untersucht und diese in „ordinalskalierender Form (z. B. viel - mittel - wenig)“ [19, S. 92] dargestellt.

Bei der geplanten Inhaltsanalyse wird die typisierende Strukturdimension bedient. Das Material in Form von Schulbüchern und Lehrplänen wird auf ein Merkmal hin, nämlich das Vorkommen des Begriffs Dunkle Materie, untersucht werden. Je nachdem, wie ausführlich oder in welchem Kontext der Begriff auftaucht und erläutert wird, sind verschiedene Hauptkategorien festzulegen. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Schulbuchanalyse hat sich der Verfasser für die Klassifizierung von fünf Hauptkategorien entschieden.

- (I) Der Begriff Dunkle Materie wird lediglich erwähnt, jedoch nicht näher ausgeführt. Dies kann zum Beispiel ein Ausblick auf die aktuelle Forschung am Ende eines Kapitels sein. Den Lernenden wird anhand dieser Erwähnung nicht klar, was sich hinter dem Begriff verbirgt.

- (II) Der Begriff Dunkle Materie wird erwähnt und näher beleuchtet. Dabei erfolgt jedoch keine fachlich tiefer gehende Erklärung. Dies kann zum Beispiel ein Diagramm sein, in welchem die prozentuale Verteilung der Materie im Universum dargestellt wird. Auch in dieser Kategorie wird den Lernenden nicht klar, was sich an fachlichen Inhalten hinter dem Begriff verbirgt.
- (III) Der Begriff Dunkle Materie wird näher beleuchtet. Die Lernenden können nach den Ausführungen, die dieser Kategorie zuzuordnen sind, genauer erklären, was man unter Dunkler Materie versteht. Dabei wird auch auf Wechselwirkungen eingegangen.
- (IV) Der Begriff Dunkle Materie wird nicht nur erklärt und tiefer gehend beleuchtet, es wird auch auf den Nachweis Dunkler Materie eingegangen. So können in dieser Kategorie beispielsweise auch Rotationskurven von Spiralgalaxien gezeigt und anhand dieser die Existenz Dunkler Materie begründet werden.
- (V) In der letzten Kategorie wird zusätzlich auch die aktuelle Forschung mit einbezogen. So können Kandidaten für Dunkle Materie (WIMPs, Axionen, ...), die Unterscheidung zwischen Heißer und Kalter Dunkler Materie oder andere weiterführende Inhalte beleuchtet werden. Die Lernenden haben nach den Ausführungen, welche dieser Kategorie zuzuordnen sind, ein relativ komplexes Wissensgerüst bezüglich der Thematik der Dunklen Materie.

Für die drei zu untersuchenden Lehrpläne müssen die Hauptkategorien selbstverständlich anders formuliert werden. Im Lehrplan selbst tauchen die durchzunehmenden Inhalte häufig nur als Stichwort ohne nähere Erläuterung auf, um bei der Erstellung der schulinternen Curricula den Schulen und Fachlehrern einen pädagogischen Freiraum zu gewähren. Die Hauptkategorien für die Analyse der Lehrpläne sind folgendermaßen formuliert worden.

- (I) Der Begriff Dunkle Materie wird als zusätzliches, nicht verbindliches Thema erwähnt. Dies bedeutet, dass explizit darauf hingewiesen wird, dass die Dunkle Ma-

terie ein mögliches additives Inhaltsfeld ist, welches keineswegs im Schulunterricht des jeweiligen Bundeslandes vorkommen muss.

- (II) Der Begriff Dunkle Materie wird als Unterpunkt eines verbindlichen Inhaltsfeldes erwähnt. Dem Thema kommt hierbei aber aufgrund der zahlreichen anderen verbindlichen Inhalte keine große Bedeutung zu. Der unterrichtliche Umfang für dieses Thema liegt bei geschätzt maximal einer Schulstunde.
- (III) Der Begriff Dunkle Materie wird verbindlich im Lehrplan aufgeführt. Dem Thema kommt hierbei eine größere Bedeutung zu als nur das beiläufige Erwähnen im Lehrplan. Es wird deutlich, dass mehr als eine Schulstunde für dieses Thema in Anspruch genommen wird, jedoch wird keine tiefere unterrichtliche Aufarbeitung des Themas erfolgen.
- (IV) In der vorletzten Kategorie wird die Dunkle Materie ausführlich im Unterricht behandelt. Dies wird im Lehrplan durch zusätzliche verbindliche Unterpunkte zu diesem Thema deutlich, durch welche eine entsprechende Vertiefung ausgewählter Inhalte vorgesehen ist.
- (V) Die Dunkle Materie soll ausführlich im Unterricht behandelt werden. Im Lehrplan wird dies deutlich, indem ein eigenes Modul / ein eigenes Inhaltsfeld zu diesem Thema eingeplant ist.

3.1.2.3 Formulierung von Ankerbeispielen und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien

Jede Fundstelle in den zuvor genannten Schulbüchern und Lehrplänen wird nach einem festgelegten Muster codiert. das hier verwendete Muster besteht aus einer Zahlen- und Buchstabenfolge, welche sich folgendermaßen erklären lässt:

Zunächst erfolgt ein Buchstabencode, welcher auf das jeweilige Lehrwerk beziehungsweise den jeweiligen Lehrplan hindeutet. FokusEP steht somit für das Schulbuch Fokus Physik, Einführungsphase. Die Schulbücher sind dann weiter mit FokusQP, DornBaderEP,

DornBaderQP, Duden, ImpulseEP, ImpulseQP und Metzler klar zuzuordnen. Die Lehrpläne werden analog codiert. LPBW steht für den Lehrplan Baden-Württemberg, LPBY für den entsprechenden aus Bayern und LPNRW für jenen aus Nordrhein-Westfalen.

Nach der jeweiligen Lehrwerkbezeichnung folgt eine Zahl, welche die Fundstelle nummeriert. Begonnen wird bei 1 und dann fortlaufend durchnummeriert. Es folgt eine römische Zahl zwischen I und V, welche die Fundstelle einer der bereits definierten Hauptkategorien zuordnet. Anschließend folgen weitere Buchstaben, welche die Fundstelle ihrer Art nach genauer charakterisieren. Folgende Bezeichnungen werden hier verwendet:

- A Aufgabe
- B Bild
- C Computereinsatz / Simulation
- D Diagramm / Graphik
- E Experiment / Analogieexperiment
- K eigenständiges Kapitel
- R Randbemerkung / Randnotiz / beiläufige Erwähnung
- T Fließtext
- U Unterkapitel / Unterabschnitt

So steht die Codierung Metzler.01.III.UT für die erste Fundstelle im Schulbuch Metzler Physik, welche sich Hauptkategorie III zuordnen lässt. Die Erwähnung der Dunklen Materie erfolgt dabei in einem eigenen Unterkapitel im Fließtext.

3.1.2.4 Materialdurchlauf

Im Folgenden werden die einzelnen Lehrbücher und Lehrpläne nacheinander der Analyse unterzogen.

Fokus Physik

Fokus Physik. Einführungsphase SII.

In diesem Schulbuch lässt sich keine Stelle finden, in welcher der Begriff der Dunklen Materie erwähnt wird. Es erfolgt auch an keiner Stelle ein Ausblick oder ein weiterführendes Kapitel zu diesem Thema.

Fokus Physik. Qualifikationsphase SII.

- Fokus.01.I.TR

Seite 289: Der Begriff der Dunklen Materie wird im Kontext aktueller Forschung beiläufig erwähnt. Konkret werden hier supersymmetrische Teilchen thematisiert, durch deren Entdeckung möglicherweise die Bestandteile der „geheimnisvolle[n] Dunkle[n] Materie“ [7, S. 289] geklärt werden können.

- Fokus.02.V.KBDTA

Seite 370 – 371: Hier werden in einem eigenständigen Kapitel zur Dunklen Materie und Dunklen Energie die historischen Hintergründe sowie die Erklärungsversuche zur Existenz Dunkler Materie vorgestellt. Es wird konkret auf die Erkenntnisse der Astronomen Jan H. OORT und Fritz ZWICKY eingegangen. Es folgen die Messungen zur Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien mit einer Veranschaulichung im Diagramm sowie dem Vergleich aus erwarteter Kurve und tatsächlich gemessener Kurve. Nach der Thematisierung dieser Messungen folgen schließlich auf der zweiten Seite die Erklärungsversuche in Kombination mit einer Darstellung der prozentualen Verteilung der Dunklen Materie im Universum. In einem kurzen Abschnitt am Ende wird die Existenz neuer Teilchen, aus welchen die Dunkle Materie bestehen soll, als möglicher Erklärungsversuch vorgestellt. Abgerundet wird die Doppelseite mit zwei Aufgaben zur Rotationsgeschwindigkeit, einmal bezogen auf unsere Sonne und einmal bezogen auf die Galaxis M81 mit vorgegebenem Rotationsgeschwindigkeitsdiagramm.

Dorn Bader

Dorn Bader. Physik Einführungsphase.

In diesem Schulbuch lässt sich – analog zum entsprechenden Band der Fokus-Reihe – keine Stelle finden, an welcher der Begriff der Dunklen Materie erwähnt wird.

Dorn Bader. Physik Qualifikationsphase Grundkurs.

- DornBader.01.I.TR

Seite 155: Unter der Überschrift „Physik jenseits des Standardmodells“ wird die Dunkle Materie beiläufig im Kontext der Supersymmetrie-Theorie erwähnt. Diese Theorie kann eine „Erklärung für die Dunkle Materie liefern“ [9, S. 155]. Eine weitere Erklärung des Begriffs der Dunklen Materie oder der Hintergründe erfolgt nicht.

Duden Physik

- Duden.01.III.TU

Seite 574: In einem neunzeiligen Abschnitt wird die Existenz Dunkler Materie anhand der Differenz aus experimentell bestimmbarer Masse im Universum und der tatsächlich beobachteten Masse begründet. Es wird ebenfalls auf die gravitative Wechselwirkung und den weiter vorne im Buch thematisierten Gravitationslinseneffekt eingegangen.

- Duden.02.II.RT

Seite 574: In einer Randbemerkung an der Seite wird auf die prozentuale Massenverteilung des Universums, bezogen auf sichtbare Materie, Dunkle Materie und Dunkle Energie, eingegangen.

- Duden.03.I.–

Seite 575: Auf der Überblicksseite am Ende des Kapitels wird lediglich die Existenz nicht sichtbarer Dunkler Materie als Stichpunkt erwähnt. Weitere Ausführungen erfolgen hier nicht mehr.

Impulse Physik

Impulse Physik. Oberstufe Einführungsphase.

In diesem Schulbuch wird die Dunkle Materie nirgendwo erwähnt.

Impulse Physik. Qualifikationsphase Grundkurs.

Auch im Folgebund, hier als Grundkurs-Ausgabe vorliegend, lässt sich kein Verweis auf die Dunkle Materie oder die Erwähnung dieser Begrifflichkeit finden.

Metzler Physik

- Metzler.01.III.TU

Seite 549: In einem kleinen Unterkapitel „Das Problem der dunklen Materie“ wird verdeutlicht, dass die Existenz Dunkler Materie mit der ermittelten Differenz aus berechneter Masse von Galaxien und tatsächlich beobachteter Masse begründet wird. Prozentuale Abschätzungen werden ebenso angegeben wie der Hinweis, dass Dunkle Materie nur gravitativ wechselwirkt.

- Metzler.02.II.T

Seite 561: In dem Unterkapitel „Dunkle Energie“ wird ganz am Ende in einigen Sätzen auf die prozentuale Verteilung der Masse und der Energie in unserem Universum eingegangen. Die Dunkle Materie wird explizit erwähnt, aber nicht näher thematisiert. Es ist in jedem Fall ein Verweis auf die ausführlichere Darstellung auf Seite 549 (erste Fundstelle) gegeben.

Lehrplan Baden-Württemberg

Bezogen wird sich im Folgenden auf den aktuellen Bildungsplan für das Fach Physik (Stand 2016) für das Bundesland Baden-Württemberg [14]. In den Jahrgängen 5 bis 10 sind keine astrophysikalischen Inhalte im Bildungsplan festgelegt. In den Jahrgangsstufen 11 und 12 kann das Fach Physik dann entweder als Basisfach oder als Leistungsfach belegt werden. Das Basisfach kann entweder mit dem Schwerpunkt Quantenphysik oder mit dem Schwerpunkt Astrophysik gewählt werden. Als Leistungsfach wird die Quantenphysik in jedem Fall behandelt und die Astrophysik kann als vertiefendes Themengebiet

ebenfalls vorkommen. Das vertiefende Themengebiet ist jedoch nicht zwangsläufig die Astrophysik, sondern kann auch die Relativitätstheorie, die Laserphysik, die Elementarteilchenphysik, die Halbleiterphysik oder die Umweltphysik sein.

Im Bereich Astrophysik wird – unabhängig von Basis- und Leistungsfach – die Dunkle Materie in der zweiten Kompetenz (von insgesamt neun) aufgeführt.

„Die Schülerinnen und Schüler können Galaxien als zusammengesetzte Systeme beschreiben (zum Beispiel Sterne, Planetensysteme, interstellares Gas, Dunkle Materie).“ [20]

Hier wird deutlich, dass die Dunkle Materie keineswegs ein Hauptbestandteil des Themengebiets der Astrophysik im Bildungsplan des Landes Baden-Württemberg ist, aber sie kommt immerhin als ein mögliches Unterthema unter der Rubrik „Galaxien“ vor. Es bleibt festzuhalten, dass Schülerinnen und Schüler im Leistungsfach sich in jedem Fall mit der Dunklen Materie auseinandersetzen werden. Im Basisfach kommt es hier auf den gewählten Schwerpunkt an.

Der Bildungsplan des Landes Baden-Württemberg wird damit der Hauptkategorie II zugeordnet: LPBW.01.II.

Lehrplan Bayern

Bezogen wird sich hier auf den seit 2009 gültigen Lehrplan im Fach Physik im Bundesland Bayern [15]. Hier beginnen astronomische Inhalte in der Jahrgangsstufe 10. Im ersten Unterrichtsvorhaben „Astronomische Weltbilder“ werden die „Aspekte moderner Kosmologie“ besonders hervorgehoben. In der Aufschlüsselung, was man unter diesen Aspekten zu verstehen hat, finden sich Begriffe wie Urknall, Expansion und Struktur des Universums. Der Begriff der Dunklen Materie fehlt hier. In der Jahrgangsstufe 12 wird man dann aber fündig. Als Lehrplanalternative zur Quanten-, Atom- und Kernphysik wird das Themenfeld der Astrophysik vorgeschlagen. Nach dem Einstieg mit der Orientierung am Himmel, dem Sonnensystem sowie der Sonne und den Sternen folgen dann als letztes Unterrichtsvorhaben die Großstrukturen im Weltall. In diesem wird als ein fachlicher Inhalt die Kosmologie genannt, unter welchem auch die Dunkle Materie

und die Dunkle Energie aufgeführt werden. Allerdings ist genau dieser Punkt als nicht verbindliches Additivum zu werten [21], was bedeutet, dass die Dunkle Materie nur dann in Bayern Thema im Physik-Unterricht wird, wenn in der Jahrgangsstufe 12 die Lehrplanalternative Astrophysik unterrichtet wird und hier der freiwillige zusätzliche Inhalt auch tatsächlich durchgenommen wird.

Der Lehrplan des Landes Bayern wird aus den eben genannten Gründen der Hauptkategorie I zugeordnet: LPBY.01.I.

Lehrplan Nordrhein-Westfalen

Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen hat sich der Autor auf den aktuell gültigen Kernlehrplan für die Sekundarstufe I [16] und II [17] bezogen. Der Begriff der Dunklen Materie wird in keinem der beiden Lehrpläne erwähnt. Thematisch wird zwar sowohl in der Sekundarstufe I als auch in der Sekundarstufe II die Entwicklung astronomischer Weltbilder verbindlich als Unterrichtsinhalt festgelegt, aber es folgen hier keine tiefergehenden astrophysikalischen Inhalte, sodass die Dunkle Materie im Schulunterricht in Nordrhein-Westfalen zu keiner Zeit vorkommen wird.

3.1.2.5 Überarbeitung und Revision von Kategoriensystem und Kategoriendefinition

Auf die Überarbeitung und Revision von Kategoriensystem und Kategoriendefinition wird an dieser Stelle nicht tiefgründiger eingegangen, da die hier vorgestellte Analyse bereits nach entsprechender Überarbeitung und Revision erfolgt ist.

3.1.2.6 Ergebnisaufbereitung

An dieser Stelle sollen nun die Ergebnisse der Schulbuchanalyse in aufbereiteter Form präsentiert werden. Besonders interessant ist die Zuweisung der Bücher in Hauptkategorien. Es wurden fünf Hauptkategorien festgelegt. Es ist augenfällig, dass lediglich ein ausgesuchtes Schulbuch der Hauptkategorie V zuzuordnen ist, zwei Bücher finden sich in

der Hauptkategorie III wieder. Die Hauptkategorie I ist einmal vertreten und in einem Schulbuch wurde die Dunkle Materie noch nicht einmal als Stichwort erwähnt, sodass dieses Buch keiner Hauptkategorie zuzuordnen war. Die Verteilung der Hauptkategorien ist als Diagramm in Abbildung 3.1 dargestellt.

In tabellarischer Form wird nachfolgend angegeben, wie die einzelnen Fundstellen in den Büchern genauer charakterisiert werden können. Dazu wurden in Kapitel 3.1.2.3 verschiedene Bezeichnungen für Aufgaben, Bilder, Simulationen etc. eingeführt. Tabelle 3.2 gibt Aufschluss darüber, in welcher Art und Weise in den einzelnen Büchern auf die Dunkle Materie eingegangen wird.

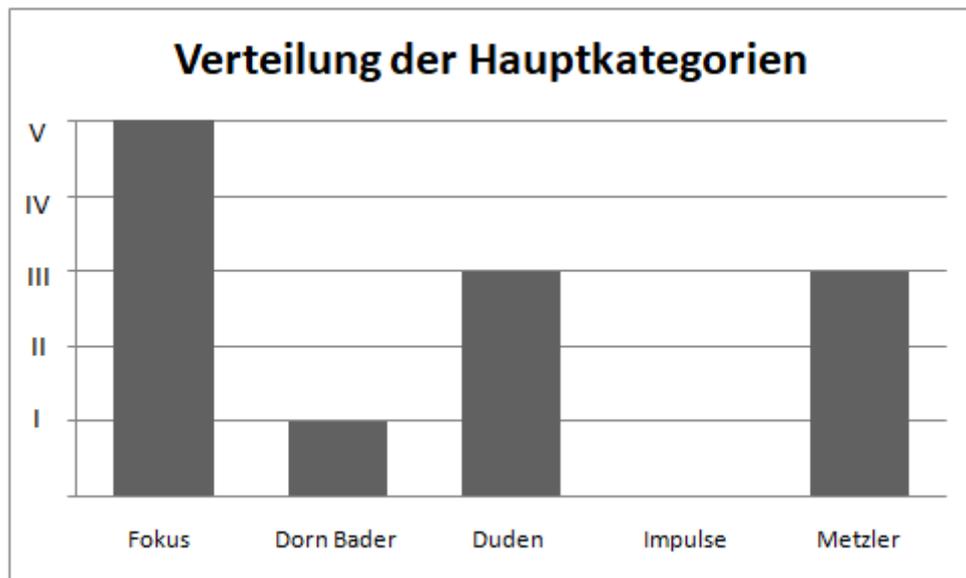


Abbildung 3.1: Zuordnung fünf ausgewählter Schulbücher in Hauptkategorien.

Für die Lehrpläne folgt mit Abbildung 3.2 ebenfalls eine graphische Darstellung der Zuordnung in Hauptkategorien. Auch hier wurden fünf solcher Hauptkategorien festgelegt. Der Maximalwert mit Hauptkategorie II ist einmal vertreten, ebenso die Hauptkategorie I. Im Lehrplan des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen wird die Dunkle Materie an keiner Stelle als thematischer Inhalt aufgegriffen, sodass dieses Bundesland keiner Hauptkategorie zuzuordnen ist.

	Fokus	Dorn Bader	Duden	Impulse	Metzler
Aufgabe	✓	–	–	–	–
Bild	✓	–	–	–	–
Computereinsatz / Simulation	–	–	–	–	–
Diagramm / Graphik	✓	–	–	–	–
Experiment / Analogieexperiment	–	–	–	–	–
Eigenständiges Kapitel	✓	–	–	–	–
Randbemerkung / Randnotiz / Beiläufige Erwähnung	✓	✓	✓	–	–
Fließtext	✓	✓	✓	–	✓
Unterkapitel / Unterabschnitt	–	–	✓	–	✓

Tabelle 3.2: Charakterisierung der Fundstellen in den einzelnen Schulbüchern.

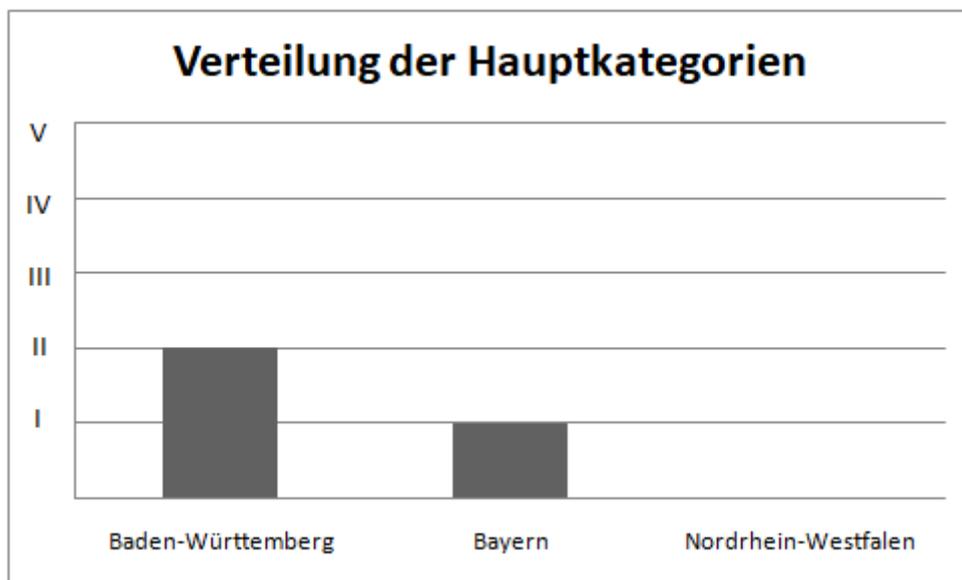


Abbildung 3.2: Zuordnung drei ausgewählter Lehrpläne in Hauptkategorien.

3.1.3 Ergebnisse der Analyse

Die Analyse zeigt, dass das Themengebiet der Dunklen Materie weder in Schulbüchern noch in Lehrplänen besonders elaboriert zu sein scheint. Vorweg sei hier betont, dass es sich lediglich um eine stichprobenartige Analyse handelt, da nur fünf gängige und aktuelle Schulbücher sowie drei ausgewählte Lehrpläne genauer analysiert wurden.

Bei den Schulbüchern fällt lediglich der Band Fokus Physik durch eine vergleichsweise umfangreiche Darstellung des Inhalts auf. Auf einer Doppelseite wird hier konkret auf die Entdeckung der Dunklen Materie anhand von Untersuchungen zur Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien eingegangen. Allein dies ist im Vergleich zu den übrigen Schulbüchern ein Alleinstellungsmerkmal. Neben einem Rotationsgeschwindigkeitsdiagramm wird auch die prozentuale Massenverteilung im Universum näher beleuchtet und auf die Existenz neuer Teilchen als mögliche Bestandteile von Dunkler Materie eingegangen. Letzteres gelingt allerdings nicht sehr überzeugend. Der Abschnitt ist extrem kurz. Für Schülerinnen und Schüler bleiben hier recht viele Fragen offen. Positiv ist allerdings, dass das Buch Fokus Physik als einziges Buch zwei Aufgaben zu diesem Kontext bereithält. Die Schulbücher Duden und Metzler erwähnen den Begriff der Dunklen Materie eher beiläufig in einem kleinen Unterkapitel. Der Dunklen Materie kommt damit keine allzu große Bedeutung zu. Dieser Eindruck wird verstärkt, wenn man bedenkt, dass beide Bücher fast 600 Seiten dick sind und die Abschnitte lediglich über einige Zeilen gehen. Nichtsdestotrotz bleibt positiv zu erwähnen, dass auf die Dunkle Materie überhaupt eingegangen wird. Für Schülerinnen und Schüler ergibt sich allerdings kein schlüssiges und umfangreiches Bild über die geschichtlichen und physikalischen Hintergründe. Aufgaben zu diesem Thema oder Bilder bzw. Diagramme fehlen komplett. Im Buch Dorn Bader wird auf die Dunkle Materie nur in einer Randbemerkung eingegangen. Im Buch Impulse Physik wird man zu diesem Begriff erst gar nicht fündig. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass abgesehen vom Buch Fokus Physik alle Bücher auf die Dunkle Materie nur unzureichend oder gar nicht eingehen. Simulationen, weiterführende Links oder Aufgaben, in welchen der Computer eingesetzt werden muss, fehlen in allen Büchern.

Dass das Themengebiet der Dunklen Materie damit in den Schulbüchern insgesamt nur

am Rande behandelt wird, ist nicht weiter verwunderlich, wenn man einen Blick in die aktuellen Lehrpläne wirft. So sind zum Beispiel im Lehrplan für das Land Nordrhein-Westfalen nur Grundtatsachen der Astronomie und Astrophysik vertreten. Etwas ausführlicher wird das Thema in anderen Bundesländern, wie Baden-Württemberg und Bayern, behandelt, wobei hier allerdings zu bedenken ist, dass die Astrophysik ein Wahlfach oder eine Lehrplanalternative darstellt. Ob also tatsächlich etwas aus diesem Bereich unterrichtet wird, hängt damit von den Schulen oder von schulischen Laufbahnwahlen der Schülerinnen und Schüler ab.

Anhand der Schulbuch- und Lehrplananalyse ergeben sich damit folgende Erkenntnisse:

- Das Themenfeld der Dunklen Materie wird in Lehrplänen, wenn überhaupt, nur beiläufig erwähnt. Häufig handelt es sich hier um einen Wahlinhalt, der nicht verbindlich vorgeschrieben ist.
- In Schulbüchern wird die Dunkle Materie in der Regel nur sehr knapp thematisiert. Eine ausführliche und fachlich tiefgehende Aufbereitung erfolgt in nur einem von fünf exemplarisch ausgewählten Schulbüchern.
- Besonders augenfällig gerade bei den Schulbüchern ist das Fehlen von (Analogie-) Experimenten und Simulationen zu diesem Thema. Auch Aufgaben, mit welchen die fachlichen Inhalte weiter vertieft werden können, fehlen nahezu überall.

3.2 Befragungen

Neben dem aktuellen Stand in Schulbüchern und Lehrplänen, soll an dieser Stelle auch der Frage nachgegangen werden, ob das Themengebiet der Dunklen Materie im Schulunterricht aus Sicht der Lernenden und Lehrenden überhaupt Einzug halten sollte. Einige Studien, die die Motivation und die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler in den Blick genommen haben, sind bereits in hinreichend großer Zahl evaluiert worden. Zu nennen wäre hier beispielsweise die „Relevance of Science Education“-Studie, kurz ROSE-Studie, welche 2010 in rund vierzig Ländern bei etwa 15 Jahre alten Schülerinnen und Schülern durchgeführt wurde, mit dem Ziel, Inhalte und Themengebiete zu identifizieren, welche für Schülerinnen und Schüler interessant und relevant erscheinen. Neben den klassischen Fächern kommt die Astronomie bzw. Astrophysik als eigene Kategorie, als Kontextklasse, in dieser Studie vor und wurde nach der Humanbiologie von Schülerinnen und Schülern als interessantestes Fach ausgewählt [vgl. z. B. 4]. Auch bei den thematischen Inhalten liegt die Astronomie direkt hinter der Medizin und der Gesundheit und ist damit als Inhaltsfeld für den Schulunterricht geradezu prädestiniert [4]. Die Studie gehört zu den wohl umfangreichsten Studien in den vergangenen Jahren. Die Ergebnisse sind aktuell, doch ist natürlich auch zu bedenken, dass bei einer so breit angelegten Studie konkrete und stichhaltige Schlussfolgerungen zu extrem spezifizierten Themeninhalten schwer fallen, da vieles in pauschaler und generalisierter Form abgefragt wird. So ist es beispielsweise nicht überraschend, dass die Astronomie und Astrophysik als interessantes und motivierendes Inhaltsgebiet für Schülerinnen und Schüler zählen, aber ob dies auch konkret für die Thematik der Dunklen Materie gilt, bleibt fraglich. Studien zum Interesse und zur Relevanz der Dunklen Materie im Schulunterricht sowohl aus Sicht der Schülerinnen und Schüler als auch aus Sicht der unterrichtenden Lehrkräfte sind bislang nicht durchgeführt worden. Im Rahmen dieser Arbeit ist dies – auch wenn der Fokus dieser Promotionsschrift nicht auf statistischen Erhebungen liegt – zumindest mit einer geringen Anzahl an Personen durch eine Stichprobenanalyse realisiert worden. Schülerinnen und Schüler sowie Lehrkräfte sind befragt worden, zum Teil geschah dies

mit einem vorher entwickelten Fragebogen, zum Teil auch in Interviews. Es ist daher anzumerken, dass für die hier vorliegende Arbeit keine weitgehende Analyse der Interessens- und Motivationslage sowie des Vorwissens erfolgen soll. Der Stichprobenumfang ist für dieses Ziel, einen ersten Überblick zu erhalten, ausreichend. Die Erhebungen mit Hilfe von Fragebögen und Interviews sind vom Verfasser dieser Arbeit an zwei Schulen im Bundesland Nordrhein-Westfalen durchgeführt worden. Dieses Kapitel soll einen Überblick über die erhobenen Daten und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen bieten.

3.2.1 Stichprobenbefragung von Schülerinnen und Schülern

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit 256 Schülerinnen und Schüler an zwei unterschiedlichen Gymnasien im ländlich geprägten Raum im Bundesland Nordrhein-Westfalen gebeten, einen Fragebogen auszufüllen, auf den nachfolgend genauer eingegangen wird. Alle Schülerinnen und Schüler gingen zum Zeitpunkt der Befragung in die Oberstufe und haben das Fach Physik entweder als Grundkurs oder als Leistungskurs gewählt. Nach der Durchführung der schriftlichen Befragung wurden drei Lernende exemplarisch aus dem Physik-Leistungskurs in einem Interview persönlich befragt. Die Vorgehensweise bei der schriftlichen und der persönlichen Befragung sowie die Ergebnisse sollen kurz dargelegt werden.

Schriftliche Befragung

Die schriftliche Befragung bestand aus insgesamt sieben Fragen. Ziel der folgenden Analyse ist es, das Interesse der Schülerinnen und Schüler für astronomische Themen sowie den Wissensstand abzuschätzen. Die Schülerinnen und Schüler hatten eine halbe Stunde Zeit, den Fragebogen auszufüllen. Die Daten wurden anonym erhoben. Der Fragebogen ist in Anhang A.1 angefügt. Die Fragen sowie die gewählten Antwortformate werden nachfolgend nur kurz dargestellt.

1. *Wie sehr interessierst Du dich für astronomische Themen?*

Die Schülerinnen und Schüler beantworten diese Frage durch Setzen einer Markierung auf einer fünfstufigen LIKERT-Skala mit den beiden Extrema „gar nicht“ und

„sehr“.

2. *Hast Du dich schon einmal mit astronomischen Themen oder Fragestellungen in deiner Freizeit beschäftigt?*

Die Schülerinnen und Schüler kreuzen entweder „Ja“ oder „Nein“ an.

Wenn „Ja“, womit genau hast Du dich beschäftigt?

Die Schülerinnen und Schüler beantworten diese Frage in einem Text.

3. *Wie ist unser Sonnensystem aufgebaut?*

Die Schülerinnen und Schüler beantworten diese Frage in einem Text.

4. *Was ist eine Galaxie?*

Die Schülerinnen und Schüler beantworten diese Frage in einem Text.

5. *Was hast Du bereits von der Theorie des Urknalls gehört?*

Die Schülerinnen und Schüler beantworten diese Frage in einem Text.

6. *Was hast Du bereits von Dunkler Materie gehört?*

Die Schülerinnen und Schüler beantworten diese Frage in einem Text.

7. *Wie beurteilst Du die Wichtigkeit der Dunklen Materie für unser heutiges Weltbild?*

Die Schülerinnen und Schüler beantworten diese Frage in einem Text.

Bei der Auswertung zeigte sich, dass bei Schülerinnen und Schülern ein durchweg großes Interesse für astronomische Themen besteht. 71% der befragten Personen haben auf der Skala zu Frage 1 angegeben, dass sie sich für astronomische Themen interessieren oder sehr interessieren. Ein signifikanter Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Personen konnte hier nicht festgestellt werden. Bemerkenswert ist außerdem, dass sich nur extrem wenige Schülerinnen und Schüler gar nicht für diese Thematik begeistern können. Der prozentuale Anteil hierfür liegt bei 7%. Allein diese Frage deutet überzeugend an, dass astronomische Themen in die Lehrpläne der Länder verbindlich aufgenommen werden sollten. Das Interesse von Schülerseite dürfte nach dieser Stichprobenbefragung in Übereinstimmung mit der zuvor zitierten ROSE-Studie sehr hoch zu sein.

	Astronomische Themen sind ...									
	nicht interessant		wenig interessant		weder interessant noch uninteressant		interessant		sehr interessant	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%	abs.	%	abs.	%
männlich	11	8%	14	10%	14	10%	49	35%	51	37%
weiblich	8	7%	5	4%	22	19%	44	38%	38	32%
gesamt	19	7%	19	7%	36	14%	93	36%	89	35%

Tabelle 3.3: Darstellung der Ergebnisse zum Schülerinteresse für astronomische Themen.

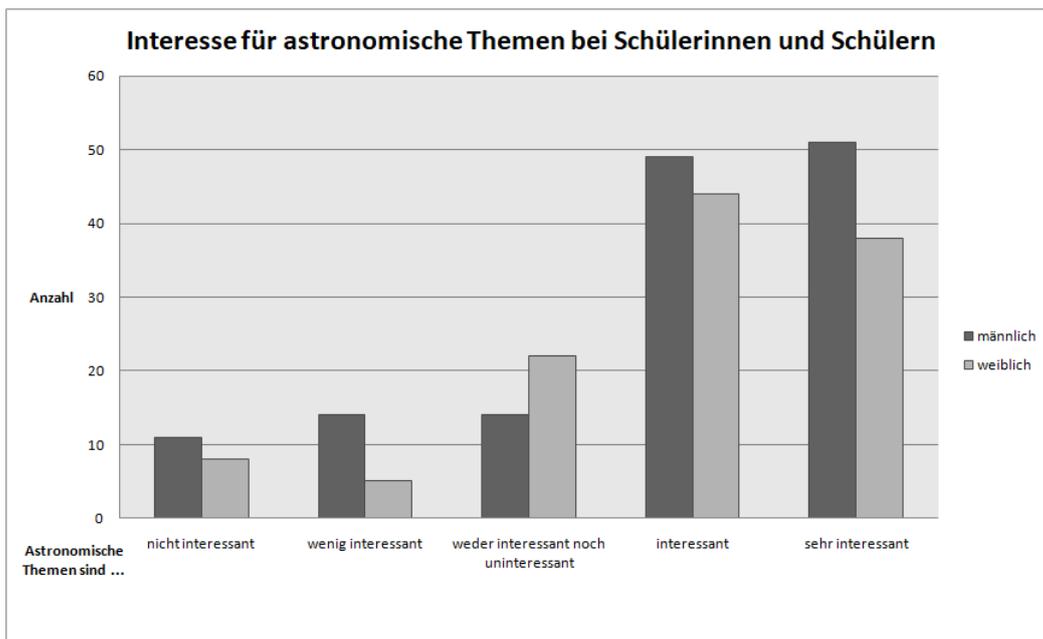


Abbildung 3.3: Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Interesse für astronomische Themen bei Schülerinnen und Schülern.

Mit der zweiten Frage des Fragebogens sollte dann erhoben werden, ob sich Schülerinnen und Schüler bereits in der Freizeit mit astronomischen Themen beschäftigt haben. Die Ergebnisse hierzu sind enttäuschend. Gerade einmal ein Drittel der befragten Personen hat sich bereits mit astronomischen Inhalten beschäftigt. Die von den Schülerinnen und Schülern angegebenen Inhalte sind folgende:

- Filme (Dokumentationen) zu astronomischen Themen angeschaut [43 mal angegeben],
- Planetarium besucht [24 mal angegeben],
- Nachthimmel beobachtet (ohne Teleskop) [31 mal angegeben],
- Nachthimmel beobachtet (mit Teleskop zuhause oder im privaten Umfeld) [8 mal angegeben],
- Nachthimmel beobachtet (mit Teleskop an einer Sternwarte) [2 mal angegeben].

Trotz des großen Interesses beschäftigen sich offenbar nur wenige Schülerinnen und Schüler mit astronomischen Inhalten. Diese Tatsache erscheint umso gravierender, wenn man feststellt, dass eigene Beobachtungen, auch wenn es nur ein bewusstes Schauen in den Nachthimmel ist, noch nicht einmal jeder sechste Schüler vorweisen kann.

Die Auswertung der Fragen 3 bis 7 zeigt enorme Wissenslücken bei Schülerinnen und Schülern. Kategorisiert man die Antworten mit „richtig“, „teilweise richtig“, „falsch“ und „nicht beantwortet“, so erkennt man, dass bei den anfänglich leichten Fragen (Nummer 3 und 4) noch ein einigermaßen akzeptabler Wissensstand vorhanden zu sein scheint. Bei den Fragen zur Dunklen Materie (Nummer 6 und 7) sowie zum Urknall zeigt sich, dass hier nur wenige Schülerinnen und Schüler korrekte oder teilweise korrekte Antworten liefern. Besonders auffallend ist, dass gerade bei der Thematik der Dunklen Materie keine gängige Vorstellung bei den Lernenden verbreitet zu sein scheint, was man darunter versteht. Somit fällt auch die Beurteilung der Wichtigkeit der Dunklen Materie für unser heutiges Weltbild schwer. Über 90% der Schülerinnen und Schüler konnten hier keine Antwort geben. Da die Ergebnisse zu Frage 7 naturgemäß von den Ergebnissen

zu Frage 6 abhängen, werden sie in nachfolgender Graphik (Abbildung 3.4) nicht mit aufgeführt.

	richtig beantwortet	teilw. richtig beantwortet	falsch beantwortet	nicht beantwortet
Sonnensystem	179	69	6	2
Galaxie	84	145	23	4
	ausführliche korrekte Darstellung	teilweise korrekte Darstellung	falsche Darstellung	nicht beantwortet
Urknall	52	78	104	22
Dunkle Materie	17	36	51	152
Dunkle Materie + Weltbild	3	12	2	239

Tabelle 3.4: Darstellung der Ergebnisse zum Fachwissen der Schülerinnen und Schüler zu ausgewählten Schwerpunkten.

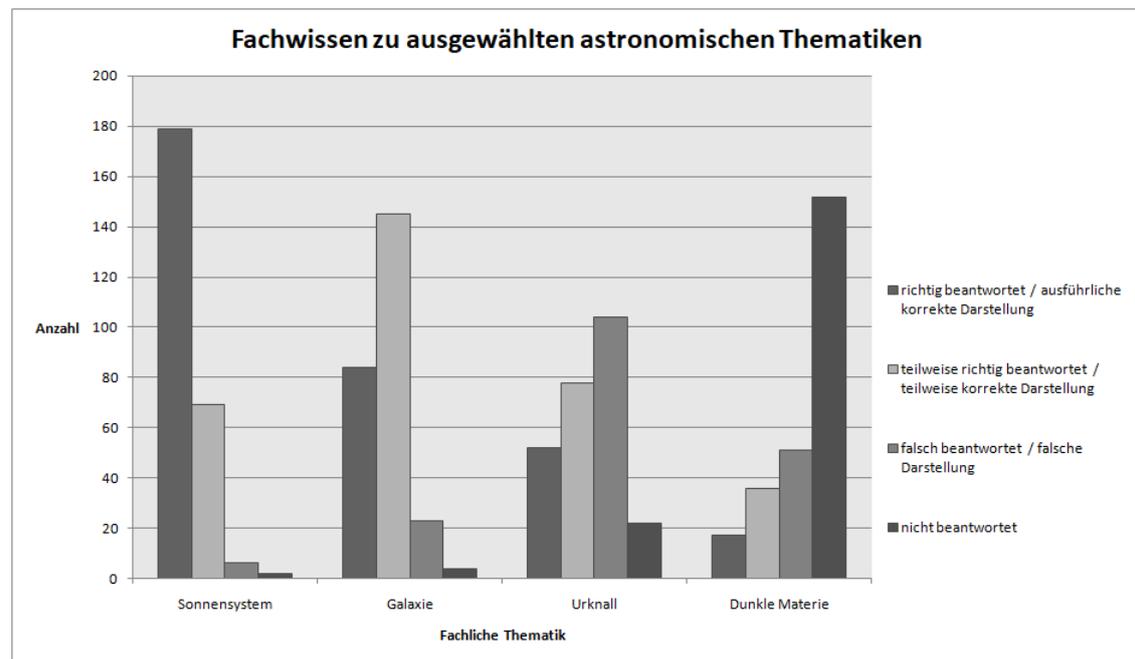


Abbildung 3.4: Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Fachwissen von Schülerinnen und Schülern zu ausgewählten grundlegenden astronomischen Inhalten.

Insgesamt bleibt somit festzuhalten, dass sich die befragten Schülerinnen und Schüler in jedem Fall für astronomische Themen interessieren, sich aber in ihrer Freizeit nur zu einem geringen Teil bereits mit astronomischen Beobachtungen oder ähnlichem auseinander gesetzt haben. Die fachlichen Kenntnisse auf diesem Gebiet scheinen nicht besonders stark ausgeprägt zu sein. Kenntnisse zur Dunklen Materie sind kaum vorhanden.

Persönliche Befragung

In einem Interview wurden drei Lernende aus dem Physik Leistungskurs einer Schule noch einmal zusätzlich persönlich nach ihrem Interesse für das Themenfeld der Dunklen Materie befragt. Ziel dieser Befragung war es, konkrete Schlussfolgerungen und Forderungen für den Schulunterricht aus Sicht der Schülerinnen und Schüler zu entwickeln. Dies geschieht am besten in einem persönlichen Gespräch, sodass hier drei Lernende von unterschiedlichem Leistungsniveau exemplarisch ausgewählt und befragt wurden. Das Interview ist protokolliert worden und kann Anhang A.2 entnommen werden.

Alle drei Personen zeigten Interesse an astronomischen Themen und zwar unabhängig vom Leistungsstand der Lernenden. Dass sie sich allerdings wenig bis gar nicht in ihrer Freizeit bewusst mit solchen Themen auseinander setzen, bestätigen alle drei. Die Gründe hierfür scheinen vielfältig zu sein. Zum Einen geben zwei von drei Befragten an, dass in der heutigen Gesellschaft astronomische Themen nicht mehr den Stellenwert haben wie vor einigen Hundert bis Tausend Jahren. Bei der Flut an Reizen, denen man heutzutage ausgesetzt wird, rücke das bewusste Wahrnehmen der uns umgebenden Welt sowie der Natur insgesamt in den Hintergrund. Dies sei ein flächendeckendes Phänomen in der Gesellschaft und in besonderem Maße bei Kindern und Jugendlichen ausgeprägt. Ein gezieltes Beobachten der Natur sei heutzutage sehr selten geworden. Auch im Unterricht geschehe dies in zunehmend geringerem Maße. Zum anderen geben die drei Lernenden an, dass im Schulunterricht zuweilen kein Bezug zu astronomischen Gegebenheiten genommen wird. Von neuen Entdeckungen und aktueller Forschung erfahren sie nur aus den Medien, können diese aber aufgrund fehlenden Wissens nicht oder kaum verorten. Zusammenhängendes Wissen zu einem Thema kann somit nicht initiiert werden. Aus Sicht der drei befragten Personen ergeben sich somit verschiedene Vorschläge für den

Schulunterricht:

- Grundlegende astronomische und astrophysikalische Kenntnisse sollten im Schulunterricht vermittelt werden. Solche Themen müssen also verbindlich in den Lehrplan aufgenommen werden.
- Es muss Bezug genommen werden auf aktuelle Ereignisse. Schule soll nicht nur die fest vorgeschriebenen Inhalte abarbeiten, sondern auch immer einen Bezug zu aktuellen Erkenntnissen herstellen.
- Für interessierte Schülerinnen und Schüler sollte ein zusätzliches Angebot entstehen. So ist beispielsweise in der Oberstufe mit der Wahl von Leistungskursen ein stark interessengeleitete Entscheidung seitens der Schülerinnen und Schüler zu fällen. Gerade hier kann die Astronomie als ein Schwerpunkt mit eingeführt werden.

3.2.2 Stichprobenbefragung von Lehrkräften

Neben den Lernenden sind im Rahmen dieser Stichprobenerhebung auch vier Lehrkräfte befragt worden. Die Lehrkräfte sind an drei verschiedenen Schulen in Nordrhein-Westfalen angestellt und unterrichten alle vier Physik in der Oberstufe. Unter den vier Lehrkräften befand sich auch ein Lehramtsanwärter. Das Interview kann in Anhang A.3 eingesehen werden. In dem Gespräch zeigte sich ein sehr differenzierter Blick auf das Lehren von astronomischen Inhalten. Es ergeben sich einige positive, aber auch negative Aspekte diesbezüglich, welche nachfolgend dargestellt werden.

Alle vier Lehrkräfte sehen astronomische Themen als motivierend für Schülerinnen und Schüler an. Der Reiz liegt zum Einen darin, dass der wohl älteste Bereich der Naturwissenschaften immer noch aktuell ist und viele mythische und geheimnisvolle Vorstellungen rund um unser Universum existieren. Auch die Tatsache, dass generell in der Gesellschaft nur wenig von den Grundzügen des Aufbaus sowie der Entwicklung des Universums bekannt ist, scheint ein Grund für das Unterrichten von astronomischen Inhalten in der Schule zu sein. Zur Aufnahme des Themenbereichs der Dunklen Materie äußern sich die Lehrkräfte ebenfalls positiv. Allein der Name übe schon eine gewisse Motivation aus,

erklärt der Lehramtsanwärter. Jedoch wird von drei Lehrkräften auch bestätigt, dass sie selbst nur wenig über die Dunkle Materie beziehungsweise die aktuelle Forschung in der Astronomie und Astrophysik hierzu wissen und sie sich daher nicht zutrauen würden, ein solches Thema ohne detailliert ausgearbeitetes Material zu unterrichten. Aus Sicht der hier befragten Lehrkräfte ergeben sich damit zwei konkrete Forderungen.

- In der Fachlehrerausbildung müssen angehende Lehrkräfte gezielt auf die astronomischen Unterrichtsinhalte vorbereitet werden. Dazu zählt ein verstärkter Schwerpunkt im Bereich Astronomie und Astrophysik, sodass die fachlichen und die fachdidaktischen Grundlagen für die spätere Vermittlung dieser Themen behandelt werden.
- Für das Unterrichten dieser Inhalte ist es ferner wünschenswert, Material an die Hand zu bekommen, welches als Orientierungsgrundlage dient. Sobald einzelne Inhalte, Experimente, Anleitungen, Aufgaben etc. als Unterrichtshilfe vorhanden sind, sinkt die Hemmschwelle bei Lehrkräften, die Themen dann auch tatsächlich zu lehren.

Dabei wird betont, dass eine explizite Ausarbeitung von Unterrichtsreihen nicht zielführend ist. Diese wirken einengend und sind in der Regel so nicht direkt übertragbar. Sinnvoller ist die Vorstellung der fachlichen Grundlagen, didaktische Hinweise, Vorstellung von Experimenten und Aufgaben, die jeder Lehrkraft ermöglichen, flexibel und individuell ihren Unterricht zu planen.

3.3 Schlussfolgerungen

Nach der Schlubuch- und Lehrplananalyse sowie der Schülerbefragung und den Schüler- und Lehrerinterviews ergeben sich einige Schlussfolgerungen, die zusammenfassend hier dargestellt werden sollen.

1. Einfache astronomische Zusammenhänge sind meist verbindlich für die Unterstufe vorgeschrieben (Entstehung der Jahreszeiten, etc.), wohingegen weiterführende und komplexere Themen entweder gar nicht oder als optionaler Inhalt beispielsweise im Wahlpflichtbereich aufgegriffen werden.

Die Thematik der Dunklen Materie wird in keinem untersuchten Lehrplan explizit als Unterrichtsthematik aufgeführt.

2. In aktuellen Schulbüchern für die Sekundarstufe I und II werden astronomische Inhalte nur beiläufig behandelt. Die Dunkle Materie wird lediglich in einem untersuchten Schulbuch ausführlicher auf einer Doppelseite dargestellt, wobei anzumerken ist, dass tiefere und umfassendere Kenntnisse auch in diesem Schulbuch nicht vermittelt werden.
3. Schülerbefragungen zeigen, dass ein signifikant hohes Interesse für astronomische Themen vorhanden ist. Unterschiede zwischen Jungen und Mädchen lassen sich nicht feststellen.
4. Die fachliche Kenntnisse sind hingegen als nicht besonders hoch einzustufen. Gerade bei anspruchsvolleren Thematiken wie der Urknalltheorie oder der Dunklen Materie sind keine oder nur wenig Kenntnisse vorhanden.
5. Das Interesse der Schülerinnen und Schüler ist jedoch auch gerade bei diesen Thematiken besonders hoch. Gerade aktuelle Ereignisse und die moderne Forschung scheinen eine gewisse Faszination auszuüben. Die Dunkle Materie gehört zu den Themenfeldern, die in dieser Hinsicht Potential bieten.
6. Lehrkräfte sehen in astronomischen Inhalten, gerade auch in solchen mit aktuellen Bezügen, wie der Dunklen Materie, bereichernde Inhalte für den Unterricht. Sie ma-

chen jedoch auch auf die Problematik der fehlenden Qualifikation in ihrer eigenen Ausbildung aufmerksam und bemängeln fehlenden Materialien.

Es bleibt festzuhalten, dass astronomische Inhalte in den Schulunterricht integriert werden sollten. Das Thema der Dunklen Materie ist nicht nur aus wissenschaftlicher Sicht höchst relevant, sondern bietet auch faszinierende und motivierende Anknüpfungspunkte an moderne Forschung. Damit eine Integration im Unterricht gelingt, müssen angehende Lehrkräfte bereits im Studium mit diesem Thema konfrontiert werden, in der fachdidaktischen Aufbereitung geschult werden und Arbeitsmaterialien für den Unterricht an die Hand bekommen. In Schulbüchern muss die Thematik stärker vertreten sein und verbindlich durch den Lehrplan eingefordert werden. Mit den in dieser Arbeit entwickelten Materialien wird ein sinnvoller Beitrag für die Vermittlung der Inhalte zur Dunklen Materie geleistet.

KAPITEL 4

Fachdidaktische und methodische Einführung

4.1 Astronomie und die Frage nach ihrer Relevanz in Schule und Gesellschaft

Die Astronomie ist die wohl älteste Wissenschaft in der Geschichte der Menschheit und hat in der kulturellen, sozialen und religiösen Entwicklung von uns Menschen schon immer eine wesentliche Rolle gespielt. Ihre Anfänge sind bereits in der Steinzeit zu finden, als begonnen wurde, die Gestirne am Nachthimmel zu beobachten und zu verehren. Erste Gesetzmäßigkeiten, wie die gleichbleibende Zeitdauer von Vollmond zu Vollmond, wurden erkannt und in Verbindung mit dem weiblichen Zyklus gebracht. Dies belegen Wandmalereien in Höhlen, welche Frauen als Fruchtbarkeitsgöttin neben dem Mond zeigen. In den frühen Hochkulturen wurden dann erste Kalender erstellt. Dies ist den Aufzeichnungen der Ägypter und weiteren Kulturkreisen zu entnehmen. So konnten auch einzelne regelmäßige Naturereignisse, wie beispielsweise die Nilschwemme bei den Ägyptern, anhand der Kalender vorhergesagt werden. Die astronomischen Beobachtungen hatten also einen hohen praktischen Nutzen im Leben der Menschen. Auch die Tatsache, dass Gottheiten mit astronomischen Objekten in Verbindung gebracht wurden, zeigt die damalige Bedeutung der Astronomie für die Menschen. In allen Hochkulturen wurden solche Verbindungen geschaffen. Als Beispiel sei hier nur die Verehrung der Sonne und dem damit verbundenen Sonnengott genannt. So hieß dieser bei den Ägyptern Ra, bei den Griechen Helios, bei den Römern Sol und auch die Kelten, Germanen, die Maya und Azteken hatten ihre eigenen Sonnengötter. Man erkennt also bereits an den

altertümlichen Gottheiten die Ehrfurcht der Menschen vor den Himmelskörpern und die Identifikation mit etwas Göttlichem. Auch die Ausrichtung von Tempeln, Kirchen, Altären und Gräbern nach den Gestirnen zeigt den starken Einfluss der Astronomie auf die Kultur, die Lebensweise und die Religion der Menschen. Astronomische Beobachtungen und Erkenntnisse spielten also in vielen Bereichen des damaligen Lebens eine große Rolle und waren immer auch verknüpft mit mythologischen und religiösen Ansichten. Erst die Griechen versuchten dann die der Natur zugrunde liegenden Ordnung durch mathematische Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben. Das Weltbild der Menschen war zwar immer noch religiös und mythisch geprägt, allerdings lassen sich bei den Griechen die Anfänge eines rationalen, naturwissenschaftlichen Weltbildes erkennen. Mit der kopernikanischen Wende im 16. und 17. Jahrhundert gelang dann der Wechsel vom antiken zum neuzeitlichen Weltbild. Immer mehr spalteten sich Religion und Naturwissenschaft voneinander ab und wurden zu getrennten – zum Teil auch konkurrierenden – Wissenschaften. Heutzutage ist die Astronomie eine eigenständige Wissenschaftsdisziplin, in der nicht mehr nur die reine Beobachtung von Phänomenen am Nachthimmel, sondern vielmehr auch existenzielle Fragen vor naturwissenschaftlichem Hintergrund eine Rolle spielen. Mit technisch hochentwickelten Teleskopen sind wir heute in der Lage, so tief ins Universum zu schauen wie nie zuvor. Die Erkenntnisse, die Astronomen durch ihre Beobachtungen und Experimente erlangen, bringen uns immer einen Schritt weiter bei der Beantwortung grundlegender existentieller Fragen, wie „Wann und wie ist das Universum entstanden?“, „Wie wird sich das Universum weiter entwickeln?“, „Wie wird sich unser Sonnensystem und die Menschheit auf der Erde weiter entwickeln?“. Diese Fragen sind vom Grundprinzip her immer schon vor dem jeweils kulturell dominierenden Weltbild gestellt worden. Die Beantwortung erscheint heutzutage einerseits vielschichtiger und komplexer zu sein als vor einigen hundert Jahren und andererseits ist auch eine moderne Antwort auf diese Fragen noch nicht zufriedenstellend und gibt weiterer astronomischer Forschung vor diesem Hintergrund immer wieder eine neue Existenzberechtigung. Die Astronomie und auch die Naturwissenschaften im Allgemeinen sind heute dennoch gerade im Alltag der meisten Menschen nicht mehr so stark vertreten wie

früher. In unserer heutigen Welt, die durch den Fortschritt technischer Anwendungen und die Ergebnisse naturwissenschaftlicher Forschung geprägt ist, herrscht eine starke Diskrepanz zwischen eben jener Forschung und dem Bildungsniveau breiter Bevölkerungsschichten [vgl. 22, S. 12]. Dies liegt vor allem daran, dass das Bildungsniveau nicht mit den technischen und wissenschaftlichen Entwicklungen mithalten kann. Dennoch ist es wichtig, dass die Naturwissenschaften und damit auch die Astronomie als wesentliches Kultur- und Bildungsgut nicht verloren gehen, sondern vermehrt durch die Bildungspolitik berücksichtigt werden. Diese Forderung, speziell für die Astronomie, ist keineswegs neu, sondern wurde auch schon von Adolph DIESTERWEG Mitte des 19. Jahrhunderts formuliert:

„Die Astronomie ist eine herrliche, erhabene, weil erhebende Wissenschaft. Darum sollte sie keinem, auch nicht einem Menschen vorenthalten werden.“
[23]

Natürlich muss berücksichtigt werden, dass aktuelle Forschung einen hohen Grad an abstraktem Denkvermögen und gleichzeitig auch einen breiten Fundus an Wissen erfordert, was aus den bereits genannten und weiteren Gründen nicht vorausgesetzt werden kann. Dennoch muss klar vermittelt werden, dass die Ergebnisse und Erkenntnisse naturwissenschaftlicher Forschung jeden Menschen direkt betreffen. Dies erkannte auch der Schriftsteller Friedrich DÜRRENMATT:

„Der Inhalt der Physik geht die Physiker an, die Auswirkungen alle Menschen.“ [24]

Die Astronomie hat in den letzten Jahrzehnten vielfältige Erfolge verbuchen können, deren Anwendungen im Leben vieler Menschen eine wichtige Rolle spielen. Zu nennen wären hier neben den Techniken zur Positions- und Längenbestimmung auch Entwicklungen im Bereich der Röntgen- oder Kamertechnik. Nur ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung von CCD-Sensoren (CCD – charge-coupled device), die heute nicht nur in Kameras eingesetzt werden, sondern auch in Faxgeräten und Scannern zu finden sind. Die Astronomie hat, entgegen der landläufigen Meinung, durchaus viele nützliche und

alltagsnahe Anwendungen im Leben der Menschen erst möglich gemacht.

Gerade aus diesen Gründen ist die Astronomie für die Gesellschaft und damit eben auch für die Bildung junger Menschen hoch relevant und sollte auch verstärkt im Schulunterricht in den Blick genommen werden (siehe hierzu auch [25]). Dass dies momentan unzureichend geschieht, ist nach einem Blick in die gültigen Lehrpläne der Länder sowie in die gängigen Schulbücher kaum zu leugnen. Im vorherigen Kapitel sind hierzu einzelne Curricula und Bücher analysiert und ein klares Defizit bei der Behandlung astronomischer Themen im Schulunterricht festgestellt worden. An dieser Stelle scheint es also notwendig zu sein, die Bedeutung der Astronomie für den Schulunterricht klar herauszustellen. Der Schulunterricht basiert auf den Lehrplänen der Bildungsministerien der einzelnen Länder, welche in Curricula und Leitfäden ihre Vorstellungen einer allgemeinen Bildung verwirklichen. Im Sinne der Bildungstheorie, die maßgeblich auf Wolfgang KLAFKI zurückgeht, werden der Allgemeinbildung drei Bedeutungsmomente zugewiesen. Neben der Tatsache, dass Bildung für alle sein muss, wenn sie als demokratisches Bürgerrecht und als Bedingung der Selbstbestimmung anerkannt werden soll [26], sollte die Allgemeinbildung nach den Lehren KLAFKIS Frage- und Problemstellungen der Gegenwart und der Zukunft, welche alle Menschen angehen, behandeln. Auch sollte Allgemeinbildung *„als Bildung in allen Grunddimensionen menschlicher Interessen und Fähigkeiten verstanden werden“* [26, S. 54]. Vor diesem Hintergrund muss also eine Bedeutung der Astronomie für die Gesellschaft begründet werden, damit sie als Unterrichtsinhalt das Ziel der Vermittlung einer möglichst umfassenden Allgemeinbildung unterstützt. Die nachfolgenden vom Verfasser dieser Arbeit aufgestellten Thesen stellen verschiedene Begründungszusammenhänge dar und bieten somit einen Überblick der wichtigsten Argumente für die Behandlung astronomischer Themen in der Schule im Sinne der durch die Bildungstheorie definierten und geforderten Allgemeinbildung.

- *Die Astronomie ist ein Teil der Naturwissenschaften und hat vielfältige Berührungspunkte zu anderen Disziplinen.*

Die Astronomie gilt heute oftmals als Teil der Physik, kann aber auch als eigenständige Disziplin angesehen werden. Unabhängig davon, wie man dazu steht, ist

und bleibt die Astronomie ein Teil der Naturwissenschaften und hat aufgrund ihrer Entwicklung und ihrer vielfältigen Forschungsgebiete Anknüpfungspunkte an die Mathematik, die Molekularbiologie, die Chemie, die Technik sowie diverse Unterdisziplinen der Physik [27, S. 37]. Zu nennen wären hier vor allem die Mechanik, die Relativitätstheorie, die Atom- und Kernphysik sowie die Elementarteilchenphysik, die Quantentheorie und viele weitere. Darüber hinaus zeigt sich, dass gerade bei aktuellen Forschungen auch immer wieder Fragestellungen der Philosophie und Ethik in den Vordergrund rücken [22, S. 14]. Dies verdeutlicht die Relevanz und fachliche Vernetzung der Astronomie.

- *Der Astronomie kommt vor allem durch ihre historisch-kulturelle Bedeutung auch eine große Relevanz für die Allgemeinbildung zu.*

Keine andere Disziplin in den Wissenschaften geht in der Geschichte ihrer Entwicklung so weit zurück wie die Astronomie [22, S. 12 f.]. Sie ist von Beginn an Teil der menschlichen Kultur gewesen und prägte das Bild der Menschen von sich, der Natur und der Welt. Mit zunehmendem wissenschaftlichen Fortschritt spaltete sich die Astronomie von der Religion und Philosophie immer weiter ab und bildet seitdem eine eigene Disziplin der Naturwissenschaften. In jedem Fall wird allein durch die historische Entwicklung und den großen Einfluss auf die menschliche Kultur die Bedeutung der Astronomie als allgemeinbildendes Kulturgut unterstrichen.

- *Die Astronomie beschäftigt sich mit den grundlegenden Fragestellungen unseres Kosmos, beleuchtet die Stellung des Menschen in diesem und ist daher wichtig, um sich selbst in der eigenen räumlichen und zeitlichen Stellung einordnen zu können.*

Durch unser heutiges Weltbild und die immer weiter fortschreitende Erkundung des Universums gelingt es immer mehr, uns als Menschen auf der Erde als kleinen Teil eines großen Ganzen zu sehen und uns innerhalb dieses großen Ganzen einzuordnen [vgl. 28, S. 100 ff.]. Gerade bei der Beantwortung philosophischer Fragen, wie die nach der Rolle der Erde oder des Menschen im Universum sowie nach der räumlichen und zeitlichen Einordnung, kommen astronomische Erkenntnisse

zum Tragen. Dadurch erst werden wir Menschen in unserem Selbstverständnis von uns und der Welt geprägt und als geistig unabhängige und selbst denkende Wesen bestätigt.

- *Die Astronomie eröffnet Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, Anwendungen im Alltag in ihrer Entwicklung und ihres ursprünglich intentionierten Einsatzgebietes zu verstehen.*

Die Forschung in der Astronomie zählt zur Grundlagenforschung und hat daher nicht immer einen direkt ersichtlichen Bezug zu Anwendungen im Alltag. Dennoch sind in der Astronomie Methoden und Instrumente entwickelt worden, die im modernen Leben kaum wegzudenken wären. So sind nicht nur Teleskope, sondern auch Kameras und Chips zur Bilderfassung Instrumente, die nicht nur der astronomischen Forschung dienen. Auch die Methoden zur Längen- und Positionsbestimmung werden heute in GPS-Geräten genutzt. Satelliten in der Erdumlaufbahn werden somit von Autos und Smartphones permanent genutzt und dienen des Weiteren auch zur digitalen Vernetzung auf dem Globus. Neben diesen Anwendungen hat die astronomische Forschung aber auch Erkenntnisse zur Röntgenstrahlung, radioaktiven Strahlung und Mikrowellenstrahlung hervorgebracht, die die Grundlage für die Entwicklung und Weiterentwicklung von Geräten in der Sicherheitstechnik und in der Medizin bilden. Es bleibt damit festzuhalten, dass der Nutzen der Astronomie sich heutzutage immer wieder bewusst gemacht werden muss. Sie hat zahlreiche Gebiete der Physik sowie unser alltägliches Leben stark beeinflusst.

- *Die Astronomie verschafft Schülerinnen und Schülern einen Einblick in interdisziplinäre und internationale Zusammenarbeit und Kooperation.*

Die Astronomie ist eben aufgrund der bereits erwähnten Anknüpfungspunkte mit vielen anderen Fachdisziplinen prädestiniert für interdisziplinäre Zusammenarbeit. Schülerinnen und Schülern wird somit ein vernetztes Wissen ermöglicht, welches zur Folge hat, dass die einzelnen Wissenschaften nicht mehr nur für sich betrachtet werden können, sondern vielmehr die wechselseitigen Beziehungen zwischen diesen

verstanden werden müssen. Dies wiederum hat ein umfassenderes und erfüllenderes Wissen für einen selbst zur Folge.

Neben der Interdisziplinarität ist aber auch die internationale Zusammenarbeit in der Astronomie beispielhaft. Denn viele Messungen bedürfen Beobachtungen von verschiedenen Standpunkten der Erde aus. Auch die Verschaltung und Vernetzung von Messinstrumenten auf der ganzen Welt ermöglichen neue Erkenntnisse. Ein Beispiel hierfür ist das bekannte Event Horizon Telescope (EHT), welches Radioteleskope auf der ganzen Welt miteinander verbindet und damit eine höhere Winkelauflösung erreicht als sie jedes Einzelteleskop für sich genommen hätte [vgl. ausführlicher in 29]. Ohne diese Zusammenschaltung wäre 2019 nicht die hochauflösende Aufnahme eines Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87 [29, S. 5] möglich gewesen.

- *Die Astronomie fasziniert uns Menschen und ermöglicht es Schülerinnen und Schülern, die Natur unter ästhetischen und gleichermaßen mathematischen Gesichtspunkten wahrzunehmen.*

Es darf bei all der wissenschaftlichen Forschung und technologischen Entwicklung eines nicht vergessen werden: Die Astronomie ist faszinierend. Der Blick in den Nachthimmel ist faszinierend und mysteriös zugleich. Der Blick nach oben sorgt bei uns Menschen gleichermaßen für Demut und Bewunderung, denn schließlich offenbart sich mit dem Blick nach oben die Weite des Kosmos mit all seinen Geheimnissen, die bis heute zum Teil nicht verstanden sind. Der Versuch, unser Universum durch einfache, grundlegende Muster zu beschreiben, Entwicklungen zu verstehen und Prozesse vorherzusagen, stellt eine fundamentale Struktur naturwissenschaftlichen Denkens dar und lenkt den Blick durchaus auch auf die Ästhetik des Universums an sich sowie auf die Ästhetik der mathematischen Beschreibung dessen.

All diese Punkte zeigen, dass die Astronomie bedeutsam ist – für den Unterricht in der Schule und damit auch für die vermittelte Allgemeinbildung aller Heranwachsenden in

unserer heutigen Gesellschaft.

4.2 Elementarisierungen

Gerade für den Schulunterricht müssen astronomische Themen und Inhalte aufgrund ihrer Komplexität und Vernetzung zu vielen anderen Disziplinen für die Lernenden in angemessener Art und Weise vereinfacht werden, ohne die fachliche Richtigkeit zu vernachlässigen. Diese Reduzierung der Komplexität kann im Allgemeinen dadurch geschehen, dass der betreffende Unterrichtsinhalt in seinen elementaren Grundideen erschlossen wird und in einzelne Unterrichtselemente zerlegt wird. Diese Elementarisierung wird somit als „*Vereinfachung von realen oder theoretischen Entitäten*“ [30, S. 115] aufgefasst. Durch diese Vereinfachung wird gewährleistet, dass ein komplexer Inhalt (I) nach seiner Zerlegung in einzelne (Sinn-)Elemente (E) im Unterricht durch mehr oder weniger additive Aneinanderreihung dieser wieder den ursprünglichen Inhalt ergeben kann [32, S. 108]. Dies entspricht dem klassischen Vorgehen der Zergliederung und Rekonstruktion, wobei hier ausdrücklich darauf hingewiesen sei, dass durch eine sich von vorher unterscheidende Gewichtung der einzelnen (Sinn-)Elemente eine neue Qualität des Inhalts erreicht werden kann. Diese Gewichtung wird durch die Gewichtungsfaktoren α_i zum Ausdruck gebracht:

$$I = \sum_i \alpha_i E_i \quad .$$

Dabei ist die unterrichtende Lehrkraft verantwortlich für die Zerlegung des Inhalts in die elementaren Sinnelemente. Diese Zerlegung ist keineswegs beliebig, sondern sollte wohl bedacht werden, da sie an gewisse Bedingungen geknüpft ist. Es muss nach Ernst KIRCHER und Raimund GIRWIDZ gewährleistet sein, dass die Zerlegung angemessen, fachlich richtig sowie zielführend [32, S. 130 f.] ist. Nach Auffassung des Autors dieser Arbeit sollte sie außerdem entwicklungsfähig sein. Diese vier Bedingungen sollen nachfolgend kurz erläutert werden.

1. *Angemessenheit*

Die einzelnen Sinnelemente müssen schülergerecht sein, sich also nach der kognitiven Leistungsfähigkeit und den bereits gebildeten kognitiven Strukturen richten. Hierzu zählt vor allem die Berücksichtigung des Vorwissens und der Interessen der Schülerinnen und Schüler, aber auch die Einplanung von typischen Schülerfehlvorstellungen.

2. *Fachliche Richtigkeit*

Auch wenn die einzelnen Sinnelemente schülergerecht gewählt werden sollen, darf die fachliche Richtigkeit nicht verloren gehen. Dabei dürfen physikalische Begriffe und Zusammenhänge nicht verfälscht werden. Es muss gewährleistet sein, dass den Schülerinnen und Schülern ein korrektes Bild der zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien vermittelt wird.

3. *Zielorientierung*

Die Elementarisierung muss einem klaren Ziel folgen. Der Lehrer muss sich vorab die Frage nach seinem Lernziel für die Schülerinnen und Schüler stellen und darauf ausgerichtet die Wahl der einzelnen Sinnelemente treffen. Dabei muss jedes Sinnelement die Schülerinnen und Schüler dem Lernziel näher bringen.

4. *Entwicklungsfähigkeit / Anschlussfähigkeit*

Ebenso muss durch die Elementarisierung die Entwicklungsfähigkeit der kognitiven Strukturen der Schülerinnen und Schüler gewährleistet bleiben. Der elementarisierte Inhalt muss in bestehende Strukturen eingeordnet werden oder mit anderen Strukturen und Inhalten vernetzt werden, sodass ein umfassendes und in sich stimmiges Bild unserer Welt und der Physik vermittelt wird. Dies bedeutet, dass bei der Planung der elementaren Sinnelemente Anknüpfungspunkte geschaffen werden müssen, damit eben die Einordnung und Strukturierung erfolgen kann. Es muss gewährleistet werden, dass bei weiterem Lernen eine stärkere oder neue Verflechtung der kognitiven Strukturen der Schülerinnen und Schüler möglich ist.

Diese vier Punkte bieten einen Orientierungsrahmen für die Wahl der elementaren Sinneinheiten. Die konkrete Ausarbeitung dieser ist dann von den formalen Gegebenheiten

und Rahmenbedingungen abhängig. Hierzu gehören neben der Raumsituation und der Einordnung der zu unterrichtenden Stunde in die Gesamtstruktur des Schullebens auch die Ausstattung der Schule mit Blick auf Experimente oder digitale Medien. Gerade für die Elementarisierung astronomischer Themen im Schulunterricht kommt diesen Rahmenbedingungen eine besondere Rolle zu, da direkte Experimente und Beobachtungen kaum realisierbar sind. Eine Hilfestellung zur Elementarisierung in der Physik sind beispielsweise die von Ernst KIRCHER aufgestellten Verfahren [30, S. 123], die nachfolgend mit vom Verfasser gewählten Beispielen aus der Astronomie vorgestellt werden.

Elementarisierungsverfahren	Astronomisches Beispiel
Beschränken auf das Phänomen	Phänomen der Sonnen- und Mondfinsternis.
Beschränken auf das Prinzip	Eine Sonnenfinsternis kommt dann zustande, wenn die Sonne beim Blick von der Erde aus vom Mond verdeckt wird.
Beschränken auf das Qualitative	Die Energie der Sonnenstrahlung ist frei werdende Energie aus Fusionsprozessen von Wasserstoff zu Helium in der Sonne.
Experimentell veranschaulichen	Die Lichtablenkung durch den Gravitationslinseneffekt kann mit Glaslinsen veranschaulicht werden.
Bildhaft veranschaulichen	Sternbilder oder Planetenbahnen stellen eine bildhafte Veranschaulichung dar.
Zerlegen in mehrere methodische Schritte	Das Prinzip bei der Messung der Rotationskurve einer Galaxie kann in einzelne methodische Schritte zerlegt werden (vgl. Modul 1 in dieser Arbeit).
Einbeziehen historischer Entwicklungsstufen	Bei der Vermittlung unseres heutigen Weltbildes kann auch die historische Entwicklung berücksichtigt werden.

Tabelle 4.1: Verfahren zur Elementarisierung nach [30, S. 123] und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie.

Für das Ziel dieser Arbeit, nämlich der Entwicklung von Lehr-Lern-Modulen zur Dunklen Materie, sind Elementarisierungen wichtig und dringend geboten, um die zugrunde lie-

genden physikalischen Prinzipien klar und verständlich herauszustellen. In den Modulen zur Dunklen Materie wird daher immer auch ein Abschnitt zur Übertragung auf den Schulunterricht und zur didaktischen Reduktion vorgestellt. Diese Abschnitte werden jedoch keine konkreten Handlungsanweisungen für die Lehrerinnen und Lehrer darstellen, da für die Art der Elementarisierung – wie oben beschrieben – gewisse Rahmenbedingungen und Voraussetzungen bekannt sein müssen. Es werden daher allgemeine Möglichkeiten der Elementarisierung und zu berücksichtigende Besonderheiten bei den jeweiligen Modulen dargestellt.

4.3 (Analogie-)Experimente

Ein wesentlicher Bestandteil der Erkenntnisgewinnung in der Physik und damit auch zentrales Element im Physikunterricht sind Experimente. In der Fachdidaktik unterscheidet man hier zwischen Experimenten und Versuchen, wobei beide Begriffe häufig nicht eindeutig, sondern vielmehr synonym verwendet werden [31]. Versuche sind aus didaktischer Sicht als Vorgänge zu betrachten, „um *physikalische Phänomene zu veranschaulichen und physikalische Vorstellungen zu vermitteln*“ [32, S. 277]. Ein Experiment hingegen ist ein Vorgang, der zur Erkenntnisgewinnung dient. Es handelt sich um eine unter kontrollierbaren Bedingungen geplante Durchführung oder Beobachtung eines physikalischen Prozesses, mit dem Ziel eine klar formulierte Ausgangsfrage anhand der gesammelten Daten und der dann erforderlichen Analysen zu beantworten. In der Wissenschaft ist dieses Vorgehen, die experimentelle Methode, ein zentrales Element, um aufgestellte Thesen oder Prognosen auf ihre Richtigkeit zu überprüfen (Bestätigung oder keine Bestätigung) und gegebenenfalls zu überarbeiten.

Das folgende Kapitel soll die Rolle des Experiments und der experimentellen Methode in der Physik sowie die für diese Arbeit wichtigen fachdidaktischen und methodischen Grundlagen zur Konzeption von Analogieexperimenten herausstellen. Hierbei wird auch die Erfassung und Analyse der Messwerte eine Rolle spielen, die gerade vor dem Hintergrund der immer weiter fortschreitenden Digitalisierung der Schulen und damit auch des

Unterrichts mit digitalen Mitteln erfolgen soll. Dementsprechend widmet sich Kapitel 4.3.3 der digitalen Messwerterfassung und Datenanalyse.

Es wird sich nachfolgend herausstellen, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Experimente keine klassischen Analogieexperimente sind, sondern dass hier vielmehr eine Vermischung von Simulation, Beobachtung und Experiment vorliegt. Es lohnt sich, dies tiefergehend zu analysieren, sodass in dem hier vorgestellten Kapitel zunächst die klassische didaktische Einführung erfolgt und im Kapitel 4.4 dann ein konkreter Bezug zu den in dieser Arbeit entwickelten Experimenten geschaffen wird mit dem Ziel, diese entsprechend der didaktischen Klassifikationen einzuordnen.

4.3.1 Die Bedeutung des Experiments in der Physik

Die Physik als Naturwissenschaft bezieht neue Erkenntnisse aus aufgestellten Theorien und den daraufhin durchgeführten Experimenten. Neue Gesetzmäßigkeiten in der Physik werden nach einem bestimmten Muster aufgestellt, der in der Fachdidaktik als experimentelle Methode bekannt ist. Ausgehend von theoretischen Überlegungen werden Gesetzmäßigkeiten zunächst auf hypothetischer Basis entwickelt und anschließend mit Hilfe eines Experiments überprüft. Das Experiment lässt sich somit als gezielte Frage an die Natur verstehen. Stehen die experimentell gewonnenen Daten in Einklang mit den vorherigen theoretischen Überlegungen, so ist die Theorie erfüllt und kann als hinreichend valide angesehen werden. Stehen die experimentellen Daten im Widerspruch zur vorherigen Überlegung, so muss die Theorie modifiziert oder eine neue Theorie entwickelt werden. Ein vom Autor entwickelter schematischer Ablaufplan der experimentellen Methode ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Erkenntnisprozess in der Physik häufig schwieriger und komplexer ist als hier in generalisierter Form dargestellt werden kann. Es wird hier also nur ein allgemeiner Prozess beschrieben, der aber durchaus das grundlegende Prinzip in adäquater Weise zum Ausdruck bringt.

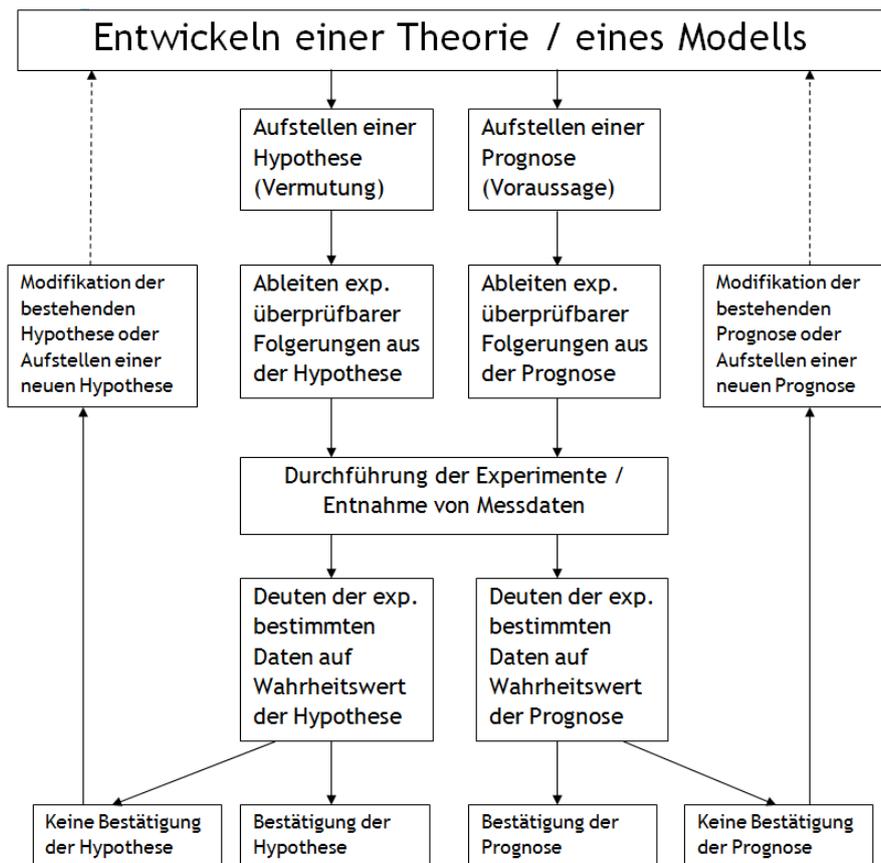


Abbildung 4.1: Die experimentelle Methode: Ein Ablaufplan nach eigenem Vorschlag.

Die experimentelle Methode ist die zentrale Erkenntnismethode in der Physik und sollte daher auch im Schulunterricht genutzt werden. Sie setzt natürlich die Kenntnisse der Theorie voraus, sodass sie für Schülerinnen und Schüler einen höheren Anspruch hat als der umgekehrte Weg, nämlich Erkenntnisse aus Experimenten zu verallgemeinern und damit auf induktivem Wege gewonnene Gesetzmäßigkeiten aufzustellen. Am Gymnasium sollte auf jeden Fall die experimentelle Methode genutzt werden, da letztendlich nur sie zur Formulierung angemessener begrifflicher Verständnisumgebungen führt. Es muss den Schülerinnen und Schülern auch klar gemacht werden, dass ein Experiment nur die Theorie bestätigen oder widerlegen, aber keine neue Theorie aufstellen kann. Aus Daten eines Experiments lassen sich keine allgemeingültigen Gesetze ableiten, allenfalls Indizien gewinnen, die aber natürlich wichtige Hinweise bei der Formulierung von Theorien

darstellen.

Das Experiment hat jedoch gerade im Schulunterricht nicht nur die Aufgabe, den erkenntnistheoretischen Weg der Fachwissenschaft Physik abzubilden, sondern noch viele weitere. So richten sich die Funktionen des Experiments auch immer nach den jeweils verfolgten Zielen des Unterrichts. Hier unterscheidet man in der Fachdidaktik im Wesentlichen sechs unterschiedliche Ziele, nämlich die Vermittlung von Fachwissen, das Lernen über die Natur der Naturwissenschaften, das Erlernen naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen, das Kommunizieren über Physik, das Entstehen neuer Vorstellungen sowie das Anregen von Interesse [33, S. 107]. Diese Ziele beeinflussen sich wechselseitig, lassen sich also in der Praxis nicht immer scharf voneinander trennen. Je nachdem, welches Ziel nun in einer Unterrichtssequenz verfolgt wird, kann ein Experiment hier unterschiedliche Beiträge zu leisten. Die Zielsetzung des Experiments wird also von der Zielsetzung des Unterrichts beeinflusst und umgekehrt. KIRCHER unterscheidet zwischen 14 verschiedenen Zielsetzungen, die ein Experiment haben kann [32, S. 279]. Nachfolgend sind diese Zielsetzungen mit Beispielen aus der Astronomie, vorwiegend mit beobachtendem Charakter, dargestellt.

Zielsetzung	Astronomisches Beispiel
Ein Phänomen klar und überzeugend darstellen	Das Phänomen der Sonnenfinsternis wird in einem abgedunkelten Raum mit einem Tellurium und einer eingeschalteter Lampe nachgestellt.
Physikalische Konzepte veranschaulichen	Die gebundene Rotation des Mondes um die Erde wird durch Nachstellen anhand der Bewegung zweier Schüler umeinander veranschaulicht.
Grunderfahrungen aufbauen bzw. ausschärfen	Ein Schüler leuchtet mit einer Lampe auf eine lichtempfindliche Scheibe und entfernt sich langsam von dieser. Die Lernenden begreifen intuitiv, dass ein Objekt eine geringere scheinbare Helligkeit hat, sobald es sich vom Beobachter entfernt.

Tabelle 4.2: Zielsetzungen von Schulexperimenten nach [32, S. 279] und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie – Teil 1.

Zielsetzung	Astronomisches Beispiel
Physikalische Gesetzmäßigkeiten direkt erfahren	Die unterschiedliche Stärke der Wärmestrahlung einer Lampe auf den menschlichen Körper kann von Schülerinnen und Schülern je nach Position der Lampe zum Körper gespürt werden. Dadurch wird ersichtlich, dass bei schräg einfallender Sonnenstrahlung die Bestrahlungsstärke sinkt.
Theoretische Aussagen qualitativ prüfen	Dass im Weltraum keine Schallwellen wahrgenommen werden können, da diese ein Ausbreitungsmedium (wie Luft oder Wasser) benötigen, kann mit einer Klingel unter einer Vakuumlöcher verdeutlicht werden.
Vorstellungen (Schülervorstellungen) prüfen	Eine typische Schülerfehlvorstellung in der Sternenkunde ist, dass der Polarstern der hellste Stern am Nachthimmel ist und man deshalb leicht Norden findet. Durch einen Blick in den Nachthimmel lässt sich diese Schülervorstellung leicht widerlegen.
Physik in Technik und Alltag aufzeigen	Die Verwendung von Linsen kann anhand von Teleskopen, Kameras, Mikroskopen, aber auch Brillen vor technischen und alltäglichen Anwendungen verdeutlicht werden.
Denkanstöße zur Wiederholung oder Vertiefung geben	Das Gravitationsgesetz zur Berechnung der Gravitationskraft zwischen Sonne und Erde kann dazu genutzt werden, um den bereits bekannten Wert der Fallbeschleunigung beim freien Fall auf der Erde auszurechnen.
Physikalische Vorstellungen aufbauen	Das Experiment zur Messung der Lichtgeschwindigkeit baut bei Schülerinnen und Schülern die Vorstellung auf, dass das Licht von weit entfernten Objekten lange braucht, um die Erde zu erreichen. Wir sehen somit das Objekt in der Vergangenheit.
Physikalische Gesetze quantitativ prüfen	Mit dem FOUCAULT'schen Pendel kann die Erdrotation nachgewiesen werden.

Tabelle 4.3: Zielsetzungen von Schulexperimenten nach [32, S. 279] und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie – Teil 2.

Zielsetzung	Astronomisches Beispiel
Physikalische Arbeitsweisen einüben	Beobachtungen mit Hilfe von Teleskopen üben grundlegende Techniken, wie Bedienung, Einstellung, Fokussierung ein. Auswertung von Daten übt das Umgehen mit Messwerten sowie die Analyse von Messwerten ein.
Motivieren und Interesse wecken	Beobachtungen mit Teleskopen, vielleicht sogar an Sternwarten, können motivieren und Interesse wecken. Ein Besuch von Schülersternwarten und Schülerlaboratorien ist in diesem Zusammenhang ebenfalls ein guter Ansatz, um im Bereich Astronomie Interesse zu wecken.
Nachhaltige Eindrücke vermitteln	Aufnahmen von Teleskopen oder Live-Aufnahmen aus der Raumstation ISS vermitteln in der Regel einen faszinierenden und damit nachhaltigen Eindruck bei Schülerinnen und Schülern.
Meilensteine unserer Kulturgeschichte aufzeigen	Experimenten zur Dynamik und zum Gravitationsgesetz kommt eine große Bedeutung bei der Entwicklung des Weltbildes zu.

Tabelle 4.4: Zielsetzungen von Schulexperimenten nach [32, S. 279] und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie – Teil 3.

Experimente dienen im Physikunterricht also nicht nur zur Abbildung der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung, sondern können vielerlei Funktionen erfüllen, die es bei der Planung von Unterricht zu berücksichtigen und einzusetzen gilt. Gerade auf dem Gebiet der Astronomie erscheint es zunächst so, als ob nur wenige Experimente durchführbar wären. Die gängigen Lehrmittelhersteller für Schulen (Phywe [34], Leybold [35], Conatex [36], Fruhmann [37] etc.) haben in ihrem Sortiment, wenn überhaupt, nur wenige Experimente und Experimentiersets für astronomische Themen. Dies ist nicht verwunderlich, da die Astronomie einerseits kaum in Lehrplänen verankert ist (siehe hierzu Kapitel 3) und andererseits auch nur wenige Experimente zu diesem Themenbereich möglich sind. Gerade dies macht es erforderlich, nach Analogien in anderen Themenbereichen der Physik zu suchen, um das zugrunde liegende Prinzip vor einem anderen, aber vergleichbaren, Kontext zu verdeutlichen.

4.3.2 Konzeption von Analogieexperimenten

Sobald das einem Experiment zugrunde liegende physikalische Prinzip auch vor einem anderen physikalischen Kontext in gleicher Art und Weise experimentell untersucht werden kann, spricht man in der Didaktik von einem Analogieexperiment. Nach der Definition von KIRCHER ist eine Analogie dann gegeben, „*wenn man aufgrund von Ähnlichkeiten mit Bekanntem oder durch einen Vergleich einen bis dahin unbekanntem Sachverhalt erkennt oder versteht*“ [30, S. 134]. Dabei kann eine Analogie auf Objekte, Modelle oder Experimente bezogen werden. Um eine Analogie sinnvoll und für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar darstellen zu können, sind nach KIRCHER drei Bedingungen notwendig [30, S. 137 f.], die vor allem bei der Planung von Analogieexperimenten und der Durchführung des Unterrichts wichtig sind.

1. *Oberflächenähnlichkeit*

Die verwendete Analogie muss für die Lernenden direkt ersichtlich sein, damit sie auch als solche akzeptiert wird. Das bedeutet, dass durch einen groben äußeren Abgleich zwischen Experiment und Analogieexperiment ähnliche Strukturen und Vorgehensweisen erkannt werden müssen.

2. *Tiefenstrukturähnlichkeit*

Auch die tieferen Strukturen müssen bei näherem Hinschauen oder beim Experimentieren noch als analoge Strukturen ersichtlich sein. Für Analogieexperimente bedeutet dies zum Beispiel, dass nicht nur das Setup als solches, sondern auch das Mess- und Auswertungsprinzip Analogien aufweisen sollten.

3. *Reflexion*

In jedem Fall muss die verwendete Analogie auch reflektiert und hinterfragt werden. Für die Schülerinnen und Schüler sollte verständlich werden, was die Analogie leistet und wo aber auch die Grenzen liegen.

Sind alle drei Bedingungen erfüllt, so ist davon auszugehen, dass man eine geeignete Analogie gefunden hat und diese von Schülerinnen und Schülern akzeptiert und verstanden wird. Für die praktische Umsetzung im Unterricht, sollte man immer daran

denken, die analogen Bezüge für die Lernenden klar herauszustellen. Für die Konzeption von Analogieexperimenten bedeutet dies, dass beispielsweise die verwendeten Materialien im „echten“ Experiment den verwendeten Materialien im „analogen“ Experiment gegenübergestellt werden können, um so das Analogieprinzip der Messung klar und verständlich zu formulieren. Nur dann gelingt auch eine kritische Reflexion des Analogieexperiments.

In den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Lehr-Lern-Modulen sind einige Analogieexperimente entwickelt worden. In den entsprechenden Modulen ist immer auch ein Abschnitt zur Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion eingefügt, wo auf die vorhin genannten Punkte eingegangen wird.

4.3.3 Digitale Messwerterfassung und Datenanalyse

Gerade vor dem Hintergrund des digitalen Fortschritts in Industrie und Wissenschaft entstehen immer mehr Möglichkeiten, Experimente durch digitale Erfassungs- und Analysensysteme durchzuführen und auszuwerten. Diese Möglichkeiten halten auch immer mehr Einzug in den alltäglichen Schulbetrieb. Die digitale Aufrüstung ist seit nunmehr einigen Jahren an Schulen flächendeckend in Deutschland zu erkennen. Die enormen Kosten und auch die Schwierigkeit, neue Hardware und Software in Schulen während dem laufenden Schulbetrieb zu installieren, verlangsamt den Prozess der Digitalisierung an Schulen zunehmend. Dennoch ergeben sich nach und nach immer mehr Möglichkeiten, digital unterstützen Unterricht zu verwirklichen. Die Nutzung der geschaffenen digitalen Infrastrukturen ist keineswegs nur wenigen Lehrkräften vorbehalten, sondern vielmehr für alle Lehrerinnen und Lehrer verpflichtend. Hierzu hat die Kultusministerkonferenz im Dezember 2016 die Strategie „Bildung in der digitalen Welt“ beschlossen [38], die verschiedene digitale Kompetenzen, die im Unterricht an deutschen Schulen angebahnt werden sollen, festsetzt. Auf Grundlage dieser beschlossenen Strategie haben die einzelnen Bundesländer einen Kompetenzrahmen entwickelt und sich verpflichtet, dass alle Schülerinnen und Schüler die formulierten Kompetenzen erwerben können. Die Förderung der digitalen Aufrüstung der Schulen kann hier aus verschiedenen Töpfen, unter

anderem auch aus dem vom Bund beschlossenen Programm „Gute Schule 2020“, finanziert werden. Ein Teil dieser Finanzierung steht auch für digitale Messwerterfassungssysteme in den Naturwissenschaften zur Verfügung. Im Bundesland Nordrhein-Westfalen, in welchem die in dieser Arbeit entwickelten Module auch erprobt wurden, sieht der Medienkompetenzrahmen beispielsweise im Kompetenzbereich 1 (Bedienen und Anwenden) das „gezielte Nutzen digitaler Werkzeuge im Unterricht“ vor. Im Fach Physik kann dies unter anderem beim Einsatz von Experimenten genutzt werden. Der Einsatz digitaler Werkzeuge bei der Durchführung und Analyse von Experimenten hat nicht nur den Sinn, die formalen Vorgaben des Bildungsministeriums zu erfüllen, sondern es entstehen auch vielfältige Vorteile bezüglich der Veranschaulichung und Visualisierung experimentell gewonnener Daten [33, S. 115] sowie eine möglicherweise tiefergehende Analyse von Experimenten, da mit einer direkten Auswertung durch die verwendete Software eine schnellere Analyse möglich ist als per Hand. Wichtig dabei ist jedoch, die zur Verfügung stehenden digitalen Systeme zielorientiert und vor allem für die Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar einzusetzen. Die von den Lehrmittelfirmen angebotenen Systeme sind in ihrer Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für Lernende und Lehrende gleichermaßen häufig eine Art „Black Box“. Es ist schwer, wenn nicht unmöglich, die Funktions- und Arbeitsweise der Systeme bis ins Detail nachzuvollziehen, dennoch sollten Lehrkräften und Schülern die zugrundeliegende physikalische Funktionsweise sowie das Prinzip der Analyse verständlich sein, sodass zumindest eine Auswertung der Daten per Hand möglich wäre. Dies liegt ganz in Verantwortung der unterrichtenden Lehrkraft. Im Folgenden soll nun kurz auf die möglichen Messwerterfassungs- und Auswertungssysteme eingegangen werden, wobei an dieser Stelle aufgrund der Vielzahl an zur Verfügung stehenden Systemen mit all ihren unterschiedlichen Bedienkonzepten, Sensoren und Erweiterungsmöglichkeiten keine umfassende Analyse solcher erfolgen kann. Für die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Module ist es von entscheidender Bedeutung, dass die entwickelten Experimente vom verwendeten Messsystem unabhängig durchführbar sind. Erfahrungswerte des Autors zeigen, dass die gängigsten Messwerterfassungssysteme von den beiden größten Lehrmittelfirmen Leybold und Phywe an Schulen zur Verfügung stehen. Eher

selten trifft man auf eine Schule, die sich mit etwas außergewöhnlicheren Systemen, wie beispielsweise dem einstein LabMate ausgestattet hat. Alle drei Systeme sollen an dieser Stelle kurz in ihrer Funktion und den möglichen Ausstattungen vorgestellt werden.

1. PHYWE System Cobra

Mittlerweile existiert das System Cobra4 mit vier integrierten Sensoren und einem integrierten Messverstärker und Oszilloskop. Es ist unabhängig vom Betriebssystem und lässt sich intuitiv verwenden. Die Sensoren werden automatisch erkannt, sodass sämtliche Experimente schnell und einfach durchgeführt werden können. Es sind noch viele weitere Sensoren extern anschließbar, sodass ein recht breites Spektrum an Experimenten abgedeckt wird.



Abbildung 4.2: Cobra4 Xpert-Link der Firma PHYWE [39].

Die Analyse von Daten erfolgt durch eine eigene Software mit Menüstruktur. Anpassungen der Darstellung und graphische Auswertungen sind problemlos und ohne große Vorarbeit möglich. Daten lassen sich über USB oder WLAN übertragen. Des Weiteren existieren auch mobile Versionen von Cobra4, die als Handmessgerät, beispielsweise für Schülerexperimente, gedacht sind. So umfangreich, strukturiert und nahezu beliebig erweiterbar dieses System ist, so existiert auch ein gravierender Nachteil. Allein das Basisgerät mit zugehöriger Software kostet über 1.500 Euro. Kauft man dann noch weitere Sensoren und Zubehör dazu, werden schnell mehrere Tausend Euro erreicht. Dies übersteigt an nahezu jeder Schule die für Anschaffungen vorgesehenen finanziellen Mittel. Es ist daher nur möglich, über viele Jahre hinweg die Sammlung mit Geräten und Sensoren nach und nach zu bestücken.

2. Leybold Didactic System Cassy Lab

Das System Cassy Lab der Firma Leybold Didactic existiert mittlerweile in der zweiten Auflage und ist als Sensor Cassy 2 ähnlich wie Cobra von PHY-WE betriebssystemunabhängig und recht intuitiv zu bedienen. Diverse Sensoren und Zubehörmaterialien ermöglichen hier einen ähnlich breiten Einsatz wie das zuvor vorgestellte System. Mit einer eignen Software gelingt die Darstellung und Analyse der Daten einfach und schnell.



Abbildung 4.3: Sensor-Cassy 2 der Firma Leybold [40].

Die Daten lassen sich per USB-Kabel oder über WLAN übertragen. Es stehen auch Apps für alle gängigen Smartphone-Betriebssysteme zur Verfügung, um die Daten auf dem Smartphone anzuzeigen und einfache Auswertungen vorzunehmen. Angeboten werden neben zusätzlichen Displays für die Messwerte auch Mobile-Cassy-Systeme, die als Handmessgerät für Schülerexperimente, gedacht sind. Auch hier sind die Preise für das Basisgerät sowie die Sensoren und die zusätzlich benötigte Software hoch und erreichen schnell mehrere Tausend Euro.

3. FourierEdu System einstein LabMate

Neben den teuren Systemen der beiden größten Lehrmittelfirmen existieren auf dem Markt natürlich auch noch weitere, zum Teil deutlich günstigere Hardware- und Softwarelösungen. Ein Beispiel ist das einstein LabMate (mittlerweile auch als weiter entwickelte Plus-Version erhältlich) der Firma FourierEdu.



Abbildung 4.4: einstein LabMate der Firma FourierEdu [41].

Mit sechs integrierten Sensoren und vier Anschlussmöglichkeiten für diverse weitere Sensoren bietet diese kostengünstige Alternative ein ähnlich breites Anwendungsspektrum wie die teuren Systeme von PHYWE und Leybold. Die Analyse der Daten erfolgt entweder über eine kostenlose Software auf dem PC, ein zusätzlich bestellbares Tablet oder per App auf dem Smartphone. Die Analyse der Daten ist im Detail nicht ganz so umfangreich möglich wie bei den zuvor vorgestellten Systemen, aber in den meisten Fällen dennoch ausreichend. Die Tatsache, dass im Gesamtpaket dieses System um etwa zwei Drittel der Kosten günstiger ist als Cassy oder Cobra, macht es zu einer sinnvollen Alternative, wenn kleinere Abstriche bei der Messwertaufnahme und -analyse hingenommen werden.

Nach Erfahrungswerten des Autors, ist in den meisten Sammlungen das System Cassy Lab zu finden. In der Regel sind nicht alle Sensoren angeschafft worden. Mit einer Basisausstattung lassen sich jedoch schon einige Experimente durchführen. Im Rahmen dieser Arbeit sind die Experimente, bei denen eine digitale Messwertaufnahme und -analyse erfolgt, mit Cassy Lab durchgeführt worden. Es ist jedoch darauf geachtet worden, dass diese Experimente auch mit Cobra, einschließlich der mobilen Handgeräte der beiden Systeme, sowie mit einstein LabMate durchführbar sind.

Die hier vorgestellten Systeme kombinieren die Messwernerfassung mit der Messwertanalyse, welche durch eine zusätzliche Software erfolgt. Diese Software hat jedoch gerade für den wissenschaftlichen Einsatz einen Nachteil. Es handelt sich dabei um Programme, deren Einsatz für den Schulbetrieb vorgesehen ist. So sind bei Anpassungen, Transformationen und Fits nur eben solche durchführbar, die in der Schule üblicherweise vorkommen, sodass eine komplexe wissenschaftliche Analyse von Daten, wie sie an der Hochschule erwartet wird, nicht möglich ist. Dies mindert keineswegs die Qualität der Software für den Schuleinsatz, zeigt aber, dass eben auch gewisse Grenzen der Anwendbarkeit für den weiteren Einsatzbereich in der Hochschule berücksichtigt werden müssen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit für die Messwertanalyse ein weiteres Softwaretool eingesetzt, welches die von Cassy Lab aufgenommenen und in einer Textdatei gespeicherten Messwerte

einliest, neu darstellt und auswertet. Dieses Softwaretool ist das Analysesoftwarepaket **Root** [42], welches gerade im Bereich der Teilchenphysik und Hochenergiephysik eingesetzt wird. **Root** basiert auf der Programmiersprache C und kann durch Einbinden unterschiedlicher Pakete alle Analysen vornehmen, die in den Naturwissenschaften gebraucht werden. Die Daten werden in einem interaktiven Browser-Fenster dargestellt, in welchem weitere Anpassungen bei Bedarf vorgenommen werden können. Der große Vorteil von **Root** ist neben dieser interaktiven Darstellung die Tatsache, dass der Download des Softwarepakets kostenlos ist (im Gegensatz zu den vielleicht bekannteren Programmen Mathematica oder Matlab). **Root** ist unabhängig vom Betriebssystem und kann über die Homepage des Europäischen Zentrums für Kernforschung (CERN) heruntergeladen werden [43]. Die Software startet bei erfolgreichem Download über die Konsole des PCs, indem im Terminal **root** eingegeben wird, vgl. Abbildung 4.5.

```

philipp@Philipp-Desktop:~/Dokumente/Dopplerverschiebung$ root
*****
*
*           W E L C O M E  t o  R O O T           *
*
*   Version   5.34/32      23 June 2015   *
*
*   You are welcome to visit our Web site *
*   http://root.cern.ch                 *
*
*****

ROOT 5.34/32 (v5-34-32@v5-34-32, Jun 23 2015, 17:58:02 on linux)

CINT/ROOT C/C++ Interpreter version 5.18.00, July 2, 2010
Type ? for help. Commands must be C++ statements.
Enclose multiple statements between { }.
root [0]

```

Abbildung 4.5: Start des Analysesoftwarepakets **Root** über die Konsole eines Linux-PCs.

Root selbst muss dann wiederum über den Befehl `.x` mit angehängtem Dateinamen eine Analysesoftware einlesen, die Anweisungen gibt, wie die Daten dargestellt und ausgewertet werden sollen. Je nach eingelesener Software werden die Ergebnisse der Analyse entweder im Graphen selbst, in der Konsole oder in einer neuen Datei angezeigt. Die fertige Darstellung der Daten erfolgt dann im **TBrowser**, der durch den gleichnamigen Befehl geöffnet wird. In diesem können dann gegebenenfalls weitere Anpassungen vorgenommen

werden oder die Graphiken als Bilddatei abgespeichert werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine C++-Software geschrieben worden, die von Root eingelesen werden kann und die Darstellung und Auswertung vornimmt. Die Software kann dabei auch verändert werden, um andere Darstellungsformate zu erhalten. Eine genaue Bedienungsanleitung für den praktischen Einsatz in Schule oder Hochschule sowie der Programmcode sind in Anhang B.2 einzusehen.

4.4 Beobachtung, Simulation und Analogieexperiment

Wie eingangs in Kapitel 4.3 erwähnt, handelt es sich bei einem Analogieexperiment um ein Experiment, bei welchem das zugrunde liegende physikalische Prinzip vor einem anderen physikalischen Kontext in gleicher Art und Weise experimentell untersucht werden kann. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Experimente entsprechen nicht dieser klassischen Definition, da es zu einer Durchmischung von Beobachtung, Simulation und Experiment kommt, die im Folgenden genauer beleuchtet werden soll, um Vorgehen und Ziel der Experimente sowie die Verknüpfung zu den realen wissenschaftlichen Befunden für Lehrende und Lernende gleichermaßen verständlich zu machen.

Der typische Prozess zur Erkenntnisgewinnung in der Physik ist in Kapitel 4.3.1 hinreichend thematisiert worden. In diesem Zusammenhang soll hier nur die wissenschaftliche Beobachtung beziehungsweise das Experiment genannt werden, wodurch im Idealfall eine physikalische Erkenntnis, wie etwa eine neue Gesetzmäßigkeit, gewonnen werden kann. Bei einem Analogieexperiment wird diese wissenschaftliche Beobachtung vor einem analogen Kontext durchgeführt, sodass die daraus gezogenen Erkenntnisse denen im realen Kontext entsprechen.

Im Rahmen dieser Arbeit sind Experimente entwickelt worden, die jedoch nur zum Teil mit dieser Auffassung korrespondieren. Vielmehr wird bei den hier vorgestellten Experimenten das physikalische Prinzip als solches simuliert und eine analoge Messung beziehungsweise eine analoge Beobachtung im simulierten Kontext durchgeführt. Dies soll exemplarisch an einem Beispiel deutlich gemacht werden.

So lässt sich etwa die Existenz Dunkler Materie über die Rotationskurven von Spiralgalaxien begründen. Es bietet sich in einer Unterrichtsreihe zur Dunklen Materie an, dies im Unterricht zu thematisieren und auch experimentell zu untersuchen, wobei eine solche Untersuchung nur über Analogieexperimente oder Simulationen möglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit ist hier konkret das physikalische Prinzip der Rotationsbewegung eines Sterns in einer Spiralgalaxie nachgestellt worden. Dazu wurde ein Lautsprecher auf einer drehbaren Fahrradfelge arretiert, mit dem der Stern und seine Bewegung simuliert werden kann. Diese Simulation ermöglicht dann eine analoge Messung beziehungsweise Beobachtung. Durch die Messung der akustischen Dopplerverschiebung der vom Lautsprecher ausgesendeten Tonfrequenzen wird eine Analogie zur realen Messung der optischen Dopplerverschiebung der von Sternen ausgesendeten Lichtfrequenzen geschaffen. Das entwickelte „Analogieexperiment“ ist also vielmehr eine Simulation mit einer analogen Messung. Dieses Prinzip trifft auf mehrere in dieser Arbeit entwickelten Experimente zu und ist daher grundlegend für die Einordnung dieser aus fachdidaktischer und methodischer Sicht. Abbildung 4.6 zeigt noch einmal schematisch in einer Art Flussdiagramm die methodischen Schritte der in den folgenden Kapiteln vorgestellten Experimente.

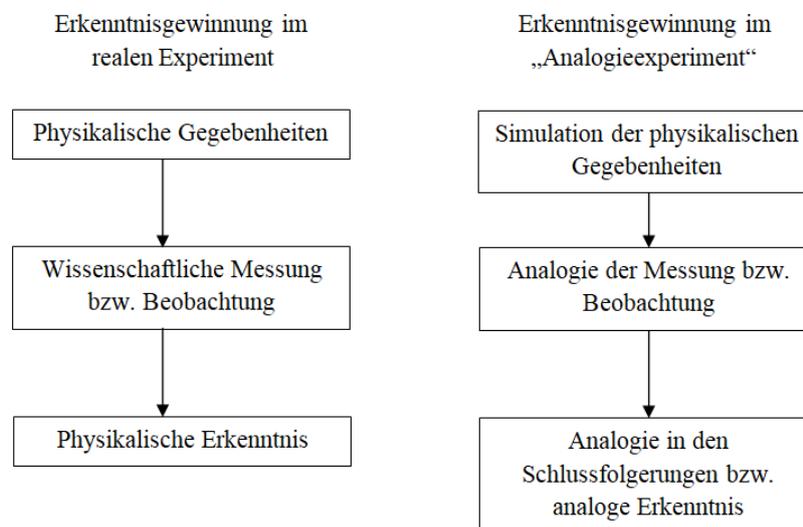


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der methodischen Schritte zur Erkenntnisgewinnung von realem Experiment und der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Analogieexperimente im Vergleich.

4.5 Konstruktion von Lehr-Lern-Modulen

Für die Entwicklung und Konstruktion der Lehr-Lern-Module ergeben sich auf Grundlage der vorgestellten fachdidaktischen und methodischen Ausführungen bestimmte Forderungen, die an dieser Stelle festgehalten werden sollen. Innerhalb der Module ist es wichtig, die Relevanz des Themas nach den in Kapitel 4.1 dargestellten Begründungszusammenhängen herauszustellen und auch tiefergehende vernetzende und allgemeinbildende Aspekte abzubilden. So wird zum Beispiel in einzelnen Modulen auch auf die historische Entwicklung der Erforschung und die geschichtliche Abfolge einzelner Erkenntnisschritte zur Dunklen Materie eingegangen. Die zentralen Modulelemente sind als wesentliches Element so strukturiert, dass angehende und bereits unterrichtende Lehrkräfte sich in die Thematik einarbeiten können und gleichermaßen praktische Hinweise zur Umsetzung im Unterricht erhalten. Es ergeben sich folgende Lehr-Lern-Module, die in einem Strukturschema in Abbildung 4.7 noch einmal dargestellt sind.

1. Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik
 - 1.1 Rotationskurven von Spiralgalaxien
 - 1.2 Gravitationslinseneffekt
2. Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie
 - 2.1 Entwicklungen im frühen Universum
 - 2.2 Erkenntnisse aus der kosmischen Hintergrundstrahlung
3. Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie
 - 3.1 Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit Dunkler Materie
 - 3.2 Kritik an der Dunklen Materie und alternative Erklärungsansätze

In den Modulen werden grundsätzlich die vorgenommenen Elementarisierungen und didaktischen Reduktionen, welche zur Übertragung auf den Schulunterricht notwendig sind, begründet dargelegt. Außerdem werden Experimente in einzelnen Modulen vorgestellt, die zum Teil mit Hilfe digitaler Werkzeuge durchgeführt und analysiert werden.

Somit werden die Experimente auch den besonderen Herausforderungen und Möglichkeiten der immer weiter fortschreitenden Digitalisierung in den Schulen gerecht. Es ist dafür Sorge getragen worden, dass die Experimente, so wie sie hier vorgestellt werden, nachgebaut und durchgeführt werden können. Für den Schulunterricht ist es außerdem wichtig, Begleitmaterial, zum Beispiel in Form von vertiefenden Übungsaufgaben für Schülerinnen und Schüler bereit zu halten. Auch dieser wichtige Aspekt wird in den Modulen berücksichtigt. Insgesamt ergeben sich gerade für die Konstruktion der Lehr-Lern-Module folgende Punkte, auf die eingegangen werden muss:

- Darlegung der wesentlichen Lernziele jedes Moduls,
- Vorstellung der fachlichen und historischen Grundlagen und Zusammenhänge in jedem Modul,
- Darstellung der Elementarisierungen und didaktischen Reduktionen zur Übertragung auf den Schulunterricht,
- Beschreibung der Durchführung von (Analogie-)Experimenten sowie der Analyse gewonnener Daten (sofern im Modul geplant),
- Beschreibung der Durchführung von Simulationen sowie der Ergebnisse aus diesen (sofern im Modul geplant),
- Vorstellung von Übungsaufgaben inklusive möglicher Lösungen,
- Darstellung der Erfahrungen aus Erprobungen im Schulunterricht.

Auf all diese Punkte soll in jedem der folgenden Module, sofern sie auf diese passen, eingegangen werden, damit diese als Hilfestellung bei entsprechender Nutzung der vorgestellten Konzepte im Unterricht verstanden werden können.

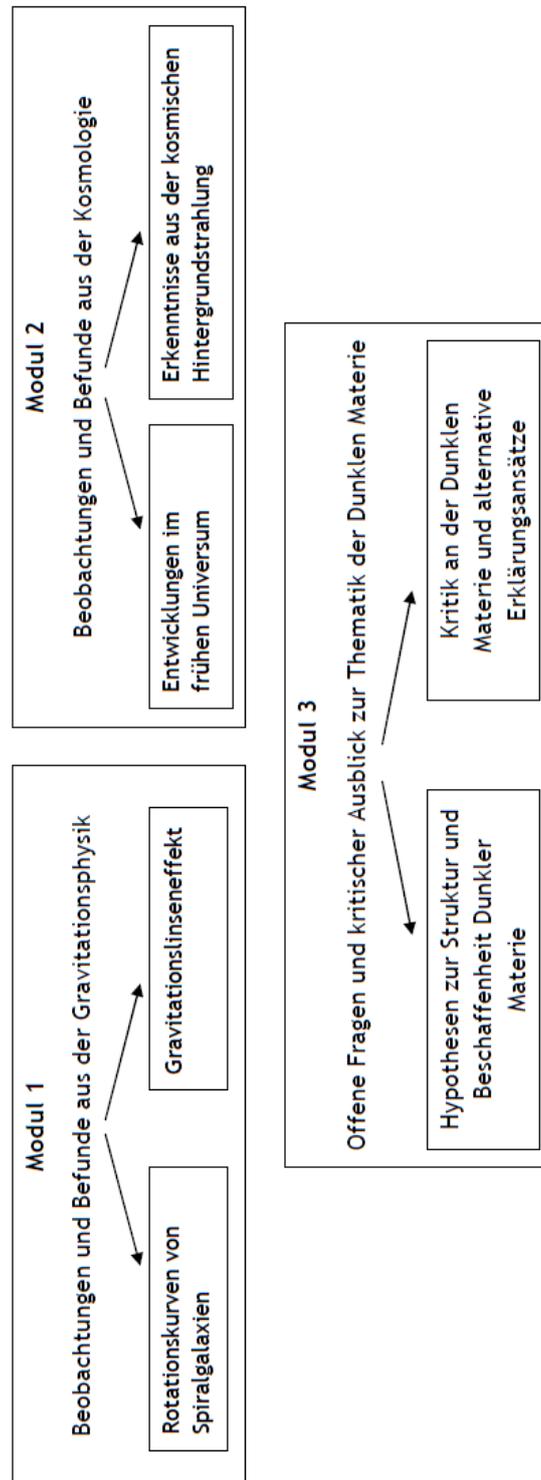


Abbildung 4.7: Strukturschema der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module.

KAPITEL 5

Modul 1: Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik

In diesem Modul sollen ausgewählte Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik, aus welchen die Existenz der Dunklen Materie geschlossen wird, vorgestellt werden. Es handelt sich hierbei um folgende Inhalte:

- Rotationskurven von Galaxien,
- Gravitationslinseneffekt.

Dabei werden zunächst die jeweiligen fachlichen Grundlagen und die historische Entwicklung der dargestellten Erkenntnisse behandelt, bevor dann die Übertragung auf den Schulunterricht und die dafür notwendig werdende didaktische Reduktion thematisiert wird. Anschließend werden Analogieexperimente mit der entsprechenden Auswertung und auch Begleitmaterial für den Unterricht in Form von vertiefenden Aufgaben vorgestellt.

5.1 Lernziel dieses Moduls

Das Ziel dieses Moduls ist, fachlich fundiert eine Vorstellung davon zu vermitteln, wie durch Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik die Dunkle Materie nachgewiesen werden kann. So werden die Messungen der Rotationskurve einer Spiralgalaxie mit einem Analogieexperiment nachgestellt und auch der Gravitationslinseneffekt experimentell untersucht. Die wesentlichen Lernziele sind nachfolgend aufgelistet.

- Die Lernenden sind in der Lage, die Begründung für die Existenz Dunkler Materie nachzuvollziehen, indem sie die aus Rotationskurven entnommenen physikalischen Erkenntnisse erläutern.
- Die Lernenden können das zugrundeliegende Messverfahren beim Erstellen einer Rotationskurve nachvollziehen, indem sie ein Analogieexperiment hierzu durchführen und auswerten.
- Die Lernenden sind in der Lage, den Gravitationslinseneffekt und die aus seinem Auftreten zu ziehenden Schlussfolgerungen für die Existenz Dunkler Materie zu erklären, indem sie den Lichtstrahlenverlauf korrekt darstellen und auch die Zusammenhänge zur Dunklen Materie aufzeigen.
- Die Lernenden können das Zustandekommen bestimmter Phänomene (wie Doppelbilder oder EINSTEIN-Ringe) begründen, indem sie auf die mathematischen Zusammenhänge für den Ablenkungswinkel und die Positionsanalyse der durch den Gravitationslinseneffekt entstehenden Bilder eingehen.
- Die Lernenden sind in der Lage, die Form einer Glaslinse zu beschreiben, welche die Effekte einer Gravitationslinse bewirken soll, indem sie die Oberflächenlinie einer solchen Glaslinse mit einem Tabellenkalkulationsprogramm simulieren.
- Die Lernenden werden in den Lage versetzt, einzelne Phänomene (wie Doppelbilder oder EINSTEIN-Ringe) in einem Analogieexperiment zu erzeugen, indem sie die zuvor simulierte Glaslinse real einsetzen.
- Die Lernenden können das neu Gelernte üben und vertiefen, indem sie Aufgaben lösen.

5.2 Rotationskurven von Spiralgalaxien

5.2.1 Fachliche Grundlagen

5.2.1.1 Theoretische Erwartung und experimentelle Beobachtung

Anhand der Rotationskurven von Spiralgalaxien lässt sich die Existenz Dunkler Materie begründen. Nach dem Gravitationsgesetz würde man bei einer Auftragung der Geschwindigkeit v eines Sterns, welcher sich kreisförmig um das Zentrum einer Galaxie bewegt, in dem nahezu die gesamte galaktische Masse konzentriert sein soll, gegen den Abstand r zum Galaxiezentrum, eine abfallende Kurve erwarten, da $v \propto \sqrt{\frac{1}{r}}$ gilt. Diese Proportionalität folgt direkt aus dem Gleichstellen von Gravitations- und Zentripetalkraft. Hierbei ist m die Masse des Sterns, $M(r)$ die Masse der Galaxie innerhalb von r und G die Gravitationskonstante. Für die Gravitationskraft ist NEWTONS Schalentheorem für kugelsymmetrische homogene Massenverteilungen die Voraussetzung, nach welchem die Gravitationskraft auf einen Stern im Abstand r vom Zentrum der Galaxie durch den Anteil der Gesamtmasse der Galaxie, die innerhalb von r liegt, erzeugt wird.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Zentripetalkraft} \quad F_Z = \frac{mv^2}{r} \\ \text{Gravitationskraft} \quad F_G = G \frac{mM(r)}{r^2} \end{array} \right\} \frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \quad (5.1)$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \stackrel{M_{\text{const.}}}{\propto} \sqrt{\frac{1}{r}}. \quad (5.2)$$

Für unser Sonnensystem gilt diese klassische Erwartung auch, vgl. Abbildung 5.1. Da die meiste Masse in der Sonne konzentriert ist, haben die inneren Planeten relativ hohe Geschwindigkeiten, während mit zunehmendem Abstand von der Sonne die Gravitationskraft kleiner wird und damit auch die Bahngeschwindigkeit der Planeten nach außen hin abnimmt. Beobachtungen von Sternen in Spiralgalaxien zeigen jedoch keinen $\sqrt{\frac{1}{r}}$ -Abfall der Bahngeschwindigkeit bei zunehmendem Abstand vom Galaxiezentrum, sondern einen flachen Verlauf der Rotationskurve. Beispielhaft ist in diesem Zusammenhang die Rotationskurve der Galaxie NGC 3198 in Abbildung 5.2 dargestellt. Aus dem flachen Verlauf der Rotationskurve kann geschlussfolgert werden, dass in guter Näherung

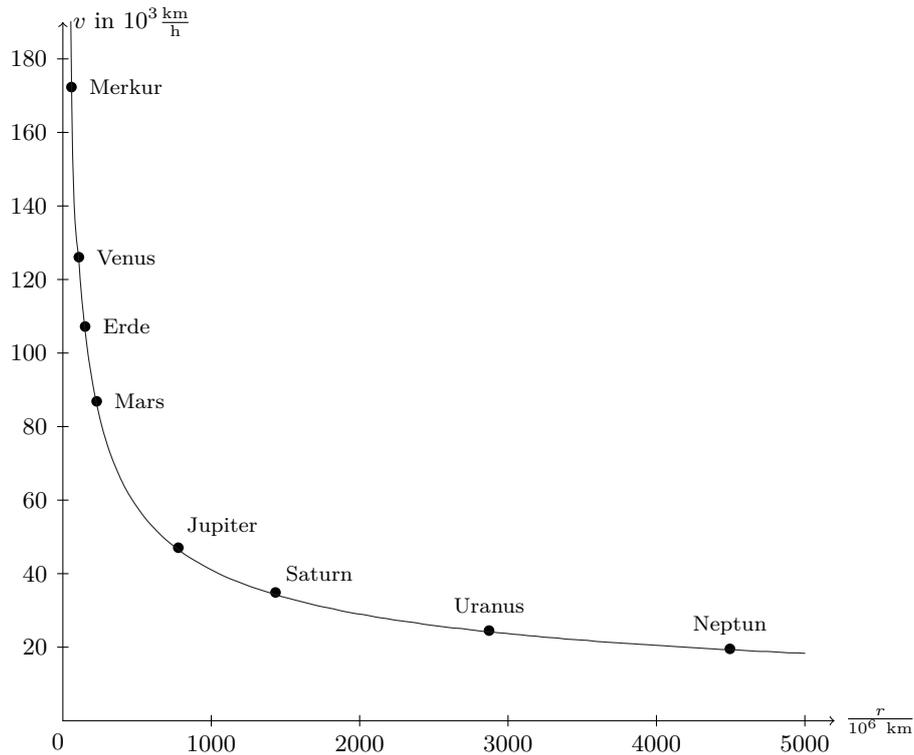


Abbildung 5.1: Rotationskurve unseres Sonnensystems.

$v = \text{const.}$ gilt. Wenn die Geschwindigkeit nun konstant ist, muss dies zwingend Rückschlüsse auf die Massenverteilung in der Galaxie zulassen, wie im Folgenden ausgeführt wird. Mit Formel 5.2 folgt

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad \frac{GM(r)}{r} = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad M(r) \propto r \quad . \quad (5.3)$$

Die Proportionalität der zwischen $M(r)$ und dem Abstand vom Galaxiezentrum steht im Widerspruch zu den Annahmen, die sich aus den direkt beobachtbaren Sternen innerhalb der Galaxie ergeben. Nach diesen ist davon auszugehen, dass in Galaxien der größte Teil der Licht abstrahlenden Materie im Zentrum, dem sogenannten Bulge, konzentriert ist. Je weiter man sich vom Galaxiezentrum entfernt, desto weniger Licht abstrahlende Materie findet man. Irgendwann wird der Abstand so groß, dass überhaupt keine Materie durch abgestrahltes sichtbares Licht nachgewiesen werden kann. Man findet in diesen

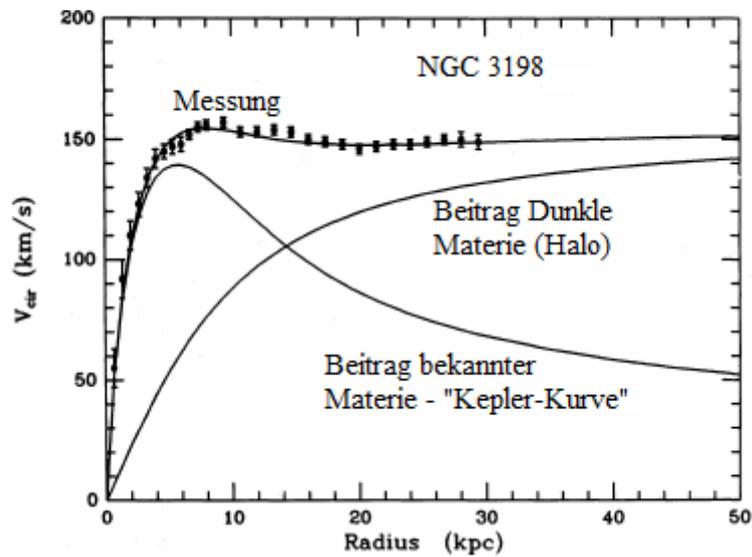


Abbildung 5.2: Rotationskurve der Spiralgalaxie NGC 3198, Daten gemessen von Tjeerd Sizzo VAN ALBADA et al., 1985. Klassische Erwartung ist die KEPLER-Kurve. Durch Annahme einer zusätzlichen Komponente durch die Dunkle Materie im Halo um die Galaxie können die Messwerte erklärt werden. Daten entnommen aus [44].

Bereichen Wolken aus neutralem Wasserstoffgas, welche bei einer Wellenlänge von 21 cm eine charakteristische Raiowelle abstrahlen. Da mit immer größer werdender Entfernung immer weniger Licht abstrahlende Materie beobachtet werden kann, ist eigentlich davon auszugehen, dass die Zuwachsrate von $M(r)$ einer Galaxie mit größer werdendem Abstand vom Zentrum kleiner wird.

Der flache Verlauf der Rotationskurven bis hin zu den größten messbaren Abständen vom Galaxiezentrum bedeutet jedoch, dass $M(r)$ direkt proportional zum Abstand vom Zentrum ist, dass also die Massenzunahme konstant ist. Dies wiederum spricht eindeutig dafür, dass gerade in den Außenbereichen zusätzliche Masse vorhanden sein muss, die aber kein Licht aussendet, also nicht direkt beobachtbar ist. Es ist dementsprechend anzunehmen, dass sich um die Galaxie ein Halo erstreckt, in welchem sich für uns so nicht sichtbare Materie befindet [vgl. z. B. 45, S. 73]. Die Rotationskurven stellen daher ein eindeutiges Indiz für die Existenz Dunkler Materie dar. Mit $M(r) = \rho(r) \cdot V(r)$ und $V(r) \propto r^3$ weiterhin auch der Verlauf der Volumendichte innerhalb der Galaxie bestimmt

werden. Es gilt:

$$\varrho(r) \propto \frac{r}{V(r)} \propto \frac{r}{r^3} = \frac{1}{r^2} \quad . \quad (5.4)$$

Damit ist die Volumendichte bei einem vorausgesetzten flachen Verlauf der Rotationskurve in Abhängigkeit vom Abstand zum Galaxiezentrum proportional zum Reziproken des Abstandsquadrats.

Im Folgenden soll nun kurz auf das Prinzip eingegangen werden, wie die einer Rotationskurve zugrundeliegenden Daten, also der Abstand der Sterne vom Galaxiezentrum sowie die Geschwindigkeit der Sterne, zustande kommen. Zunutze macht man sich hier das Phänomen der Dopplerverschiebung von Spektrallinien, in der Regel der 21-cm-Linie von neutralem Wasserstoff, die dadurch entsteht, dass mit einer gewissen, wenn auch geringen Wahrscheinlichkeit, ein Umklappen der Elektronenspinrichtung im Grundzustand erfolgt. Geht man davon aus, dass sich der Stern auf einer Kreisbahn um das Galaxiezentrum bewegt, lassen sich die Geschwindigkeit und auch der Abstand vom Zentrum mit einfachen Überlegungen bestimmen.

5.2.1.2 Prinzipielles Vorgehen bei der Aufnahme einer Rotationskurve

Bestimmt man den Abstand eines rotierenden Objekts zur Rotationsachse und die Geschwindigkeit des rotierenden Objekts, so erhält man einen Punkt im entsprechenden Rotationsdiagramm zu dieser Bewegung. Durch weitere Messungen an anderen Abständen ergeben sich weitere Punkte, durch die eine Kurve gelegt werden kann. In diesem Kontext handelt es sich bei den rotierenden Objekten in der Regel um Sterne, welche um das Zentrum einer Galaxie rotieren. Nachfolgend soll auf die Bestimmung der Geschwindigkeit und anschließend auf die Bestimmung des Abstands eingegangen werden.

1. *Geschwindigkeitsbestimmung.*

Bewegt sich eine Galaxie mit der radialen Geschwindigkeit v_0 relativ zum Beobachter und ein Stern auf einer elliptischen Bahn um das Zentrum der Galaxie, so

lassen sich im Wesentlichen vier markante Positionen des Sterns zum Beobachter feststellen, vgl. Abbildung 5.3 und 5.4.

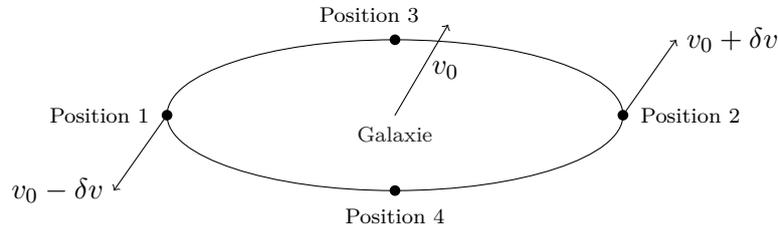


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Bewegung eines Sterns um das Galaxiezentrum.

Auf den Positionen 3 und 4 steht der Geschwindigkeitsvektor des Sterns senkrecht zum Verbindungsvektor zwischen Beobachter und Stern. Man stellt an diesen Positionen keine Dopplerverschiebung fest. Befindet sich jedoch der Stern auf den Positionen 1 oder 2, so kommt es zu einer Frequenzverschiebung der Spektrallinien, der Linien also, welche wir als Beobachter messen können. Dieses als Dopplereffekt bezeichnete Phänomen macht man sich zunutze, um die Geschwindigkeit δv des Sterns relativ zur mittleren Geschwindigkeit der Galaxie zu messen. In Position 1 (Stern bewegt sich auf Beobachter zu) sind die Spektrallinien blau verschoben, in Position 2 (Stern bewegt sich von Beobachter weg) sind sie nach rot verschoben, vergleiche Abbildung 5.4.

Ist f_0 die Grundfrequenz und f_1 bzw. f_2 die von Position 1 bzw. von Position 2 empfangenen Frequenzen, v_0 die Geschwindigkeit der Galaxie und $v_0 \mp \delta v$ die Geschwindigkeit des Sterns an den Positionen 1 und 2, so lassen sich folgende Verhältnisse in erster und hier genügender Näherung aufstellen.

$$\frac{f_1}{f_0} = \frac{v_0 - \delta v}{c} \quad , \quad \frac{f_2}{f_0} = \frac{v_0 + \delta v}{c} \quad (5.5)$$

$$\Rightarrow \text{Verschiebung: } \delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{c} (v_0 + \delta v) - \frac{f_0}{c} (v_0 - \delta v) = 2 \frac{f_0}{c} \cdot \delta v \quad (5.6)$$

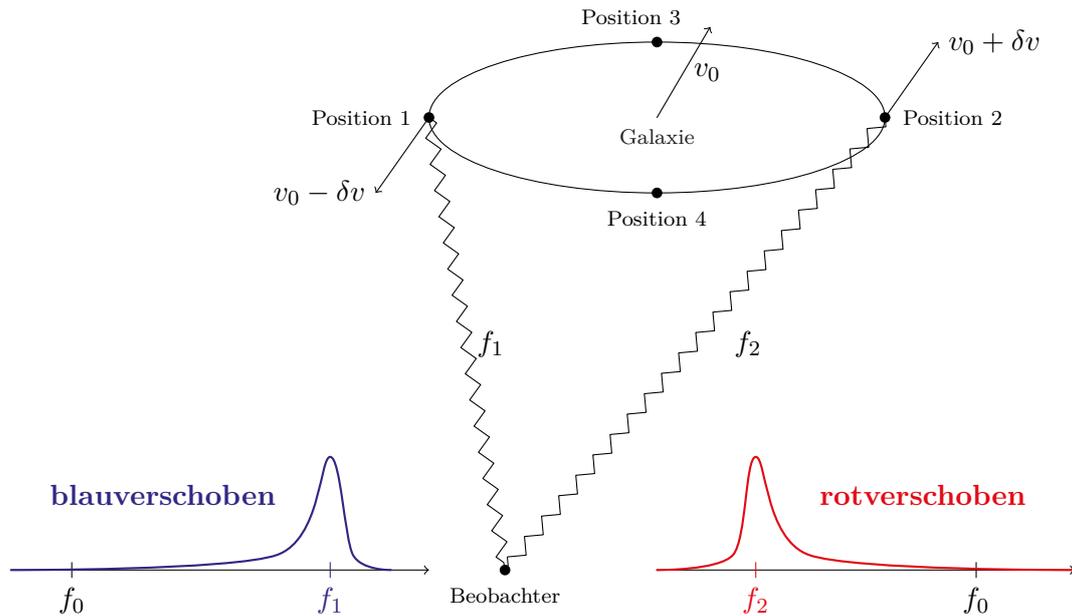


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung zur Blau- und Rotverschiebung bei der Doppler-Aufspaltung von Spektrallinien eines Sterns bei der Bewegung um das Galaxiezentrum.

Die Geschwindigkeit δv des Sterns relativ zur Galaxie bestimmt sich demnach zu:

$$\delta v = \frac{\delta f \cdot c}{2f_0} \quad . \quad (5.7)$$

Kennt man also die Grundfrequenz f_0 sowie die Verschiebung der Frequenzen δf , so lässt sich die Sternengeschwindigkeit berechnen.

2. *Abstandsbestimmung.*

Der Abstand des umkreisenden Sterns vom Galaxiezentrum lässt sich über eine Parallaxenwinkelmessung anhand des Abstands vom Beobachter bestimmen. Der Abstand des Sterns vom Beobachter wiederum ergibt sich aus der Leuchtkraft des Sterns. Die Leuchtkraft des Sterns ist gleichzusetzen mit der tatsächlichen abgestrahlten Leistung des Sterns und größer als die ankommende Strahlungsleistung beim Beobachter. Eine Normierung hat die Folge, dass die Leuchtkräfte für den Beobachter vergleichbar gemacht werden. Der Normabstand beträgt hier üblicher-

weise 10 pc. Für den Abstand gilt dann:

$$r = 10 \text{ pc} \cdot 10^{\frac{m-M}{5}} . \quad (5.8)$$

Dabei ist m die scheinbare und M die absolute Helligkeit des Sterns. So erfolgt die in der Astronomie übliche Normierung auf Parsec beziehungsweise Kiloparsec, wie in Abbildung 5.2 zu sehen.

Damit erhält man also einen Wert für die Geschwindigkeit des Sterns sowie einen Wert für den Abstand des Sterns zum Galaxiezentrum. Die Vermessung mehrerer Sterne innerhalb einer Galaxie führt dann zu mehreren Wertepaaren, sodass im Diagramm eine Rotationskurve entsteht.

5.2.2 Historische Entwicklung

Die ersten gravitationsphysikalischen Überlegungen, die ein Indiz für die Existenz Dunkler Materie lieferten, stammen aus den 1930er Jahren von dem Schweizer Astronomen Fritz ZWICKY, der den Virialsatz auf die Bewegung ganzer Galaxien im Coma-Galaxienhaufen angewandt hat. Der Coma-Haufen wurde Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt und ist mit 130 Megaparsec Abstand relativ nahe zur Sonne und damit für astronomische Messungen bis heute interessant [46].

ZWICKY stellte bei der Messung der Geschwindigkeitsstreuung einzelner Galaxien im Coma-Haufen fest, dass seine Erwartung eines Geschwindigkeitsabfall bei größer werdenden Abständen zur Mitte nicht bestätigt wurden. Die Geschwindigkeit von acht beobachteten Galaxien war ungewöhnlich groß im Vergleich zu eben jener, welche man aufgrund ihrer Leuchtkraft und der daraus bestimmten Masse erwarten würde.



Abbildung 5.5: Fritz ZWICKY. [47]

Das Verhältnis der Masse aufgrund ihrer Leuchtkraft zur Masse aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit berechnete ZWICKY zu etwa 400. Diese große Streuung ließ in vermuten, dass ein beträchtlicher Teil der Galaxienmasse von nicht-leuchtender, also dunkler, Materie herrühren muss. So schrieb ZWICKY nach seinen Entdeckungen:

„If this is confirmed we would arrive at the astonishing conclusion that dark matter is present with a much greater density than luminous matter. From these considerations it follows that the large velocity dispersion in Coma represents an unsolved problem.“ [48, S. 333]

Es war in der Geschichte der Physik einer der ersten großen Hinweise auf die Existenz Dunkler Materie im Universum. Gänzlich neu war die Vermutung von zusätzlicher nicht-leuchtender Materie jedoch nicht, denn kurz zuvor hatten Sinclair SMITH, Ho-

race Welcome BABOCK und Jan Hendrik OORT bereits ähnliche Vermutungen geäußert. SMITH untersuchte die Masse des Virgo-Galaxienhaufens und stellte 1936 fest, dass die Masse dieses Galaxienhaufens deutlich größer sein musste, als man zunächst aufgrund der sichtbaren Materie vermuten würde [49].

BABOCK stellte 1939 in seiner Dissertation fest, dass der Außenbereich der Andromeda-Galaxie mit ungewöhnlich hoher Geschwindigkeit rotiert. Er führte diese Beobachtung auf eine starke Staub-Absorption im Außenbereich der Galaxie zurück [50]. Interessant an dieser Stelle ist, dass BABOCK in seinen Aufzeichnungen an keiner Stelle die bereits publizierten Schriftstücke von ZWICKY erwähnt hat. Es ist somit davon auszugehen, dass BABOCK die Erkenntnisse ZWICKYS gar nicht gekannt hat. Es gelang zu diesem Zeitpunkt also noch keine Verknüpfung zwischen den fehlenden Massen in Galaxien (wie der Andromeda-Galaxie, BABOCK) und ganzen Galaxienhaufen (wie dem Coma-Haufen, ZWICKY).

OORT untersuchte im Jahre 1940 die linsenförmige Galaxie NGC 3115 auf ihre Oberflächenhelligkeit [51] und erkannte, dass die Messung der Rotationsgeschwindigkeiten mit zunehmendem Abstand zum Galaxienmittelpunkt von grundlegendem Interesse sein würden, um die Diskrepanzen zwischen der Masse aufgrund der Rotation und der Masse aufgrund der Leuchtkraft einer Galaxie erklären zu können.



Abbildung 5.6: Jan Hendrik OORT. [52]

Seiner Originalarbeit aus dem Jahre 1940 ist zu entnehmen:

„There cannot be any doubt that an extension of the measures of rotation to greater distances from the nucleus would be of exceptional interest.“ [51, S. 306]

Die Untersuchung der Rotationskurven für größere Radien von Galaxien sollte dann erst

in den 70er Jahren gelingen. Zuvor jedoch hatten im Jahr 1959 Franz Daniel KAHN und Lodewijk WOLTJER aufgrund der Relativbewegung der Andromeda-Galaxie und der Galaxis herausgefunden, dass ein großer Masseanteil dieses Systems nicht-leuchtende Materie sein muss [53]. Sie vermuteten, dass diese nicht-leuchtende Materie extrem heißes Gas mit einer Temperatur von $5 \cdot 10^5$ K sein könnte [53, S. 711]. Es ist sehr wahrscheinlich, dass auch KAHN und WOLTJER keine Kenntnis von ZWICKYS Publikationen hatten.

Im Jahr 1970 führten Vera Cooper RUBIN und William Kent FORD Messungen zur Rotationsgeschwindigkeit der Andromeda-Galaxie durch und kamen zu Messwerten bis zu einem Abstand von 24 kpc vom Galaxiezentrum [54]. Die gemittelte Kurve durch die einzelnen Messpunkte näherten sie dabei durch Polynomgleichungen an. Mittels dieser konnten sie dann über die bereits 1960 von John C. BRANDT theoretisch hergeleitete Massen-Beziehung für Galaxien mit der großen Halbachse a [55, S. 295]

$$M(R) = \frac{2}{\pi G} \int_0^R \frac{a \cdot v^2(a) da}{\sqrt{R^2 - a^2}} \quad (5.9)$$

die Masse der Andromeda-Galaxie bestimmen.

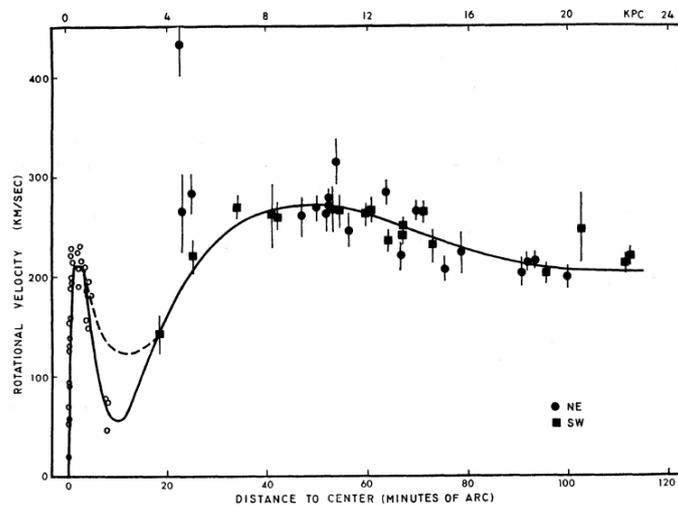


Abbildung 5.7: Messwerte zur Rotationsgeschwindigkeit der Andromeda-Galaxie von RUBIN und FORD aus dem Jahr 1970 mit eingezeichnete Kurve bis zu einem Abstand von 24 kpc vom Galaxiezentrum. [54, S. 390]

RUBIN und FORD erkannten, dass die von ihnen gemessene Rotationskurve (Abbildung 5.7) nicht mit den theoretischen Vorüberlegungen übereinstimmen konnte. Bei der angenommenen Masseverteilung sollte eigentlich eine KEPLER-Kurve zustande kommen, die Geschwindigkeit also mit $\frac{1}{\sqrt{r}}$ abfallen. Signifikant ist jedoch, dass die tatsächlich gemessene Kurve für große Abstände flach zu verlaufen scheint, also für große r nahezu $v = \text{const.}$ gelten muss.



Abbildung 5.8: Vera Cooper RUBIN. [56]

Es waren noch weitere Messungen notwendig, um die Mehrheit der Astronomen zur damaligen Zeit von einer flachen Rotationskurve zu überzeugen. Es mussten Rotationsgeschwindigkeiten für größere Abstände vom Galaxiezentrum vermessen werden, die Kurve also weiter fortgesetzt werden, um den flachen Verlauf zu bestätigen.

Im Jahr 1975 wurde die Rotationskurve von RUBIN und FORD durch Morton S. ROBERTS und Robert Neal WHITEHURST erweitert. Sie führten Geschwindigkeitsmessungen über die Doppler-Verschiebung der 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs durch [57].

Nach dieser Veröffentlichung war klar, dass die Rotationskurve der Andromeda-Galaxie nicht abfällt, wie man es nach einer KEPLER-Kurve erwarten würde, sondern über radiale Abstände von 16 bis 30 kpc konstant bleibt. Interessant ist der Zusammenhang zwischen der Masse der Andromeda-Galaxie und ihrer optischen Helligkeit, vgl. Abb. 5.9. So lässt sich nach ROBERTS und WHITEHURST feststellen, dass die Masse der Galaxie mit zunehmendem Abstand vom Galaxiezentrum zunimmt, die Leuchtkraft jedoch abfällt. Dies lässt darauf schließen, dass die Masse, welche mit zunehmendem Abstand vom Zentrum der Galaxie existieren muss, kein Licht aussendet. Dies ist somit ein klares Indiz für das Vorhandensein dunkler Materie in der Andromeda-Galaxie.

Es ist bemerkenswert, dass auch ROBERTS und WHITEHURST keine Publikation von

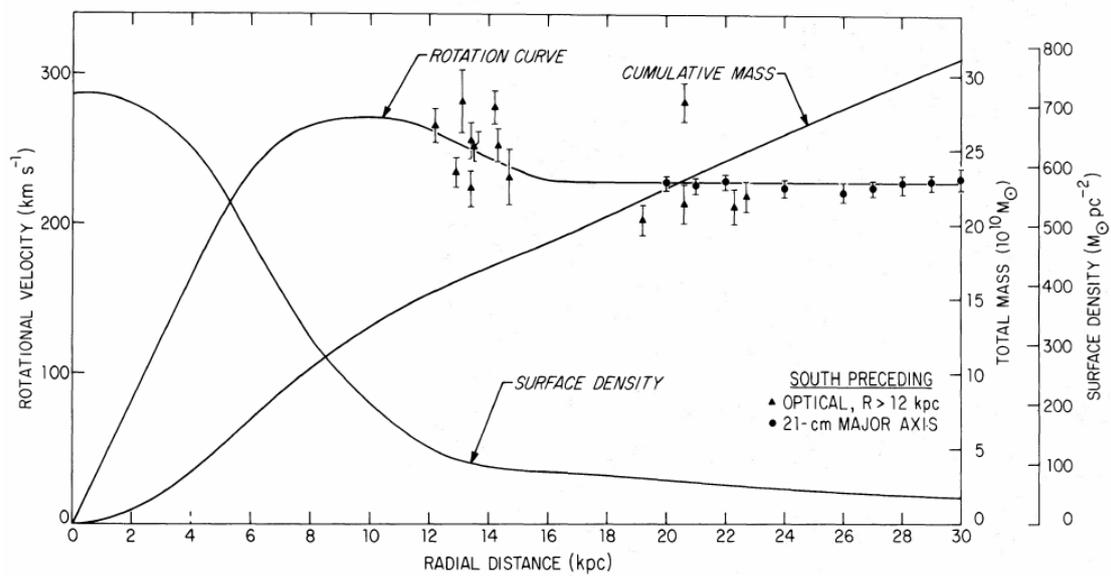


Abbildung 5.9: Gemessene Rotationskurve der Andromeda-Galaxie von ROBERTS und WHITEHURST. Die optischen Daten (Messpunkte mit ▲ eingetragen) sind von RUBIN und FORD [54] übernommen, die Daten aus der Doppler-Verschiebung der 21-cm-Linie (Messpunkte mit ● eingetragen) ergänzen die Kurve bis zu einem Abstand von 30 kpc vom Galaxiezentrum. [57, S. 343]

ZWICKY oder SMITH zitieren. Somit konnte auch im Jahr 1975 kein Zusammenhang zwischen den Massenbestimmungen in Spiralgalaxien und in großen Clustern wie Coma oder Virgo hergestellt werden. Dennoch war mit ihrer Messung nun nahegelegt, dass Dunkle Materie existieren muss. Auch im 21. Jahrhundert wurden die Messungen zur Rotationsgeschwindigkeit noch erweitert. So gelang es mit dem Radioteleskop Effelsberg und dem Green-Bank-Observatorium in West Virginia den flachen Rotationskurvenverlauf der Andromeda-Galaxie bis zu einem Abstand von 35 kpc aufzuzeichnen. Die Geschwindigkeit konnte zu ca. 226 Kilometer pro Sekunde bestimmt werden [58].

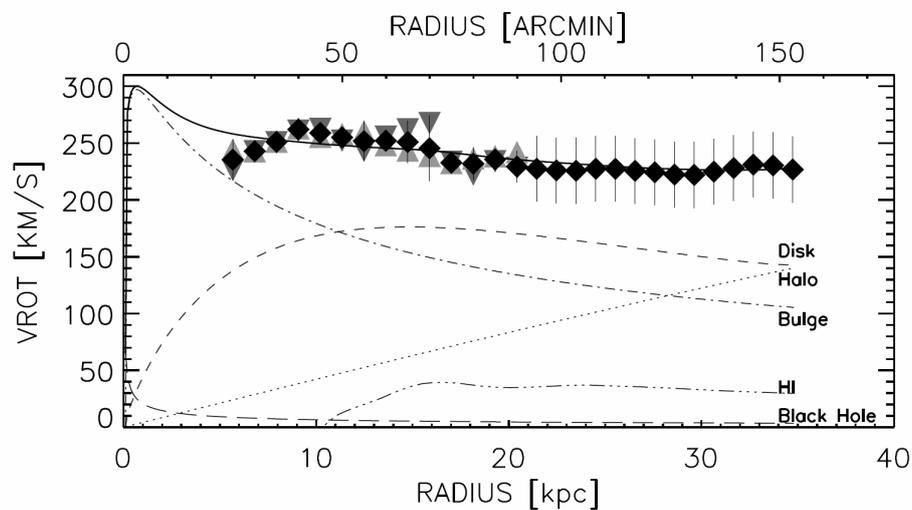


Abbildung 5.10: Gemessene Rotationskurve von CARIGNAN et al. für die Andromeda-Galaxie bis zu einem Abstand von 35 kpc vom Galaxiezentrum. [58, S. 111]

Die Existenz Dunkler Materie wurde damit immer wahrscheinlicher. Sämtliche Messungen zur Erweiterung der Rotationskurven scheinen die Vermutung ZWICKYS aus den 30er Jahren zu bestätigen. Dennoch ist anhand dieser Rotationskurven keineswegs klar, um was für eine Art Materie es sich handelt. Die Messungen der Rotationsgeschwindigkeit stellen jedoch ein klares Indiz für ihre Existenz dar.

5.2.3 Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion

Für die Übertragung auf den Schulunterricht ist es notwendig, die theoretischen Inhalte um experimentelle Untersuchungen zu ergänzen. Eine tatsächliche Messung der Radialgeschwindigkeit eines Sterns ist für gängige Schulen nahezu unmöglich. Hierzu benötigt man technisches Equipment, welches Sternwarten zur Verfügung steht, allerdings in Schulen üblicherweise nicht vorhanden sein dürfte. Neben den technischen Gerätschaften, wie Teleskopen mit der entsprechenden Steuerungseinheit und den notwendigen Messapparaturen, stellt sich auch bei einer tatsächlichen Messung an einer Sternwarte das rein praktische Problem des Zeitpunkts der Durchführung. Eine Messung der Doppleraufspaltung von Spektrallinien ist grundsätzlich nur bei Dunkelheit möglich, sodass eine Unterrichtssequenz nachts oder spät abends stattfinden müsste. Prinzipiell wäre sicher auch die Nutzung robotisch gesteuerter Teleskope für Radialgeschwindigkeitsmessungen möglich, jedoch ist hier die praktische Komponente für Schülerinnen und Schüler eher gering, da im Wesentlichen nur eine Analyse bereitgestellter Daten erfolgen kann. Für die praktische Umsetzung im realen Schulbetrieb ist es daher ratsam, auf einen Analogieversuch auszuweichen, mit welchem das grundlegende Prinzip einer solchen Messung verständlich gemacht und vorgeführt werden soll. Gerade der Dopplereffekt ist bereits aus dem Gebiet der Akustik bekannt. Für Schülerinnen und Schüler dürfte auch der fundierte Hintergrund der Frequenzverschiebung bereits im einführenden Jahr der Oberstufe bekannt sein, da sich gerade in diesem Schuljahr üblicherweise mit der Mechanik auseinandergesetzt wird und eine Unterrichtseinheit zu mechanischen Wellen vorgeschrieben ist. Hier wird im Rahmen der Interferenz auch der Dopplereffekt bei Schallwellen thematisiert¹. Im Rückgriff auf das Wissen zur Dopplerverschiebung bei Schallwellen ist es demnach denkbar, ein Analogieexperiment mit Schallwellen durchzuführen, um die Verschiebung der Frequenz eines Tons bei einem sich zum Beobachter hin oder einem vom Beobachter weg bewegenden Lautsprecher festzustellen. Ein solches Experiment ist im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und erprobt worden. Eine entsprechende Aus-

¹Der Autor bezieht sich hier auf das Bundesland Nordrhein-Westfalen, in welchem die hier vorgestellten Module erprobt wurden.

wertungssoftware wurde geschrieben, sodass automatisiert eine statistische Analyse der Messwerte vorgenommen werden kann. Realisiert wurde der Aufbau mit einer Fahrradfelge, welche in horizontaler Lage drehbar arretiert ist. Auf der Felgenaußenseite ist ein Lautsprecher angebracht. Die von ihm ausgesandten Tonfrequenzen werden mit einem Mikrofon aufgezeichnet, welches über die PC-Software **Cassy-Lab** ausgelesen wird. Ein solches Experiment ist für Schulen in der Regel problemlos realisierbar, da die Materialien in Form einer Messwernerfassungssoftware (hier **Cassy-Lab 2**) und eines Mikrofons in jeder Sammlung vorhanden und eine Fahrradfelge sowie ein Lautsprecher im Vorfeld beschaffbar sein dürften. Für die Schülerinnen und Schüler wird der physikalische Hintergrund der Messung der Dopplerverschiebung zwar nur in erster Näherung berücksichtigt, das grundlegende Prinzip aber in keinsten Weise vereinfacht oder vom fachlichen Anspruch reduziert, was die Durchführung und Analyse des Experiments gerade reizvoll macht. Die entsprechende Analogie der einzelnen Bauteile und Messinstrumente zu den realen Experimenten und Vorgängen ist nachfolgender Tabelle zu entnehmen.

Astronomisches Experiment		Analogieexperiment
Galaxie	↔	Fahrradfelge / Drehachse
Galaxiezentrum	↔	Drehachse der Felge
Stern	↔	Lautsprecher
Abstand des Sterns vom Galaxiezentrum	↔	Abstand des Lautsprechers von der Drehachse
Vom Stern ausgesandtes Licht	↔	Vom Lautsprecher ausgesandte Tonfrequenz
Lichtgeschwindigkeit	↔	Schallgeschwindigkeit
Spektrometer	↔	Mikrofon
Blau- und Rotverschiebung der Spektrallinien	↔	Verschiebung der Tonfrequenzen

Tabelle 5.1: Auflistung der Analogien zwischen der Messung zur Dopplerverschiebung von Spektrallinien und dem entwickelten Experiment zur Dopplerverschiebung von Tonfrequenzen.

Es bleibt festzuhalten, dass die geplante Elementarisierung durch den Analogieversuch den Bedingungen nach 4.2 genügt, da sie aus den zuvor genannten Gründen für die Schülerinnen und Schüler angemessen erscheint, fachlich richtig sowie zielorientiert und entwicklungsfähig ist. Die fachliche Richtigkeit bezieht sich hier selbstredend nur auf den dargestellten Verwendungszweck. Dass die Analogie von Schall und Licht nicht allgemein gültig ist, kann man sich leicht überlegen. Schallwellen breiten sich longitudinal aus, wohingegen der Modellierung des Lichts Transversalwellen zugrundeliegen. Allein durch die geometrische Lagebeziehung zwischen Wellenausbreitungsrichtung und Schwingungsrichtung ist schon eine Grenze der Analogie gegeben, die jedoch in dem hier vorgestellten Analogieexperiment keine Rolle spielt.

5.2.4 Analogieexperiment zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie

5.2.4.1 Experimenteller Aufbau, Kalibrierung und Durchführung

Im Analogieexperiment zur Messung eines Rotationsgeschwindigkeitsdiagramms einer Galaxie wird ein Lautsprecher drehbar auf einer Fahrradfelge montiert. Über ein ausgerichtetes Mikrofon wird die Frequenz eines Tons aufgenommen, welcher vom Lautsprecher abgespielt wird und mit dem Messwerterfassungssystem **Cassy Lab 2** graphisch am PC dargestellt. Vorab sei an dieser Stelle angemerkt, dass je nach Schulausstattung auch vergleichbare Aufbauten und Messwerterfassungssysteme genutzt werden können. Mit einer drehbaren Fahrradfelge und **Cassy Lab 2** sind vom Verfasser dieser Arbeit lediglich in den Sammlungen häufig vorzufindende Apparaturen und Systeme verwendet worden.

Experimenteller Aufbau

Für den in Abbildung 5.11 dargestellten Aufbau wurde folgendes Equipment verwendet:

- Fahrradfelge (hier von der Marke Quando mit einem Durchmesser von $d \geq 58$ cm), horizontal drehbar mit einer Nabenvorlängerung auf einem Stativfuß arretiert,



Abbildung 5.11: Aufbau des Analogieexperiments zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit.

- Lautsprecher (hier ein Anker Bluetooth Sound Core Mini), mit Kabelbinder am Außenrand der Felge befestigt,
- Universalmikrofon (hier von der Firma Leybold Didactic, für *Cassy* geeignet),
- Sensor-Cassy 2 mit USB-Kabel und Netzkabel sowie einem angeschlossenen PC mit der Software *Cassy Lab 2*,
- Tondatei (hier von einem Smartphone über Bluetooth an den Lautsprecher gesendet, alternativ mit Frequenzgenerator).

Wichtig bei einem Nachbau des Experiments ist die Ausrichtung der Fahrradfelge. Diese muss frei drehbar sein und sollte auch nicht zu einer Seite hin kippen. Des Weiteren sollte die Fahrradfelge möglichst einen großen Durchmesser haben. Das Experiment ist mit unterschiedlichen Felgengrößen durchgeführt worden. In Abbildung 5.11 ist eine kleine handliche Felge zu sehen mit einem Durchmesser von 58 cm. Kleiner als diese sollte die Felge nicht sein, da sonst Überlagerungen der vom Mikrofon gemessenen Frequenzen auftreten, sobald der Lautsprecher sich zum Beobachter bewegt und sich wieder von ihm weg bewegt. Abschließend ist zu bedenken, dass als Lautsprecher ein möglichst kleines Gerät verwendet wird, welches ohne Kabel auskommt. Ein Kabel würde sich beim Drehen der Felge aufwickeln, sodass hier weiteres Stativmaterial notwendig werden würde, um dies zu verhindern. Empfehlenswert sind daher Lautsprecher mit integrierter Speichermög-

lichkeit oder mit Bluetooth-Empfangsmöglichkeit, sodass die Tondatei vom Smartphone oder PC an den Lautsprecher gesendet werden kann. Die Tondateien lassen sich selbst erzeugen, indem man einen Frequenzgenerator an einen Lautsprecher anschließt und den Ton aufnimmt oder über die Homepage gängiger Lehrversuch-Anbieter eine entsprechende Tondatei herunterlädt. In der vorliegenden Arbeit wurde beides getestet und keine nennenswerten Unterschiede zwischen diesen beiden Möglichkeiten festgestellt.

Kalibrierung

Für die nachfolgenden Experimente ist es in jedem Fall wichtig, die Grundfrequenz des Tons zu kennen, welcher vom Lautsprecher ausgesendet wird. Diese Grundfrequenz weicht möglicherweise geringfügig von der zuvor eingestellten Frequenz zur Erzeugung der Tondatei ab, da durch den verwendeten Lautsprecher Verzerrungen auftreten können. Sofern man die Tondatei über eine Bluetooth-Verbindung mit dem Lautsprecher abspielt, kann es auch hier zu leichten Verschiebungen der Frequenz kommen. In einem Vorexperiment zur Kalibrierung der Frequenz muss also zunächst die Grundfrequenz f_0 mit entsprechendem Fehler bestimmt werden. In dem hier exemplarisch vorgestellten Experiment wird eine Tondatei mit einem Ton der Frequenz $f = 400$ Hz vom Lautsprecher empfangen und wiedergegeben. Diese Frequenz hat den Vorteil, dass sie gut hörbar ist, und sie kann somit aus didaktischen Gründen legitimiert werden. Misst man das Frequenzspektrum für eine bestimmte Zeit (voreingestellt bei **Cassy Lab** sind 400 ms), so wird um die Frequenz 400 Hz herum eine gaußförmige Verteilung zu erwarten sein. Im Frequenzspektrum, welches **Cassy Lab** automatisiert mit Hilfe einer schnellen Fourier-Transformation (FFT: fast Fourier transform) erstellen kann, werden auf der x -Achse die Frequenzen (zwischen 0 und 2500 Hz) und auf der y -Achse die Intensität als Spannung (zwischen 0 und 1,5 V) aufgetragen. Die Achsen lassen sich in Bezug auf die Einteilung und das dargestellte Intervall konfigurieren. Für die Bestimmung der Grundfrequenz bietet es sich an, eine geringe Lautstärke zu wählen und das Mikrofon in etwa in dem Abstand aufzubauen, wie es später auch im Experiment verwendet wird. Das Messintervall sollte fein eingestellt werden. In der nachfolgend vorgestellten Messung ist das Messintervall auf 20 μ s bei einer Messzeit von 400 ms gesetzt worden. Das im Dia-

gramm 5.12 dargestellte Intervall ist auf [380 Hz; 420 Hz] eingestellt, sodass um 400 Hz herum ein Peak erkennbar ist.

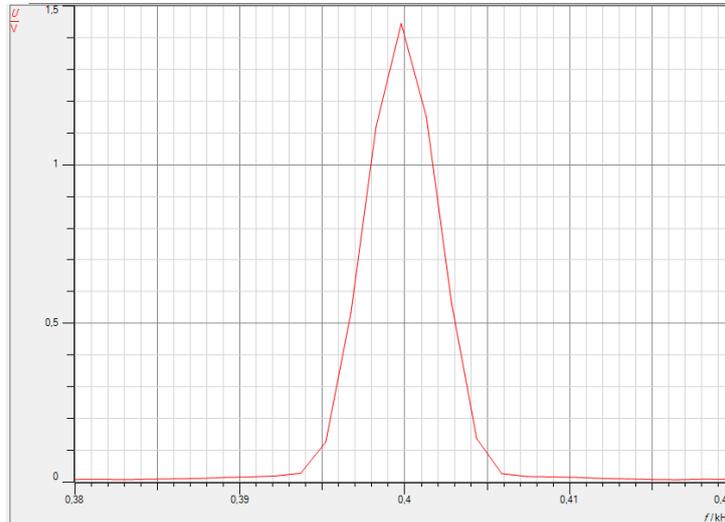


Abbildung 5.12: Beispielmessung bei einer eingestellten Frequenz von $f = 400$ Hz.

Die Verteilung ist zu beiden Seiten hin abfallend und kann statistisch mit der GAUSS-Verteilung angenähert werden. In einer Versuchsreihe wurde der Ton von 400 Hz insgesamt zwanzig Mal mit diesen Einstellungen gemessen und ein Gauß-Fit $G_{\text{Fit}}(f)$ gemäß

$$G_{\text{Fit}}(f) = \text{const.} \cdot \exp\left(-\frac{(f - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.10)$$

durchgeführt, vgl. Abbildung 5.13.

Dabei ist μ der Erwartungswert der zugrunde gelegten Gauß-Verteilung und σ die Standardabweichung, welche nach links und rechts von μ aus ein Intervall begrenzt, in welchem sich gemäß nachstehender Rechnung 68,3% der Messwerte befinden. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die gemessene Frequenz zu einem beliebigen Zeitpunkt

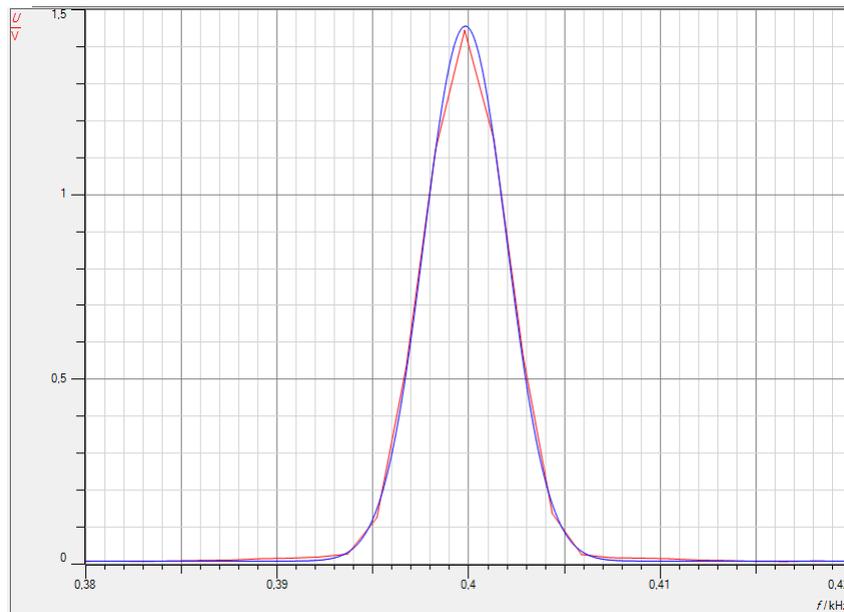


Abbildung 5.13: Frequenzmessung mit eingezeichnetem Gauß-Fit.

innerhalb der Messzeit einen Wert im Intervall $f_0 \pm \sigma$ annimmt, 68,3% beträgt.

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}(|f - \mu| \leq \sigma) &= \mathbb{P}(\mu - \sigma \leq f \leq \mu + \sigma) = \mathbb{P}\left(-1 \leq \frac{f - \mu}{\sigma} \leq 1\right) \\
 &= \Phi(1) - \Phi(-1) = \Phi(1) - [1 - \Phi(1)] \\
 &= 2 \cdot \Phi(1) - 1 = 2 \cdot 0,8413 - 1 = 0,6826 \approx 68,3\% . \quad (5.11)
 \end{aligned}$$

Dabei gilt aufgrund der Gauß-Verteilung:

$$\Phi(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{1}{2} t^2} dt . \quad (5.12)$$

Führt man dieses (Vor-)Experiment mehrfach durch, lässt sich die Grundfrequenz f_0 als gewichteter Mittelwert

$$f_0 = \langle \mu \rangle_{\text{gew}} = \frac{\sum_i \frac{\mu_i}{\sigma_{\mu_i}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{\mu_i}^2}} \quad (5.13)$$

der insgesamt n einzelnen Erwartungswerte μ_i der Gauß-Fits berechnen. Der Fehler auf die Grundfrequenz berechnet sich als Fehler auf den gewichteten Mittelwert

$$\sigma_{f_0} = \sigma_{\langle \mu \rangle_{\text{gew}}} = \pm \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{1}{\sigma_{\mu_i}^2}}} \quad . \quad (5.14)$$

Es ergab sich bei insgesamt 20 Messungen eine Grundfrequenz von

$$f_0 = (400 \pm 2) \text{ Hz} \quad .$$

Durchführung des Experiments

Für die Durchführung des Experiments muss man sich nun auf eine Felgenreiße festlegen. Ein großer Durchmesser hat grundsätzlich den Vorteil, dass die Messung der Tonfrequenz des sich auf das Mikrofon zu bewegenden und sich vom Mikrofon weg bewegenden Lautsprechers direkt nacheinander erfolgen kann, da ausreichend Zeit zwischen den beiden Lautsprecherpositionen liegt, in denen die eine Messung gestoppt und die andere gestartet werden kann. Allerdings hat eine große Felge auch den Nachteil, dass eine einfache Arretierung über einen Stativfuß je nach Geschwindigkeit des Lautsprechers nicht ausreicht, da die Apparatur sonst wackelt oder kippt. Eine kleine Felge ist dementsprechend für den Aufbau gut geeignet, hat allerdings den Nachteil, dass unter Umständen die Zeit zwischen der Zu- und Wegbewegung des Lautsprechers nicht ausreicht, um eine Messung zu stoppen und die nächste zu starten. Hier muss dann eine Umdrehung des Lautsprechers ohne Messung erfolgen. Mehr als eine Drehung sollte jedoch nicht zwischen den beiden Messungen liegen, da sonst die Geschwindigkeit der Felge durch Reibung bereits zu stark abgenommen hat.

Um die Verschiebung δf zu messen, muss zunächst die Felge mit dem darauf befindlichen Lautsprecher angedreht werden. Es sei hier darauf hingewiesen, dass das Andrehen per Hand erfolgen sollte, da ein Antrieb über einen Motor zusätzliche Geräusche verursacht, sodass es zur Überlagerung unterschiedlicher Frequenzen kommt, die sich mit **Cassy Lab** nicht ohne Weiteres herausfiltern lassen. Während der Messung bleibt das Mikrofon an

gleicher Stelle, die Messeinstellungen müssen je nach Geschwindigkeit des angedrehten Rades sowie je nach Frequenz angepasst werden. Die Einstellungen hierzu findet man im **Cassy**-Menü der jeweiligen Messung.

Die Auswertung der Daten kann dann entweder mit **Cassy Lab** oder mit **Root** erfolgen. **Cassy Lab** bietet sich hierbei aufgrund der intuitiven Bedienung für einen ersten Testlauf an, die Auswertung mit der entwickelten Analysesoftware, welche von **Root** eingelesen wird, ist vor allem für eine automatisierte statistische Analyse mit interaktiver Darstellung angedacht.

5.2.4.2 Analyse

Die Analyse gliedert sich grob in zwei Schritte, so wie in Kapitel 5.2.1 dargestellt. Zunächst muss ein Wert für die Geschwindigkeit des rotierenden Körpers ermittelt werden, anschließend der Abstand von diesem zur Rotationsachse. Bei der nachfolgend ausgewerteten Messung ist eine 28-Zoll-Felge mit einem Durchmesser von ca. 71 cm verwendet worden, um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten.

1. *Geschwindigkeitsbestimmung*

Die Bestimmung der Geschwindigkeit erfolgt über die Berechnung der Dopplerverschiebung im Frequenzspektrum. Unabhängig davon, ob die Auswertung mit **Cassy Lab** oder **Root** erfolgt, wird an die gemessenen Peaks des Frequenzspektrums ein Gauß-Fit angelegt, um so die Peakschwerpunkte und anschließend den Abstand der beiden Peakschwerpunkte als Dopplerverschiebung zu berechnen. Der eigentliche Fit wird nach der Funktion aus Gleichung 5.10 durchgeführt. Die Dopplerverschiebung sowie der Fehler darauf, welcher sich aus der GAUSS'schen Fehlerfortpflanzung ergibt, berechnen sich dann gemäß

$$\delta f = \mu_2 - \mu_1 \quad \text{und} \quad \sigma_{\delta f} = \pm \sqrt{\sigma_{\mu_1}^2 + \sigma_{\mu_2}^2} \quad . \quad (5.15)$$

Einführende Analyse mit Cassy Lab 2.

Für die Auswertung mit **Cassy Lab** wird zunächst an die jeweils durchgeführte Messung ein Gaußkurve angelegt. Durch Rechtsklick öffnet sich ein Fenster mit den zur Verfügung stehenden Optionen. Über „Anpassung“ und anschließend „Gaußkurven gleicher Breite“ wird dieser Fit für die geplante Analyse gespeichert.

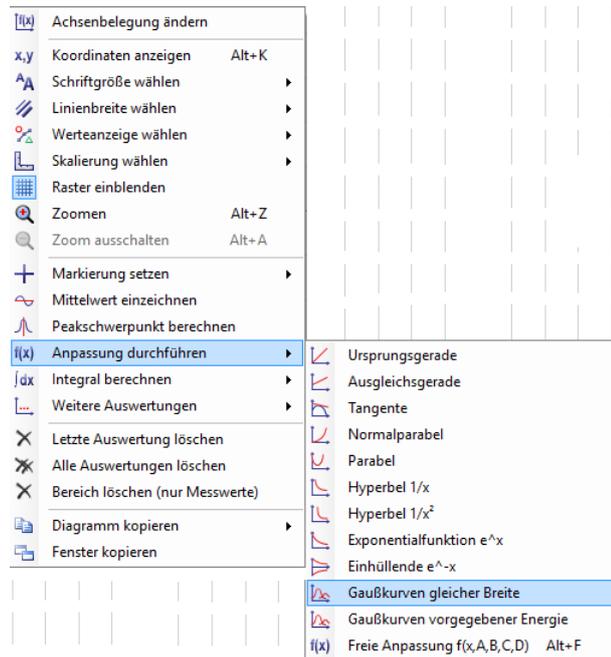


Abbildung 5.14: Analyse- und Anpassungsoptionen von **Cassy Lab 2**.

Man wählt anschließend das Intervall aus, in welchem der Fit angelegt werden soll, indem man die jeweilige Messung an der Stelle anklickt, an welcher der Fit beginnen soll und mit gedrückter linker Maustaste bis zum Intervallende fährt. Die Anlegung des Fits erfolgt dann automatisch. Der Peakschwerpunkt ist hierbei als μ unten in der Fußzeile des Programms abzulesen, der Fehler σ als Standardabweichung der Gauß-Verteilung wird ebenfalls in der Fußzeile angegeben. Sobald ein neuer Fit im Diagramm hinterlegt wird, wird die Fußzeile jedoch überschrieben, sodass die Werte per Hand übertragen oder abgespeichert werden müssen, bevor der zweite Fit angelegt wird. Die Differenz der Peakschwerpunkte sowie der Fehler auf die Differenz lässt sich dann manuell ermitteln.

Die Auswertung einer Messung bei einem Ton der Grundfrequenz $f_0 = 400$ Hz wird nachfolgend vorgestellt. Die Fußzeilen mit den entsprechenden Parametern und der

in Klammern geschriebenen Fitfunktion lauten:

$$A_1 = 1\,4467 \text{ Hz}; \mu_1 = 0\,403 \text{ kHz}; \sigma_1 = 0\,002 \text{ kHz}; B_1 = 0\,0097 \text{ Hz}$$

$$A_2 = 0\,7211 \text{ Hz}; \mu_2 = 0\,398 \text{ kHz}; \sigma_2 = 0\,002 \text{ kHz}; B_2 = 0\,0096 \text{ Hz}$$

$$\text{mit } A_i \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) + B_i \quad .$$

Ausgehend hiervon muss dann eine manuelle Bestimmung der Dopplerverschiebung und seines Fehlers vorgenommen werden. Es ergeben sich hier

$$\delta f = \mu_1 - \mu_2 = (403 - 398) \text{ Hz} = 5 \text{ Hz} \quad \text{sowie} \quad (5.16)$$

$$\sigma_{\delta f} = \pm \sqrt{(2 \text{ Hz})^2 + (2 \text{ Hz})^2} = \pm 2,8 \text{ Hz} \quad . \quad (5.17)$$

Damit folgt als Ergebnis: $\delta f = (5 \pm 3) \text{ Hz}$.

Daraus lässt sich nun die Geschwindigkeit δv , mit welcher sich der Lautsprecher bewegt, bestimmen. Es gilt Formel 5.7. Hierbei ist mit der Geschwindigkeit c in diesem Analogieexperiment nicht die Lichtgeschwindigkeit, sondern die Schallgeschwindigkeit in Luft gemeint. Die Grundfrequenz f_0 ist zuvor bei der Kalibrierung bestimmt worden. Es folgt

$$\delta v = \frac{\delta f \cdot v_s}{2f_0} \quad \text{mit } \delta f = (5 \pm 3) \text{ Hz} \quad , \quad f_0 = (400 \pm 2) \text{ Hz}$$

$$v_s = (343 \pm 3) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad .$$

Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist stark temperaturabhängig. Ihr Fehler ist mit $\pm 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ großzügig geschätzt worden. Für den Fehler auf den Wert von δv ergibt sich nach GAUSS'scher Fehlerfortpflanzung:

$$\sigma_{\delta v} = \pm \delta v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\delta f}}{\delta f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{f_0}}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{v_s}}{v_s}\right)^2} \quad . \quad (5.18)$$

Es ergibt sich:

$$\delta v = \frac{5 \text{ Hz} \cdot 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot 400 \text{ Hz}} = 2,14375 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad , \quad (5.19)$$

$$\sigma_{\delta v} = \pm 2,14375 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{5}\right)^2 + \left(\frac{2}{400}\right)^2 + \left(\frac{3}{343}\right)^2} \simeq 1,28 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad . \quad (5.20)$$

Damit ermittelt man für die Geschwindigkeit δv , mit welcher sich der Lautsprecher bewegt:

$$\delta v = (2,1 \pm 1,3) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad . \quad (5.21)$$

Die Auswertung mit **Cassy Lab 2** hat den großen Vorteil, dass Messung und Auswertung mit einer Software durchgeführt werden. Direkt an den Messwerten können Fits angelegt und somit die Auswertung vorgenommen werden. Nachteilig sind allerdings die eher eingeschränkten Möglichkeiten bei der Darstellung und Weiterverarbeitung (beispielsweise des Zoomens, der Beschriftung sowie des Abspeicherns) sowie die dann folgende manuelle Bestimmung der Dopplerverschiebung und der Geschwindigkeit. Daher wird im Folgenden eine automatisierte Auswertung mit der Möglichkeit einer interaktiven Darstellung vorgestellt.

Automatisierte Analyse mit Root.

Für eine automatisierte Auswertung müssen zunächst die Messungen von **Cassy Lab** als Textdatei gespeichert werden, sodass diese Datei dann über eine neue Software eingelesen werden kann.

Die beiden durchzuführenden Messungen sollten als zwei unterschiedliche Messreihen aufgenommen werden. **Cassy** selbst schreibt in eine Textdatei grundsätzlich nur eine Messung. Für die zwei Messungen ergeben sich also zwei verschiedene Textdateien, die nacheinander eingelesen werden müssen. **Cassy Lab 2** speichert die Daten dabei in vier Spalten, die mit einem Tabulator getrennt werden. In den Spalten stehen hierbei nacheinander die Zeit, die Frequenz, die Spannung sowie die Fourier-Transformierte FFT (fast Fourier transform).

```

"Zeit" t / ms   "Frequenz" f / kHz   "Spannung" U_A1 / V   "FFT" U / V
4.2    0.3204345703125 -0.249  0.00370696685140261
4.22   0.32196044921875  -0.216  0.00454384419603483
4.24   0.323486328125   -0.198  0.00538896147081074
4.26   0.32501220703125  -0.177  0.00486572198489685
4.28   0.3265380859375   -0.1365 0.00390444762181904
4.3    0.32806396484375   -0.108  0.00284551028090533
4.32   0.32958984375     -0.0765 0.00316191596940996
4.34   0.33111572265625   -0.033  0.00351675674501797
4.36   0.3326416015625    -0.0045 0.00507508394187835
4.38   0.33416748046875   0.0165  0.00389484920285236
4.4    0.335693359375     0.0495  0.0049684097406763
4.42   0.33721923828125   0.078   0.00398176893294618
    
```

Abbildung 5.15: Auszug aus einer Textdatei mit den von **Cassy Lab** aufgenommenen Messwerten.

Die Analysesoftware wird mit dem Programm **Root** eingelesen, welches über die Konsole gestartet werden kann. Mit einem vorangestellten `.x` und dem anschließenden Namen der Analysesoftware, wird diese geladen und ausgeführt. Beispielfhaft ist hier der Ausführbefehl für die geschriebene Analysesoftware angegeben.

```
.x Analysesoftware.cpp()
```

Sollten bei einer eigenen Analyse Änderungen am Programm vorgenommen werden und sich der Name der Datei ändern, muss beim Ausführen der Datei der geänder-

te Name eingegeben werden. Genauere Informationen zur Bedienung der Software, zum Setzen der notwendigen Parameter und auch der vollständige Programmcode sind in Anhang B.2 zu finden. Indem die Frequenz auf die x -Achse und die FFT auf die y -Achse geplottet wird, werden Punkte in einem Diagramm eingetragen, sodass in einem manuell einstellbaren Intervall ein Gauß-Fit an die Punkte angelegt werden kann. Das Intervall kann dabei gesetzt werden, muss es aber nicht. Aufgrund der Berechnungsdauer je nach Anzahl der einzulesenen Messwerte bietet es sich aber an, manuell einzugrenzen, wo ein Fit erfolgen soll. In den nachfolgend vorgestellten Messungen ist das Intervall beispielsweise aufgrund der Übersichtlichkeit mit 380 bis 420 Hz klein gewählt worden. Eine Vergrößerung des Intervalls führt zu keiner Änderung der Ergebnisse, sondern bewirkt lediglich, dass im Graphen der Fit links und rechts weiter gezeichnet ist. So werden also mit der Analysesoftware zwei Textdateien eingelesen, die Werte graphisch dargestellt und ein Fit angelegt. Um nun beide Kurven in einem Koordinatensystem anzuzeigen, wird durch die Analysesoftware ein `MultiGraph` erzeugt, in welchem beide Kurven übereinander gelegt und die Werte der Fitparameter in einer Legende eingetragen werden. Die Auswertung der zuvor auch mit `Cassy Lab` erfolgten Messung für die Frequenz von $f_0 = (400 \pm 2)$ Hz ist mit Abbildung 5.16 nachfolgend eingefügt.

In der Konsole erscheint bei Ausführen der Software dann automatisiert die Berechnung aller relevanter Größen (siehe hierzu Abbildung 5.17), nämlich die Bestimmung der Peakschwerpunkte sowie die der Dopplerverschiebung und der Geschwindigkeit, jeweils mit Fehlern.

```

Peak 1      (403 +- 2) Hz
Peak 2      (398 +- 2) Hz
Dopplerverschiebung    (5 +- 2.82843) Hz
Rotationsgeschwindigkeit    (2.14375 +- 1.28643) m/s
    
```

Es ergibt sich eine Rotationsgeschwindigkeit von $\delta v = (2,1 \pm 1,3) \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

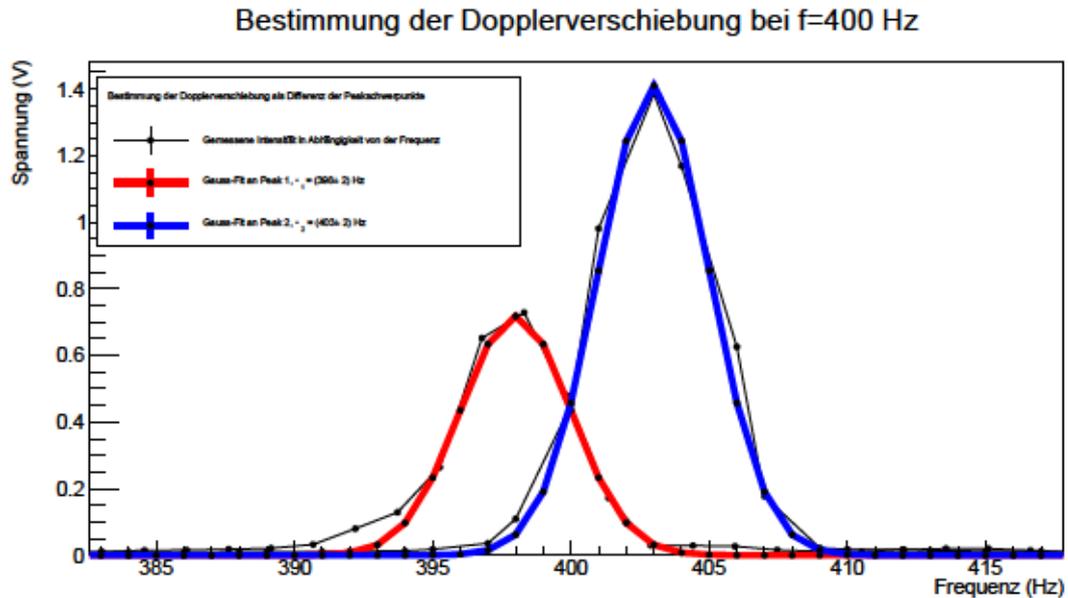


Abbildung 5.16: Graphische Auswertung durch die Analysesoftware mit Root.

```

philipp@Philipp-Desktop:~/Dokumente/Dopplerverschiebung$ root
*****
*          W E L C O M E  t o  R O O T          *
*          *          *          *          *   *
*  Version  5.34/32      23 June 2015          *
*          *          *          *          *   *
*  You are welcome to visit our Web site      *
*  http://root.cern.ch                        *
*          *          *          *          *   *
*****

ROOT 5.34/32 (v5-34-32@v5-34-32, Jun 23 2015, 17:58:02 on linux)

CINT/ROOT C/C++ Interpreter version 5.18.00, July 2, 2010
Type ? for help. Commands must be C++ statements.
Enclose multiple statements between { }.
root [0] .x Analyse_Analogieexperiment_Dopplereffekt.cpp ("Messwerte_1.txt", "Messwerte_2.txt", "graph.root"; "", "", ""
)
Peak 1: (403 +/- 2) Hz
Peak 2: (398 +/- 2) Hz
Dopplerverschiebung: (5 +/- 2.82843) Hz
Rotationsgeschwindigkeit: (2.14375 +/- 1.28643) n/s
(bool)1
root [1] new TBrowser
(class TBrowser*)0x981af30
root [2]
    
```

Abbildung 5.17: Konsole nach Ausführen der Analysesoftware mit Root und Öffnen des TBrowsers.

2. *Abstandsbestimmung*

Die Bestimmung des Abstands erfolgt nicht nach den in Kapitel 5.2.1 dargestellten fachlichen Grundlagen, da hier keine astronomische Messung der Helligkeit vorgenommen werden kann. Sehr wohl kann aber zur Vervollständigung eine klassische Abschätzung des Abstands nach den Gesetzen der Mechanik erfolgen. Die Geschwindigkeit ist definiert als Quotient aus zurückgelegter Wegstrecke und der für diese Wegstrecke benötigten Zeit. Somit ergibt sich:

$$v = \frac{\delta s}{\delta t} = \frac{2\pi r}{T} \quad \Rightarrow \quad r = \frac{v \cdot T}{2\pi} \quad . \quad (5.22)$$

Durch Einsetzen der jetzt bereits bestimmten Rotationsgeschwindigkeit in Formel 5.22 lässt sich der Abstand berechnen. Hierbei ist die Geschwindigkeit v die Rotationsgeschwindigkeit δv des Objekts. Man benötigt weiterhin die Zeit T , welche entweder per Hand oder aber mit Lichtschranken gemessen werden kann. Es ergeben sich demnach folgende Formeln für den Abstand und den Fehler für diesen:

$$r = \frac{\delta v \cdot T}{2\pi} \quad , \quad \sigma_r = \pm r \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\delta v}}{\delta v}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} \quad . \quad (5.23)$$

Die Umlaufzeit auf der verwendeten Felge wurde bestimmt zu $T = (1,1 \pm 0,2)$ s, womit sich für den Abstand folgende Werte berechnen lassen:

$$r = \frac{2,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,1 \text{ s}}{2\pi} \simeq 0,368 \text{ m} \quad , \quad (5.24)$$

$$\sigma_r = \pm 0,368 \text{ m} \cdot \sqrt{\left(\frac{1,3}{2,1}\right)^2 + \left(\frac{0,2}{1,1}\right)^2} \simeq \pm 0,23 \text{ m} \quad . \quad (5.25)$$

Damit erhält man $r = (0,4 \pm 0,2)$ m.

Der Fehler auf den Abstand ist extrem groß, was aber aufgrund der kleinen Zeitspanne und der ohnehin großen Fehler auf Zeit und vor allem Rotationsgeschwindigkeit zu erwarten war. Berechnet man an dieser Stelle den Maximalfehler für den Abstand r ,

so ergibt sich

$$\sigma_r^{max} = \pm r \cdot \sqrt{\left| \frac{\sigma_{\delta v}}{\delta v} \right| + \left| \frac{\sigma_T}{T} \right|} \simeq \pm 0,3 \text{ m} \quad . \quad (5.26)$$

Der bestimmte Fehler liegt also nahe am Maximalfehler für den Wert von r . Eine genauere Einschätzung für den praktischen Gebrauch folgt in Kapitel 5.2.4.3. Der Wert für r selbst liegt mit erstaunlicher Genauigkeit am tatsächlichen Wert des Abstands. Der Radius der verwendeten Felge liegt bei 35,6 cm, womit dieser klar im 1σ -Bereich der Messung liegt.

Ist die Auswertung bis hierhin erfolgt, hat man einen Wert für die Rotationsgeschwindigkeit und einen Wert für den Abstand ermittelt. Dies ergibt also in einem Rotationsgeschwindigkeitsdiagramm einen Punkt. Führt man dieses Experiment nun für mehrere Abstände durch, so lassen sich weitere Punkte in das Diagramm eintragen, sodass auch das Zeichnen der entsprechenden Kurve möglich wäre. Dass dies nicht weiter praktikabel ist, zeigen sowohl die Dimensionen des Experiments sowie die Fehler der Ergebnisse. Allerdings ist das zugrundeliegende Messprinzip für das Erstellen einer galaktischen Rotationskurve exakt abgebildet worden.

5.2.4.3 Resultate und Bewertung

An dieser Stelle sollen nun einige Resultate für den Einsatz im Schulunterricht genannt und eine Bewertung des Experiments vorgenommen werden. Das Experiment kann nach der Behandlung der zuvor genannten fachlichen Grundlagen mit schulüblichen und einfach beschaffbaren Mitteln durchgeführt werden. Die Ausrichtung und Inbetriebnahme des Experiments benötigt etwas Zeit, sodass hier angeraten wird, das Experiment erst einmal ohne Schülerinnen und Schüler auszuprobieren. Wichtig ist, dass ein möglichst rauschfreier und gleichzeitig kleiner Lautsprecher verwendet wird, der auch große Lautstärken abspielen kann. Des Weiteren sollte nach Möglichkeit eine große Felge verwendet werden. Das Experiment selbst ist ohne größeren Aufwand durchführbar. Allerdings sind aufgrund der bereits genannten Aspekte große Sorgfalt bei der Arretierung und Durch-

führung des Experiments notwendig, um die Fehlerbereiche der Messwerte nicht zu groß werden zu lassen.

Da es jedoch bei diesem Experiment nicht um eine weitere Auswertung der Ergebnisse geht, sondern vielmehr das Messprinzip und die ersten Analyseschritte gezeigt werden sollen, sind die hohen Fehler in Kauf zu nehmen. Wichtig ist in jedem Fall, dass den Schülerinnen und Schülern die Analogie zum tatsächlichen astronomischen Messprinzip verständlich gemacht wird und sie erkennen, dass durch die Aufnahme weiterer Daten eine Rotationskurve entsteht.

Zur Vollständigkeit sei angemerkt, dass das hier vorgestellte astronomische Messprinzip durch eine mechanische Messung der Geschwindigkeit etwa ergänzt werden kann, wie in [59] dargestellt. So kann im Unterricht ein Vergleichswert der Rotationsgeschwindigkeit ermittelt werden und damit das Ergebnis des hier vorgestellten Experiments mit seinen Analysemöglichkeiten noch weitergehend im Rahmen einer Fehleranalyse untersucht werden. Es wird an dieser Stelle nicht weiter auf das bekannte mechanische Messprinzip eingegangen, da originäre Zielsetzung des in diesem Modul vorgestellten Analogieexperiments ist, das astronomische Messprinzip in analoger Weise abzubilden.

5.2.5 Vertiefende Aufgaben für den Unterricht

1. Die Rotationskurve unseres Sonnensystems entspricht einer KEPLER-Kurve. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeit der Planeten proportional zur Wurzel aus dem Reziproken des Abstands zur Sonne ist. Es gilt also $v \propto \sqrt{\frac{1}{r}}$.

Leiten Sie diese Beziehung einmal mit dem Kräftegleichgewicht und einmal mit dem dritten KEPLER'schen Gesetz her.

Lösung: Es kann sich leicht überlegt werden, dass die hier wirkende Gravitationskraft eine Radialkraft ist. Die Herleitung erfolgt also durch Gleichsetzen der Formeln von Zentripetal- und Gravitationskraft:

$$\left. \begin{array}{l} F_Z = \frac{mv^2}{r} \\ F_G = G \frac{mM}{r^2} \end{array} \right\} \frac{mv^2}{r} = G \frac{mM}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \propto \sqrt{\frac{1}{r}} .$$

Herleitung mit dem 3. KEPLER'schen Gesetz:

$$\begin{aligned} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 &= \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 \Rightarrow \frac{r_1^3}{T_1^2} = \text{const.} \Rightarrow \frac{r_1^2}{T_1^2} \cdot r_1 = \text{const.} \\ &\Rightarrow v_1^2 \cdot r_1 = \text{const.} \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{\text{const.}}{r_1}} \Rightarrow v \propto \sqrt{\frac{1}{r}} . \end{aligned}$$

2. Zeichnen Sie mit Hilfe der abgedruckten Konstanten zu den Planeten in unserem Sonnensystem maßstabsgetreu die Rotationskurve und zeigen Sie anschließend graphisch, dass $v \propto \sqrt{\frac{1}{r}}$ gilt.

Planet	Radius (km)	mittlere Entfernung von der Sonne (10^6 km)	mittlere Bahnge- schwindigkeit $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
Merkur	2440	57,9	47,90
Venus	6050	108,2	35,04
Erde	6371	149,6	29,79
Mars	3400	227,9	24,14
Jupiter	71400	778,3	13,07
Saturn	60300	1427	9,65
Uranus	25600	2870	6,81
Neptun	24800	4496	5,44

Lösung: Teil 1: siehe Abbildung 5.1.

Teil 2: Auftragung von v gegen $\sqrt{\frac{1}{r}}$ liefert eine Ursprungsgerade im Koordinatensystem, siehe Abbildung 5.18. Damit ist die Proportionalität graphisch gezeigt.

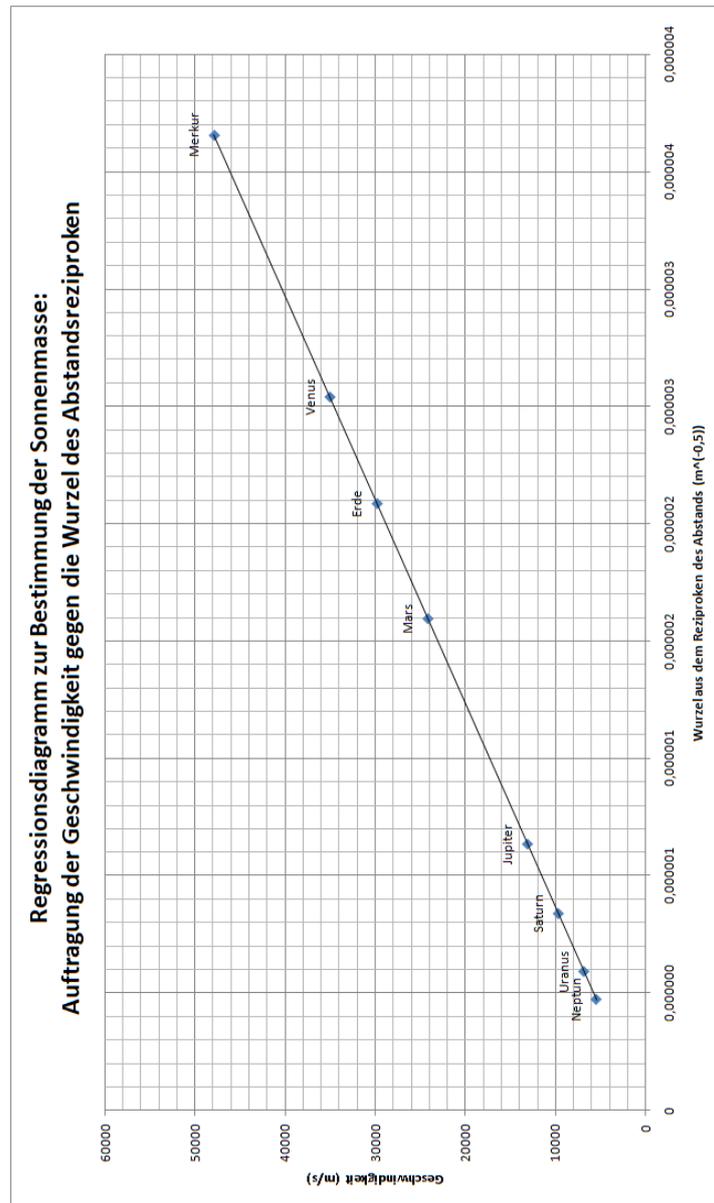


Abbildung 5.18: Auftragung von v gegen $\sqrt{\frac{1}{r}}$ für die Aufgaben 2 und 3.

3. *Bestimmen Sie aus der nachgewiesenen Proportionalität bei gegebener Gravitationskonstanten die Masse der Sonne.*

Lösung: Eine Regressionsgerade wird in der Auftragung der Geschwindigkeit v gegen $\sqrt{\frac{1}{r}}$ gezeichnet und die Steigung bestimmt. Die Steigung entspricht nach obigen Überlegungen ($v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$) dem Wert von \sqrt{GM} . Da die Gravitationskonstante als bekannt vorausgesetzt werden soll, ergibt sich durch Quadrieren der Regressionsgeradensteigung und anschließendes Dividieren durch die Gravitationskonstante der Wert für die Sonnenmasse.

Konkrete Werte sind näherungsweise für die Steigung der Regressionsgeraden $m \simeq 10^{10} \frac{\text{m}^{3/2}}{\text{s}}$, die Gravitationskonstante $y \simeq 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$ sowie für die errechnete Sonnenmasse $M_{\odot} \simeq 1,5 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. Bei genauerer statistischer Analyse ergibt sich $M_{\odot} \simeq 1,9 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

4. Der Verlauf der gemessenen Rotationskurven von Spiralgalaxien zeigt, dass die Geschwindigkeit nicht nach der zuvor bestimmten Proportionalität mit wachsendem Abstand zum Zentrum abfällt, sondern dass sie konstant bleibt. Was folgt aus dieser Beobachtung für die Massenverteilung $M(r)$ sowie für die Massendichteverteilung $\rho(r)$?

Bestimmen Sie für $M(r)$ und $\rho(r)$ eine Proportionalitätsgleichung.

Lösung: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \text{const.} \Rightarrow \frac{GM}{r} = \text{const.} \Rightarrow M(r) \propto r$.

Mit $M(r) = \rho(r) \cdot V(r)$ und $V(r) \propto r^3$ folgt: $\rho(r) \propto \frac{r}{V(r)} \propto \frac{r}{r^3} = \frac{1}{r^2}$

5. Das Diagramm mit der Rotationskurve zur Galaxie NGC 3198 ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

Schätzen Sie die Masse dieser Galaxie innerhalb eines Radius von $r = 14 \text{ kpc}$ ab und vergleichen Sie dies mit der Sonnenmasse.

Lösung: Aus dem Diagramm abzulesen ist bei $r = 14 \text{ kpc}$ eine Geschwindigkeit von etwa $v = 150 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Umwandeln in SI-Einheiten ergibt: $r = 14 \text{ kpc} = 4,32 \cdot 20^{20} \text{ m}$ sowie $v = 150 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Damit folgt:

$$M(r \leq 14 \text{ kpc}) = \frac{rv^2}{G} = \frac{4,32 \cdot 20^{20} \text{ m} \cdot (1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}} = 1,457 \cdot 10^{41} \text{ kg}.$$

Vergleich mit einer Sonnenmasse von etwa $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ kg ergibt:

$$M(r \leq 14 \text{ kpc}) = 7,3 \cdot 10^{10} \cdot M_{\odot}.$$

Die Galaxie NGC 3198 hat demnach innerhalb des Radius von 14 kpc eine Masse von $1,457 \cdot 10^{41}$ kg. Dies entspricht dem etwa 73 Milliarden - fachen der Sonnenmasse.

5.3 Gravitationslinseneffekt

5.3.1 Fachliche Grundlagen

5.3.1.1 Das Prinzip der Lichtablenkung durch Gravitation

Neben den Rotationskurven können auch Beobachtungen, die auf den Gravitationslinseneffekt zurückzuführen sind, zum Nachweis Dunkler Materie dienen. Dabei wird das von einem Stern oder einer Galaxie ausgesendete Licht durch die Gravitationswirkung einer Masse abgelenkt, sodass für einen Beobachter, der von einem geradlinigen Verlauf des Lichts ausgeht, das Licht aussendende Objekt an einer anderen Stelle erscheint. Die Masse, durch deren Gravitationswirkung das Licht abgelenkt wird, wirkt somit als lichtkrümmendes System, ähnlich einer optischen Linse, auch wenn hier natürlich zunächst kein Abbildungseffekt entsteht. Je größer die Masse ist, desto stärker wird die Ablenkung der Lichtstrahlen. Mit diesem Zusammenhang lässt sich ein Bezug zwischen der Masse sowie der Ausdehnung der Gravitationslinse und dem Ablenkungswinkel der Lichtstrahlen aufstellen.

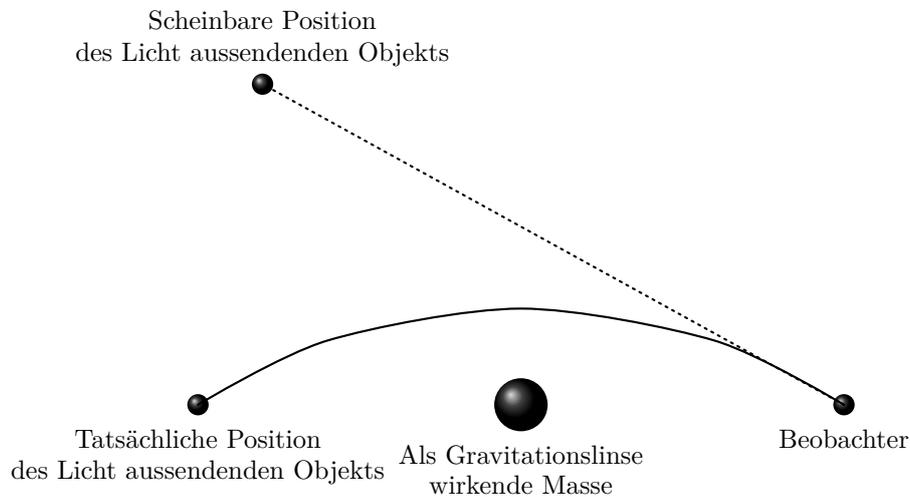


Abbildung 5.19: Schematische Darstellung des Gravitationslinseneffekts.

Kennt man den Ablenkungswinkel, so lässt sich die Masse, durch welche die Ablenkung zustande kommt, bestimmen. Diese Masse wiederum kann deutlich größer sein, als die,

welche durch die Leuchtkraft der als Linse wirkenden Materie vermutet wird. Damit kann der Gravitationslinseneffekt ein Nachweis für die Existenz Dunkler Materie sein. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen drei verschiedenen Effekten, dem starken und schwachen Gravitationslinseneffekt sowie dem Mikrolinseneffekt. Für alle drei gilt das Prinzip, wie in Abbildung 5.19 dargestellt, allerdings sind für den Beobachter unterschiedliche Situationen aufgrund der Massenverteilung der Gravitationslinse sowie der geometrischen Ausrichtung von Licht aussendendem Objekt, Gravitationslinse und Beobachter denkbar.

Starker Gravitationslinseneffekt

Beim starken Gravitationslinseneffekt wird das emittierte Licht derart stark abgelenkt, dass für den Beobachter direkt mehrere Bilder des Licht aussendenden Objekts entstehen können. Beispiele für Beobachtungen, bei denen der starke Gravitationslinseneffekt zugrunde liegt, sind EINSTEIN-Kreuze, bei denen das Licht aussendende Objekt viermal zu sehen ist, oder auch EINSTEIN-Ringe, die dann zustande kommen, wenn Licht aussendendes Objekt, Gravitationslinse und Beobachter auf einer Geraden liegen.



(a) Das Bild des Quasars HE0435-1223 ist aufgrund des Gravitationslinseneffekts viermal zu sehen.



(b) Der Quasar RX J1131-1231 und ein durch den Gravitationslinseneffekt erzeugter Bogen.

Abbildung 5.20: Beispiele für Beobachtungen, denen der starke Gravitationslinseneffekt zugrunde liegt. [60]

Liegen Licht aussendendes Objekt, Gravitationslinse und Beobachter nicht ganz auf einer Geraden, entstehen keine vollständigen Kreise, sondern Kreisbögen, auch Arcs genannt. Typische Objekte, die als Gravitationslinse wirken, sind Sterne, Galaxien oder Galaxienhaufen.

Mikrolinseneffekt (Microlensing)

Für den Fall, dass die Masse der Gravitationslinse sehr klein ist oder die Distanzen zwischen Linse und Licht aussendendem Objekt beziehungsweise Linse und Beobachter sehr groß sind, kann es sein, dass die Lichtablenkung im Bereich von Mikrobogensekunden derart klein ist, dass die entstehenden Bilder nicht getrennt voneinander aufgelöst werden können. Der Effekt kann jedoch trotzdem nachgewiesen werden, indem man eine zeitliche Helligkeitsveränderung detektiert, wenn sich die Objekte gegeneinander bewegen und dadurch die Stärke der Gravitationswirkung auf die Lichtstrahlen verändert wird, da die vom Emittenden ausgehenden Lichtstrahlen durch Gegenden unterschiedlicher Gravitation verlaufen.

Schwacher Gravitationslinseneffekt

Deutlich häufiger als der starke Gravitationslinseneffekt tritt der schwache Gravitationslinseneffekt auf. Bei diesem treten nur geringe Verzerrungen (Arclets) oder leichte Helligkeitsverstärkungen auf. Spektakuläre Verzerrungen oder Mehrfachbilder wie beim starken Effekt, sind hier nicht möglich, sodass er zwar häufiger auftritt, aber auch schwerer nachzuweisen ist. Man benötigt für den Nachweis das Licht mehrerer Objekte, vorwiegend ganzer Galaxien, welches durch Gravitationswirkung von Galaxienhaufen abgelenkt wird. Bei der Untersuchung vieler Tausend Hintergrund-Galaxien lässt sich dann statistisch feststellen, ob eine signifikante Verzerrung des Bilds vorliegt.

Da dieser Effekt häufig auftritt, ist er gut geeignet, um die Masse von Galaxienhaufen zu bestimmen und diese mit der aufgrund der Leuchtkraft vermuteten Masse zu vergleichen, um mit Hilfe dieser Resultate dann die Existenz Dunkler Materie nachzuweisen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass durch die Lichtablenkung aufgrund der Gravitation von Massen, welche sich zwischen Beobachter und dem Licht aussendenden Objekt

befinden, die vom Beobachter wahrgenommenen Eigenschaften dieses Objekts durch Intensität und Richtung der ankommenden Strahlung verändert werden können. Hierzu zählen neben der Position und der Helligkeit des Objekts auch die Form und die Anzahl.

Für die weitere Untersuchung der Lichtablenkung durch den Gravitationslinseneffekt sollen nun einige mathematische Beziehungen hergeleitet werden.

5.3.1.2 Ablenkungswinkel

Wir nehmen der Einfachheit halber an, dass sich die Gravitationslinse eine sphärische Geometrie aufweist und die Masse M der Linse homogen verteilt ist. Des Weiteren gehen wir davon aus, dass die Gravitation auf den Lichtstrahl nur im Bereich der Gravitationslinsenprojektion auf diesen wirkt (in Abbildung 5.21 also im Bereich zwischen 0 und $2R$).

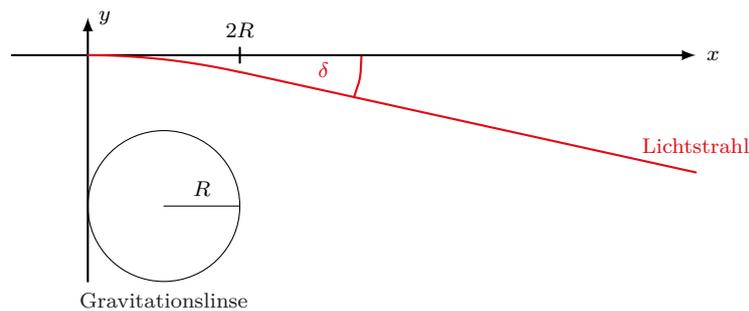


Abbildung 5.21: Schematische Darstellung der Lichtablenkung durch den Gravitationslinseneffekt.

Es folgt nun eine einfache, aber gängige, klassische Abschätzung für den Ablenkungswinkel δ . Die Bewegung des Lichtstrahls lässt sich einmal in eine gleichförmige Bewegung mit der Geschwindigkeit c in x -Richtung und eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung in Richtung des Zentrums, vereinfachend in y -Richtung, unterteilen. Die Beschleunigung, welche eine Richtungsänderung des Geschwindigkeitsvektors des Lichtstrahls bewirkt, lässt sich klassisch gemäß $a = \frac{G \cdot M}{R^2}$ bestimmen. Für die Bahnkurve im Bereich

$0 \leq x \leq 2R$ folgt dann:

$$\left. \begin{aligned} s_x(t) = c \cdot t &\Rightarrow t(s_x) = \frac{s_x}{c} \\ s_y(t) = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{G \cdot M}{2R^2} \cdot t^2 \end{aligned} \right\} s_y(s_x) = \frac{G \cdot M}{2R^2 c^2} \cdot s_x^2 \quad . \quad (5.27)$$

Der Tangens des Ablenkungswinkels lässt sich als Steigung der Tangente an den Lichtstrahl an der Stelle $x = 2R$ bestimmen

$$\tan \delta = \left. \frac{ds_y}{ds_x} \right|_{s_x=2R} = \frac{GM}{R^2 c^2} \cdot s_x \Big|_{s_x=2R} = \frac{2GM}{Rc^2} \quad . \quad (5.28)$$

Nähert man die Tangens-Funktion durch eine TAYLOR-Entwicklung an und bricht diese nach der ersten Ordnung ab, so erhält man die typische Kleinwinkelnäherung $\tan \delta \simeq \delta$. Setzt man dies in die obige Gleichung ein und führt zusätzlich den SCHWARZSCHILD-Radius $\mathfrak{R}_s = \frac{2GM}{c^2}$ ein, so ergibt sich für den Ablenkungswinkel eine recht kompakte Formel mit

$$\delta = \frac{2GM}{Rc^2} = \frac{\mathfrak{R}_s}{R} \quad . \quad (5.29)$$

Dies ist eine gängige Abschätzung, in welcher sich die Fehler durch den hier zu klein angenommenen Einflussbereich der Gravitation sowie die außer in einem Punkt der Bahn zu große Gravitationsfeldstärke gegenseitig aufheben. Dieses Problem lässt sich über eine strenge mathematische Herleitung beheben, wie sie etwa in [61, S. 106 ff.] dargestellt ist. Des Weiteren muss auch konstatiert werden, dass in der obigen Herleitung keine Korrekturen durch die Allgemeine Relativitätstheorie enthalten sind. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie werden Raum und Zeit zu einer physikalischen Größe zusammengefasst, wobei die Gravitation als Krümmung der Raumzeit zu verstehen ist. Dadurch, dass der Raum nach der Allgemeinen Relativitätstheorie gekrümmt wird, ist die Ablenkung des Lichtstrahls in Wirklichkeit doppelt so groß wie oben berechnet, sodass

$$\delta = \frac{4GM}{Rc^2} = \frac{2 \cdot \mathfrak{R}_s}{R} \quad (5.30)$$

folgt. Wie in der historischen Entwicklung in Kapitel 5.3.2 folgen wird, hat auch Albert EINSTEIN zunächst eine klassische Rechnung durchgeführt und kam erst mit der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie auf die korrekte Gleichung für den Ablenkungswinkel.

5.3.1.3 Massenabschätzung durch die Beobachtungswinkel für Arcs und Einstein-Ringe

Bei einer Lichtablenkung, die für den Beobachter einen EINSTEIN-Ring oder Kreisbögen (Arcs), bewirkt, lässt sich der Beobachtungswinkel Θ über die in Abbildung 5.22 gezeigte schematische Skizze herleiten. Die im Folgenden dargestellten Rechenwege sind zum Teil an die bereits in der Literatur angegebenen Rechnungen angelehnt. Hier sei vor allem auf [62], [63] und [64] verwiesen. Es ist jedoch Wert darauf gelegt worden, die Rechnungen in einer eigenen übersichtlichen Art und Weise zu präsentieren, sodass im Folgenden eine Formel hergeleitet wird, mit welcher sich sowohl Lösungen für Arcs als auch für EINSTEIN-Ringe ergeben. Für die folgenden Ausführungen gilt grundsätzlich die Annahme, dass die Abstände zwischen Beobachter und Gravitationslinse sowie zwischen dieser und Licht aussendendem Objekt groß gegenüber der Ausdehnung der Gravitationslinse selbst sind. Mit der Kleinwinkelnäherung $\tan \Theta \simeq \Theta$ folgt zunächst:

$$\tan \Theta = \frac{\xi}{d_{BL}} \quad \Rightarrow \quad \xi \simeq \Theta \cdot d_{BL} \quad . \quad (5.31)$$

Für die Winkel $\hat{\alpha}$, β und Θ lassen sich weitere Beziehungen aufstellen, aus denen dann die Linsengleichung folgt.

$$\left. \begin{array}{l} \tan \hat{\alpha} \simeq \frac{z}{d_{OL}} \quad \Rightarrow \quad z \simeq \hat{\alpha} \cdot d_{OL} \\ \tan \beta = \frac{x}{d} \quad \Rightarrow \quad x \simeq \beta \cdot d \\ \tan \Theta = \frac{x+z}{d} \quad \Rightarrow \quad x+z \simeq \Theta \cdot d \end{array} \right\} \quad \Theta \cdot d = \beta \cdot d + \hat{\alpha} \cdot d_{OL} \quad . \quad (5.32)$$

Dividiert man diese Gleichung durch d , so erhält man $\Theta = \beta + \hat{\alpha} \cdot \frac{d_{OL}}{d}$. Da gleichermaßen auch $\Theta = \beta + \alpha$ gilt, lässt sich der reduzierte Ablenkungswinkel $\hat{\alpha}$ über die Abstände

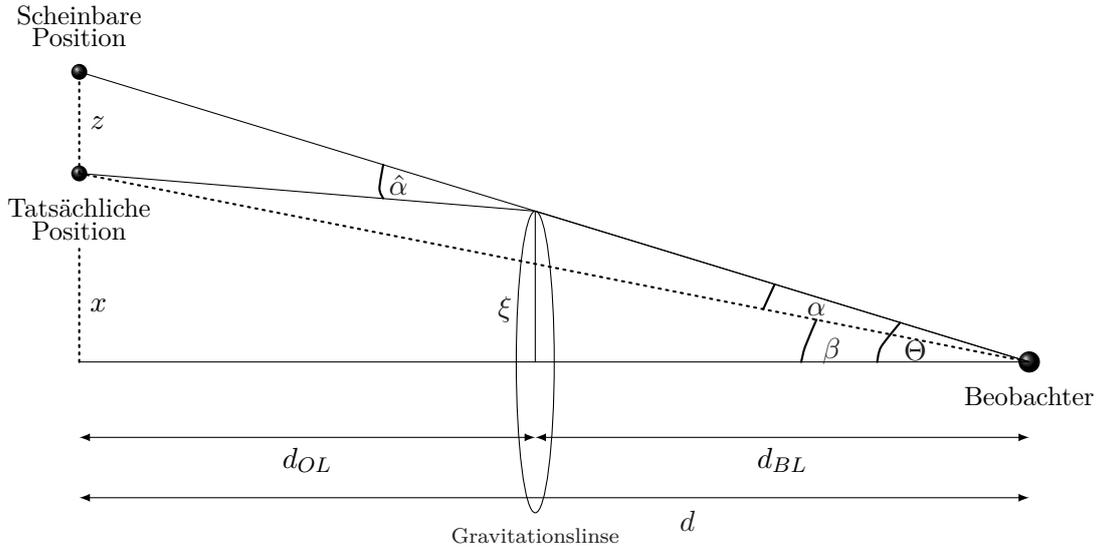


Abbildung 5.22: Schematische Darstellung für die Herleitung einer Formel zum EINSTEIN-Radius, angelehnt an [62].

zwischen Licht aussendendem Objekt und Gravitationslinse, Licht aussendendem Objekt und Beobachter sowie dem Winkel α , unter welchem der Beobachter das Objekt im Vergleich zur tatsächlichen Position scheinbar sieht, ausdrücken. Es folgt:

$$\hat{\alpha} = \frac{d}{d_{OL}} \cdot \alpha \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{d_{OL}}{d} \cdot \hat{\alpha} \quad . \quad (5.33)$$

Ferner gilt für den reduzierten Ablenkungswinkel Formel 5.30 mit $R \equiv \xi$, welche im vorherigen Kapitel begründet wurde. Mit β als Differenz von Θ und α ergibt sich durch schrittweises Einsetzen der Beziehungen 5.33, 5.30 und 5.31:

$$\beta = \Theta - \alpha = \Theta - \frac{d_{OL}}{d} \cdot \hat{\alpha} = \Theta - \frac{d_{OL}}{d} \cdot \frac{4G \cdot M}{c^2 \cdot \xi} = \Theta - \frac{d_{OL}}{d} \cdot \frac{4G \cdot M}{c^2 \cdot \Theta \cdot d_{BL}} \quad (5.34)$$

$$= \Theta - \frac{4G \cdot M}{c^2} \frac{d_{OL}}{d \cdot d_{BL}} \cdot \frac{1}{\Theta} \quad . \quad (5.35)$$

Durch Umstellen erhält man die quadratische Gleichung für den Beobachtungswinkel Θ :

$$0 = \Theta^2 + \beta \cdot \Theta - \frac{4G \cdot M}{c^2} \frac{d_{OL}}{d \cdot d_{BL}} \quad . \quad (5.36)$$

Lösungen für Arcs

Für die beobachtbaren Kreisbögen, gilt allgemein Gleichung 5.36. Löst man diese, so ergeben sich die Winkel, unter denen ein Beobachter die Arcs, gemessen zur optischen Achse, sieht. Dies sind also zwei Lösungen. Es gilt:

$$\Theta_{1,2} = \frac{\beta}{2} \pm \sqrt{\frac{\beta^2}{4} + \frac{4G \cdot M}{c^2} \frac{d_{OL}}{d \cdot d_{BL}}} . \quad (5.37)$$

Der Winkel α , unter welchem ein Beobachter die Arcs gemessen zum eigentlichen Licht aussendenden Objekt sieht, ergibt sich durch Subtraktion von β :

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\beta}{2} \pm \sqrt{\frac{\beta^2}{4} + \frac{4G \cdot M}{c^2} \frac{d_{OL}}{d \cdot d_{BL}}} . \quad (5.38)$$

Lösungen für Einstein-Ringe

EINSTEIN-Ringe entstehen dann, wenn Licht aussendendes Objekt, Gravitationslinse und Beobachter auf einer Achse liegen. Der Winkel β muss dementsprechend Null sein. Die Lösungen für den EINSTEIN-Ring sind Spezialfälle von den Lösungen für die Arcs. Es folgt für die Winkel Θ_{Einstein} und α_{Einstein} entsprechend den obigen Gleichungen bei eingesetztem $\beta = 0$:

$$\Theta_{\text{Einstein}} = \alpha_{\text{Einstein}} = \pm \sqrt{\frac{4G \cdot M}{c^2} \frac{d_{OL}}{d \cdot d_{BL}}} = \pm \sqrt{2\mathfrak{R}_s \cdot \frac{d_{OL}}{d \cdot d_{BL}}} . \quad (5.39)$$

Für den Radius R_{Einstein} eines EINSTEIN-Rings ergibt sich:

$$R_{\text{Einstein}} = \pm \sqrt{\frac{4G \cdot M}{c^2} \frac{d_{OL} d_{BL}}{d}} = \pm \sqrt{2\mathfrak{R}_s \cdot \frac{d_{OL} d_{BL}}{d}} . \quad (5.40)$$

Abschätzungen zur Masse der Gravitationslinse

Innerhalb des EINSTEIN-Radius ist die Masse der Gravitationslinse nach Messen von Θ_{Einstein} oder R_{Einstein} durch Umstellen von Gleichung 5.39 oder 5.40 bestimmbar. Es gilt:

$$M(\Theta_{\text{Einstein}}) = \frac{c^2}{4G} \frac{d \cdot d_{BL}}{d_{OL}} \cdot \Theta_{\text{Einstein}}^2 \quad (5.41)$$

$$\text{oder } M(R_{\text{Einstein}}) = \frac{c^2}{4G} \frac{d}{d_{OL} d_{BL}} \cdot R_{\text{Einstein}}^2 \quad (5.42)$$

5.3.1.4 Verallgemeinerung auf dreidimensionale Massenverteilungen und Folgerungen für den starken und schwachen Gravitationslinseneffekt

Verallgemeinert man ausgehend von den bereits dargestellten Überlegungen die Situation auf drei Dimensionen, so wird der reduzierte Ablenkungswinkel zweidimensional und ergibt sich als Superposition einzelner Ablenkungswinkel, welche gemäß Formel 5.30 von den Massenelementen in der Gravitationslinsenebene abhängen. Es folgt damit für die Approximation einer dünnen Linse

$$\hat{\alpha} = \sum_i \hat{\alpha}_i(\vec{\xi}) = \sum_i \frac{4G \cdot M_i}{c^2} \cdot \frac{\vec{\xi} - \vec{\xi}_i}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}_i|^2} = \frac{4G}{c^2} \sum_i M_i \cdot \frac{\vec{\xi} - \vec{\xi}_i}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}_i|^2} \quad (5.43)$$

Beim Übergang von einzelnen Massenelementen zur Massenverteilung der Gravitationslinse wird nun die Summe durch ein Integral ersetzt und zur Wahrung der Dimension die Masse M_i durch die Oberflächen-Massendichte Σ . Die Oberflächenmassendichte Σ versteht sich hierbei als Integral über die Volumendichte ϱ entlang der optischen Achse (hier mit der Koordinate z bezeichnet):

$$\Sigma(\vec{\xi}) = \int \varrho(\vec{\xi}, z) dz \quad (5.44)$$

Dadurch wäre bei sphärischer Geometrie die Masse innerhalb von ξ gegeben mit

$$M(\xi) = 2\pi \int_0^\xi \Sigma(\xi') \cdot \xi' d\xi' \quad . \quad (5.45)$$

Gleichung 5.43 verallgemeinert sich damit zu

$$\hat{\alpha}(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c^2} \iint_{\mathbb{R}^2} \Sigma(\vec{\xi}') \cdot \frac{\vec{\xi} - \vec{\xi}'}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2} d^2\xi' \quad . \quad (5.46)$$

Das Doppelintegral ist als Flächenintegral in Polarkoordinaten zu verstehen. Die Lösung des Integrals bedarf einiger Vorüberlegungen. Aufgrund der sphärischen Geometrie lassen sich die Vektoren $\vec{\xi}$ und $\vec{\xi}'$ zum Beispiel wählen als

$$\vec{\xi} = \begin{pmatrix} \xi \\ \xi \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{mit } \xi > 0 \quad \text{und} \quad \vec{\xi}' = \begin{pmatrix} \xi'_1 \\ \xi'_2 \end{pmatrix} = \xi' \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad \text{mit } \varphi = \sphericalangle(\vec{\xi}; \vec{\xi}') \quad . \quad (5.47)$$

Damit lassen sich Zähler und Nenner des Bruchs im Doppelintegral in Gleichung 5.46 darstellen als

$$\vec{\xi} - \vec{\xi}' = \begin{pmatrix} \xi - \xi' \cos \varphi \\ -\xi' \sin \varphi \end{pmatrix} \quad , \quad (5.48)$$

$$|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2 = \xi^2 + \xi'^2 \cos^2 \varphi - 2\xi\xi' \cos \varphi + \xi'^2 \sin^2 \varphi \quad (5.49)$$

$$= \xi^2 + \xi'^2 \underbrace{(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}_{=1} - 2\xi\xi' \cos \varphi \quad (5.50)$$

$$= \xi^2 + \xi'^2 - 2\xi\xi' \cos \varphi \quad . \quad (5.51)$$

Führt man nun das Doppelintegral in Gleichung 5.46 für die beiden Komponenten des reduzierten Ablenkungswinkels getrennt aus und nimmt die Oberflächen-Massendichte

als konstant an, so ergeben sich die folgenden zwei Rechnungen:

$$\hat{\alpha}_1(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c^2} \cdot \Sigma \cdot \int_0^\infty \xi' \int_0^{2\pi} \frac{\xi - \xi' \cos \varphi}{\xi^2 + \xi'^2 - 2\xi\xi' \cos \varphi} d\varphi d\xi' \quad , \quad (5.52)$$

$$\hat{\alpha}_2(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c^2} \cdot \Sigma \cdot \int_0^\infty \xi' \int_0^{2\pi} \frac{-\xi' \sin \varphi}{\xi^2 + \xi'^2 - 2\xi\xi' \cos \varphi} d\varphi d\xi' \quad . \quad (5.53)$$

Ein Blick in Formelbücher liefert folgendes Ergebnis: Das φ -Integral der ersten Komponente des reduzierten Ablenkungswinkels ist für $\xi' > \xi$ Null und nimmt für $\xi' < \xi$ den Wert $\frac{2\pi}{\xi}$ an. Mit dem ξ -Integral über das aus dem Flächenelement der Polarkoordinaten stammende ξ' kommt noch der Faktor $\frac{\xi^2}{2}$ dazu. Die zweite Komponente des reduzierten Ablenkungswinkels ist Null.

Damit ist der Betrag des reduzierten Ablenkungswinkels gleich der ersten Komponente und ergibt sich zu

$$\left| \hat{\alpha}(\vec{\xi}) \right| = \frac{4G}{c^2} \cdot \Sigma \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{2} \frac{\xi^2}{\xi} = \frac{4G}{c^2} \cdot \Sigma \pi \cdot \xi \quad . \quad (5.54)$$

Mit Gleichung 5.31 folgt:

$$\left| \hat{\alpha}(\vec{\xi}) \right| = \frac{4G}{c^2} \cdot \Sigma \pi \cdot \Theta \cdot d_{BL} \quad . \quad (5.55)$$

Mit Gleichung 5.33 folgt dann wiederum für den Ablenkungswinkel α :

$$\alpha = \frac{4\pi G}{c^2} \cdot \frac{d_{OL} d_{BL}}{d} \cdot \Sigma \cdot \Theta \quad . \quad (5.56)$$

Hierbei wird der konstante Vorfaktor üblicherweise auch als kritische Flächenmassendichte $\Sigma_{cr} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{d}{d_{OL} d_{BL}}$ bezeichnet. Es ergibt sich damit:

$$\alpha(\Theta) = \frac{\Sigma}{\Sigma_{cr}} \cdot \Theta \quad . \quad (5.57)$$

Je nachdem, wie groß die Oberflächen-Massendichte im Vergleich zur kritischen Oberflächen-Massendichte ist, lassen sich drei Fälle unterscheiden.

1. **Fall:** $\Sigma = \Sigma_{cr}$

Entspricht die Oberflächen-Massendichte der kritischen Oberflächen-Massendichte, so gilt nach Gleichung 5.57: $\alpha = \Theta$. In diesem Fall treten die bekannten EINSTEIN-Ringe auf. Nach Abbildung 5.22 liegen in diesem Fall das Licht aussendende Objekt, die Gravitationslinse und der Beobachter auf einer Achse, was genau die Bedingung für das Auftreten eines EINSTEIN-Rings ist.

2. **Fall:** $\Sigma > \Sigma_{cr}$

Ist die Oberflächen-Massendichte der Gravitationslinse größer als die kritische Oberflächen-Massendichte, so wird der Quotient $\frac{\Sigma}{\Sigma_{cr}}$ einen Wert größer als 1 annehmen. Dementsprechend gilt nach Gleichung 5.57: $\alpha > \Theta$. In diesem Fall kann der Beobachter mehrere Bilder des Licht aussendenden Objekts sehen. Es tritt damit der starke Gravitationslinseneffekt auf.

3. **Fall:** $\Sigma < \Sigma_{cr}$

Sofern die Oberflächen-Massendichte der Gravitationslinse kleiner als die kritische Oberflächen-Massendichte ist, wird der Quotient $\frac{\Sigma}{\Sigma_{cr}}$ einen Wert kleiner als 1 annehmen. Demnach wird nach Gleichung 5.57 gelten: $\alpha < \Theta$. Insbesondere für den Fall, dass $\alpha \ll \Theta$ ist, wird der Winkel, unter welchem man das Bild gemessen zur tatsächlichen Position des Objekts sieht, so klein, dass hier nur sehr schwache Verzerrungen und geringe Helligkeitsveränderungen auftreten. In diesem Fall handelt es sich um den schwachen Gravitationslinseneffekt.

5.3.2 Historische Entwicklung

Aus historischer Sicht ist es bemerkenswert, dass bereits im 18. Jahrhundert Überlegungen zum Gravitationslinseneffekt aufkamen. So schrieb Isaac NEWTON in seinem Buch „*Opticks*“ im Jahr 1730 von einer Biegung der Lichtstrahlen aufgrund von Massen.

„Do not Bodies act upon Light at a distance, and by their action bend its Rays; and is not this action (caeteris paribus) strongest at the least distance?“

[65, S. 313]

Genauer führte NEWTON diesen Gedanken nicht aus. Er konzentrierte sich in seinen Werken auf optische Phänomene wie Lichtbrechung, -beugung und die Reflexion, nicht aber auf die Ablenkung von Licht durch Gravitation. Ebenfalls im 18. Jahrhundert beschrieb John Michell in einem Brief an seinen Kollegen Henry CAVENDISH Körper, deren ausgesendetes Licht aufgrund der eigenen Gravitation umkehren müsste.

„[...] all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity.“ [66, S. 42]

Im Jahr 1801 wurden dann von Johann Georg VON SOLDNER die ersten Berechnungen einer Lichtablenkung durch eine Masse durchgeführt. Mit der Annahme, dass sich ein Lichtstrahl wie ein Strahl aus Materieteilchen verhält (siehe nachfolgendes Zitat), konnte man die Ablenkung eines solchen durch die Sonne auf 0,84 Bogensekunden bestimmen [67].

„Hoffentlich wird es niemand bedenklich finden, daß ich einen Lichtstral (sic) geradezu als schweren Körper behandle. Denn daß die Lichtstrahlen alle absoluten Eigenschaften der Materie besitzen, sieht man an dem Phänomen der Aberration, welches nur dadurch möglich ist, daß die Lichtstrahlen wirklich materiel (sic) sind.“ [67, S. 170]

VON SOLDNER war jedoch der Überzeugung, dass diese Lichtablenkung, auch wenn sie noch größer sein sollte, zum Beispiel aufgrund einer Ablenkung durch mehrere Körper,

für Beobachtungen „*immer unbemerkbar*“ [67, S. 171] bliebe. Was VON SOLDNER Anfang des 19. Jahrhunderts verwehrt blieb, untersuchte dann über hundert Jahre später ebenfalls Albert EINSTEIN. Auch er berechnete die Ablenkung eines an der Sonne vorbeigehenden Lichtstrahls und kam mit 0,83 Bogensekunden auf einen fast identischen Wert.

„*Ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl erlitte demnach eine Ablenkung vom Betrage $4 \cdot 10^{-6} = 0,83$ Bogensekunden.*“ [68, S. 908]

Dieser Wert wurde von EINSTEIN explizit hergeleitet. Dazu ging er zunächst davon aus, dass alle Körper, unabhängig von ihrer Masse, im Gravitationsfeld gleich beschleunigt werden [68, S. 899 f.]. Er kam weiterhin zu dem Schluss, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht als konstant angenommen werden kann, sondern dass sie vom Gravitationspotential abhängen muss [68, S. 906]. Unter Rückgriff auf das HUYGEN'sche Prinzip berechnete er dann die Krümmung des Lichtstrahls zu

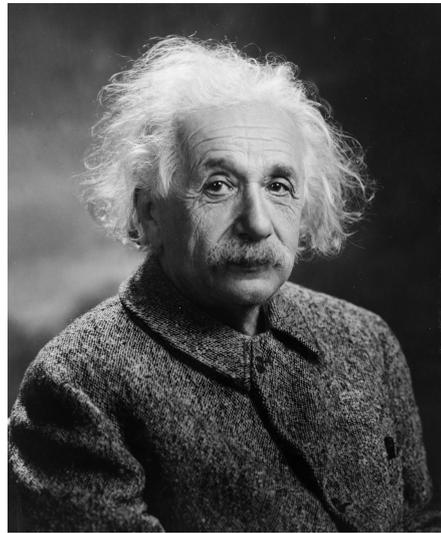


Abbildung 5.23: Albert EINSTEIN. [69]

$$\alpha = \frac{2kM}{c^2\Delta} . \quad (5.58)$$

Dabei ist k die Gravitationskonstante, M die Masse des Himmelskörpers und Δ der Abstand von Lichtstrahl zum Mittelpunkt des Himmelskörpers [68, S. 908]. Als dann im Jahr 1912 die Nova Geminorum (2) entdeckt wurde, versuchte Einstein die beobachtbaren neuen Sterne mit Hilfe der Ablenkung der Lichtstrahlen, also des Gravitationslinseffekts, zu erklären [70, S. 7 ff.]. Er kam jedoch zu dem Schluss, dass eine Erklärung mit einer Linse nicht zu den Beobachtungen passt [71].

Im Jahr 1915 berechnete EINSTEIN im Rahmen der von ihm entwickelten Allgemeinen Relativitätstheorie die Ablenkung eines Lichtstrahls durch die Sonne neu und erhielt in seiner Formel (Gleichung 5.58) einen zusätzlichen Faktor 2. Der errechnete Zahlenwert lag also bei 1,7 Bogensekunden.

„Ein an der Oberfläche der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl soll eine Ablenkung von 1,7'' (statt 0,85'') erleiden“ [72, S. 834]

Der experimentelle Nachweis dieser Ablenkung gelang im Jahr 1919 während einer Sonnenfinsternis dem Team um Arthur Stanley EDDINGTON, Frank Watson DYSON und Charles Rundle DAVIDSON. Die Größenordnung der Ablenkung stimmte mit der von EINSTEIN theoretisch berechneten Ablenkung überein.

„Thus the results of the expeditions to Sobral and Principe can leave little doubt that a deflection of light takes place in the neighbourhood of the sun and that it is of the amount demanded by EINSTEIN's generalised theory of relativity, as attributable to the sun's gravitational field.“ [73, S. 332]

Diese Tatsache machte EINSTEINS Allgemeine Relativitätstheorie für die damalige Wissenschaft zu einer viel beachteten und honorierten Theorie. EINSTEIN führte auf Notizblättern weitere Berechnungen aus, in denen er zu dem Schluss kam, dass ein Beobachter eine punktförmige Lichtquelle, deren Lichtstrahlen durch eine schwere, ebenfalls punktförmige Masse abgelenkt werden, doppelt sehen muss. Bei einer geraden Ausrichtung müsste es zu einem ringförmigen Abbild der Lichtquelle kommen. Ebenso ging EINSTEIN auf die Verzerrung und die Helligkeitsänderung der Bilder ein. Auf Bitten von Rudi Welt MANDL veröffentlichte EINSTEIN einige Punkte aus seinen Notizen [74, S. 506], war jedoch davon überzeugt, dass eine Helligkeitsänderung wohl nicht zu beobachten sei. Auch wenn EDDINGTON bereits 1920 ebenfalls die Vermutung äußerte, dass die vorhergesagte Helligkeitsänderungen wohl nicht zu beobachten seien [75, S. 134], kam František LINK 1936 zu dem Schluss, dass die Phänomene zwar selten seien, man dieser aber durchaus zum Beispiel in Spiralnebeln beobachten könne.

„De tels rapprochement optiques seront sans doute rares, sauf dans certaines régions du ciel, en particulier dans les nébuleuses spirales.“ [76, S. 919]

Link berechnete sowohl die Position der Bilder als auch die entsprechenden Helligkeiten [76, S. 918]. Ein Jahr später wurde dann von Fritz ZWICKY die Vermutung aufgestellt, dass eine Beobachtung von Gravitationslinseneffekten nicht nur mit Sternen, sondern sogar mit ganzen Galaxien, die als Gravitationslinse wirken, möglich wäre [77, S. 290].

„[...] the probability that nebulae which act as gravitational lenses will be found becomes partially a certainty.“ [78, S. 679]

Auch Charles Galton DARWIN beschäftigte sich seiner Zeit mit dem Gravitationslinseneffekt und berechnete die Position und die Helligkeitsänderung des Abbilds eines Sterns, deren Lichtstrahlen durch eine Punktmasse abgelenkt werden [79]. Ein Fehler in DARWINS Berechnungen wurde im Jahr 1963 von Kenneth METZNER ausgebessert, der gleichermaßen auch die Ergebnisse DARWINS verallgemeinerte [80]. Die ersten weiterführenden Berechnungen zu Linseneffekten, die aufgrund von Galaxien zustande kommen, führte im selben Jahr der russische Astronom Yu. KLIMOV durch und kam unter anderem auch zu dem Schluss, dass Quasare zur Beobachtung von Gravitationslinsen geeignet sind [81]. Zu den gleichen Schlussfolgerungen kamen unabhängig davon Sidney LIEBES [82] und Sjur REFSDAL [83]. Die erste Entdeckung einer Gravitationslinse gelang im Jahr 1979 Dennis WALSH, Robert CARSWELL und Ray WEYMANN, die den Doppelquasar 0957 + 561 A, B als ein durch den Gravitationslinseneffekt hervorgerufenes Doppelbild eines einzigen Quasars identifizierten [84]. Sieben Jahre später wurden von Roger LYNDS und Vahé PETROSIAN verzerrte Bilder von Galaxien beobachtet, welche mit der Lichtablenkung durch ganze Galaxienhaufen zu erklären waren [85]. Die so entstehenden „leuchtenden Bögen“ wurden unabhängig auch von einem Forscherteam um Geneviève SOUCAIL untersucht, welches diese ebenfalls als Ergebnis einer Lichtablenkung durch einen Galaxienhaufen identifizierten [86]. Mittlerweile sind durch weitere Beobachtungen viele Gravitationslinsen entdeckt worden. Die in den fachlichen Grundlagen unterschiedenen Effekte, nämlich der starke und der schwache Gravitationslinseneffekt sowie der

Mikrolinseneffekt, konnten alle drei nachgewiesen werden.

5.3.3 Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion

Bei der Übertragung auf den Schulunterricht ist es wichtig, die Phänomene der Gravitationslinsen anschaulich darzustellen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass den Schülerinnen und Schülern das Prinzip der Lichtablenkung durch die Gravitation von Massen vertraut wird. Der Effekt für den Beobachter kann je nach Objekt und seinem Abstand unterschiedlich sein.

Im Folgenden soll zunächst eine ganz gewöhnliche Verzerrung, wie sie beim Gravitationslinseneffekt häufig auftritt, simuliert werden. Hierzu wird ein Laserstrahl durch eine inhomogene Massendichte und dem damit verbundenen räumlich variablen Brechungsindex „verzerrt“. Dies geschieht im Wasser durch Hinzufügen von Salz. Im Experiment wird der Laserstrahl also nicht durch die Gravitation einer Masse abgelenkt, sondern durch den unterschiedlichen Brechungsindex der Salzlösung so gebrochen, dass der Beobachter, welcher zuvor einen Punkt am Beobachtungsschirm gesehen hat, nun diesen als verzerrtes Gebilde wahrnimmt.

Des Weiteren soll eine Gravitationslinse durch eine Glaslinse simuliert werden. Aus der Mittelstufenphysik ist Schülerinnen und Schülern die Lichtablenkung durch Glaslinsen bekannt. So werden hier typischerweise die Strahlenverläufe bei Konvex- und Konkavlinen untersucht. Es ist daher nur legitim, die bereits bekannten Lichtablenkungsphänomene mit dem nun neuen Effekt der Lichtablenkung durch Gravitation zu verbinden und sich die Frage zu stellen, wie eine Glaslinse geformt sein muss, damit typische Beobachtungen wie bei einer Gravitationslinse möglich sind. Dafür wird zunächst eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulation am PC durchgeführt und anschließend real in einem Experiment Phänomene wie Mehrfach- oder Ringbilder erzeugt.

Auch in diesem Zusammenhang bleibt festzuhalten, dass die Elementarisierungen, welche durch die Analogieversuche und die Simulation vorgenommen werden, den Bedingungen in Kapitel 4.2 genügen. Sie erscheinen für die Lernenden angemessen, sind fachlich rich-

Astronomisches Experiment		Analogieexperiment
Lichtstrahl eines Sterns	↔	Laserstrahl
Beobachter auf der Erde	↔	Beobachtungsschirm
Universum (konstante Massendichte)	↔	Wasser
Masse, deren Gravitationswirkung Licht ablenkt (erzeugt inhomogene Massendichte)	↔	Salz (erzeugt einen anderen Brechungsindex als Wasser)
Gravitationslinse	↔	Glaslinse
Licht aussendendes Objekt	↔	Kerze, Laser, Lampe

Tabelle 5.2: Auflistung der Analogien zwischen den Phänomenen des Gravitationslinseneffekts und den entwickelten Experimenten und Simulationen.

tig und zielorientiert. Durch neue Ausrichtung der Experimentiermaterialien, zusätzliche Fallunterscheidungen in den mathematischen Überlegungen oder der Verdeutlichung der Auswirkung und Bedeutung einzelner Parameter in der Simulation können die Elementarisierungen weiter entwickelt werden.

Bezüglich der mathematischen Überlegungen sei an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen, dass hier keine schwierigen Rechnungen durchgeführt werden. Der mathematische Anspruch ist so einfach wie möglich gehalten worden, damit die mathematischen Rechnungen in der Schulphysik umsetzbar sind. Des Weiteren erfolgen keine konkreten Rechnungen, welche Kenntnisse aus der Allgemeinen Relativitätstheorie voraussetzen oder solche, bei denen Kenntnisse der mehrdimensionalen Differential- und Integralrechnung benötigt werden. Da solche Rechnungen für die Schule keineswegs realisierbar sind, wird hier explizit darauf verzichtet.

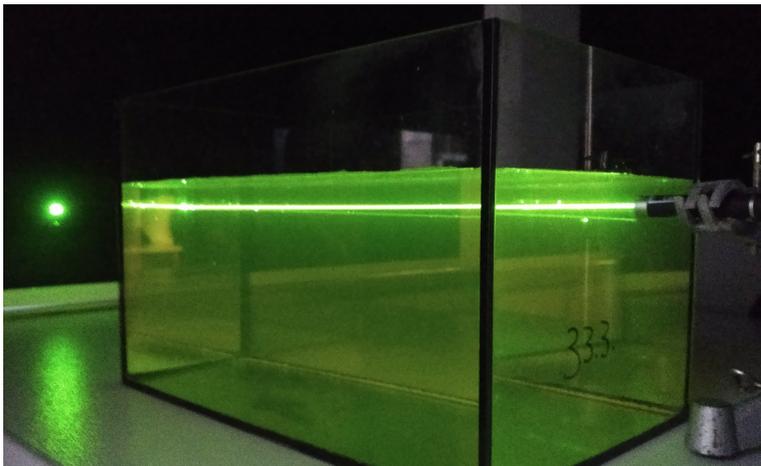
5.3.4 Analogieexperimente und Simulationen zum Gravitationslinseneffekt

Es werden speziell für den Gravitationslinseneffekt im Folgenden zwei Experimente und eine Simulation vorgestellt, mit denen Phänomene, die durch den Gravitationslinseneffekt bedingt werden, auf analoge Weise nachgestellt beziehungsweise simuliert werden können.

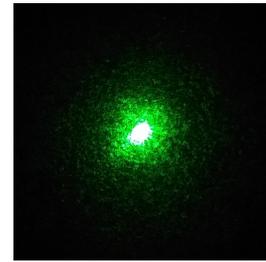
5.3.4.1 Analogieexperiment zur Veranschaulichung von Verzerrungseffekten aufgrund inhomogener Massendichte

Der Gravitationslinseneffekt kann nur dann auftreten, wenn Lichtstrahlen aufgrund der Gravitation von Massen, die zwischen dem Licht aussendendem Objekt und dem Beobachter liegen, abgelenkt werden. Der Effekt, der bereits bei schwachen Gravitationskräften eintritt, ist die Verzerrung des Objekts. Gerade solche Verzerrungen und leichte Helligkeitsveränderungen sind im Rahmen des schwachen Gravitationslinseneffekts häufig zu beobachten.

Eine solche Verzerrung lässt sich mit einfachen Mitteln verdeutlichen, indem ein Aquarium mit fluoreszierendem Wasser gefüllt und in der Mitte des Gefäßes die Salzlösung eingebracht wird. Ein Laserstrahl ist im fluoreszierenden Wasser in seiner geradlinigen Ausbreitung zu sehen. Durch das Einfüllen von Salz in der Mitte des Aquariums ändert sich in diesem Bereich der Brechungsindex. Der Laserstrahl wird dementsprechend kontinuierlich im salzhaltigen Medium gebrochen, sodass der Beobachter am Schirm einen verzerrten Lichtfleck wahrnimmt.

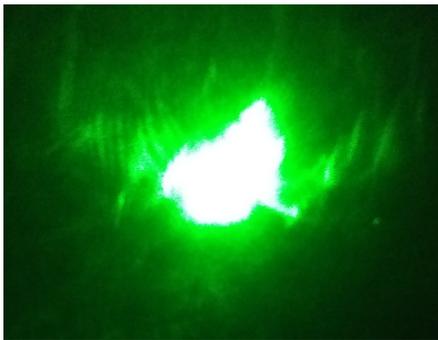


(a) Experimenteller Aufbau: Aquarium mit Wasser und Natrium-Fluorescein sowie einem Stativ mit eingeklemmtem Laser.



(b) Beobachtung: Klar erkennbarer kreisrunder Laserpunkt mit symmetrischer Verteilung der Lichtintensität an der Wand.

Abbildung 5.24: Experimenteller Aufbau und Beobachtung zum Analogieexperiment zur Veranschaulichung von Verzerrungseffekten.



(a) Unregelmäßige Verzerrung mit einer deutlich unsymmetrischen Verteilung der Lichtintensität beim Einfüllen des Salzes.



(b) Verzerrung nach links und rechts als besonderer Effekt bei Einfüllen des Salzes.

Abbildung 5.25: Beispiele für Verzerrungen bei Einfüllen von Salz in die Mitte des Aquariums.

5.3.4.2 Simulation einer Gravitationslinse durch eine Glaslinse

Simuliert man die Gravitationslinse durch eine Glaslinse mit planer Oberfläche wie sie in der Strahlenoptik verwendet wird, lässt sich anhand einiger mathematischer Überlegungen bestimmen, wie die geometrische Form der Linse sein muss, damit sie genau die Effekte der Gravitationslinse auf die Ablenkung einfallender Lichtstrahlen bewirkt. Im Folgenden wird auf die mathematischen Gedankengänge eingegangen und anschließend eine Simulation mit einem Tabellenkalkulationsprogramm vorgestellt, mit welchem die Form der Glaslinse graphisch veranschaulicht werden kann.

Mathematische Überlegungen

Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an denen in [62], [63] und [64] bereits vorgestellten mathematischen Überlegungen.

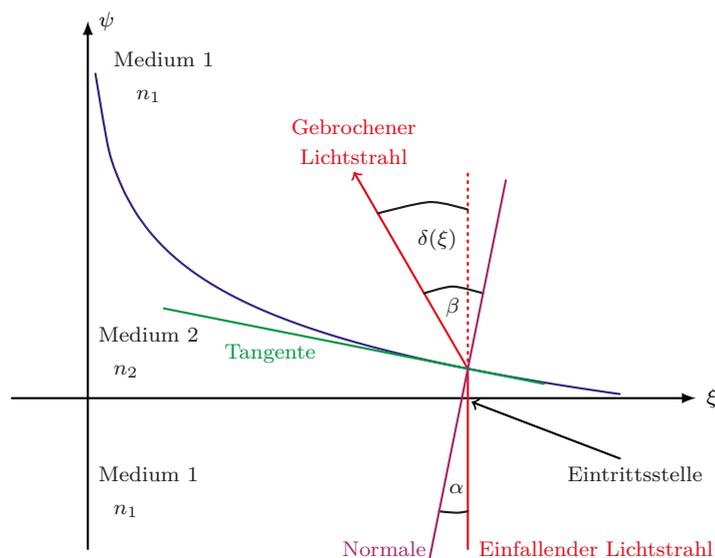


Abbildung 5.26: Schematische Darstellung zur Simulation einer Gravitationslinse durch eine Glaslinse, deren plane Ebene im Querschnitt mit der ξ -Achse zusammenfallen soll.

Der Lichtstrahl trifft zunächst senkrecht auf die Glaslinse, tritt in diese ungebrochen ein und wird beim Austritt, aufgrund der Glaslinsenform (vgl. Abbildung 5.26 und dem damit verbundenen Eintrittswinkel α , im Winkel β gebrochen. Da das Medium außerhalb der Glaslinse optisch dünner ist, erfolgt die Brechung hier weg vom Lot. Nach dem

Brechungsgesetz von SNELLIUS gilt:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad . \quad (5.59)$$

Nähert man die Sinus-Funktion mit der TAYLOR-Entwicklung und bricht diese nach dem ersten Glied ab, so erhält man die Kleinwinkelnäherung $\sin x \simeq x$. Nutzt man diese und stellt nach β um, so ergibt sich:

$$\beta \simeq \alpha \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad . \quad (5.60)$$

Subtrahiert man vom Brechungswinkel β den Einfallswinkel α , so erhält man den Ablenkwinkel δ , der von der ξ -Koordinate des Eintreffpunkts abhängt und für den Gleichung 5.30 gilt. Es folgt

$$\beta - \alpha = \delta(\xi) = \frac{4G \cdot M(\xi)}{\xi \cdot c^2} \quad . \quad (5.61)$$

Setzt man nun Gleichung 5.60 in 5.61 ein, so ergibt sich:

$$\beta - \alpha = \alpha \cdot \frac{n_2}{n_1} - \alpha = \alpha \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) = \frac{4GM}{\xi \cdot c^2} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{4G \cdot M(\xi)}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \cdot \xi \cdot c^2} \quad . \quad (5.62)$$

Betrachtet man nun die Steigung der Funktion ψ , welche die Oberflächenlinie der Linse beschreibt, so lässt sich festhalten, dass diese dem Tangens vom negativen Einfallswinkel α entspricht. Wendet man dann noch die bekannte Kleinwinkelnäherung an, so folgt:

$$\frac{d\psi}{d\xi} = \tan(\alpha) \simeq \alpha = \frac{4G \cdot M(\xi)}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \cdot \xi \cdot c^2} \quad . \quad (5.63)$$

Integriert man von einem Wert ξ_0 , der den größten ξ -Wert und somit den Radius der Linse angeben soll, bis $\xi_1 < \xi_0$, so lässt sich mit dem Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung die Differenz der Funktionswerte zu diesen beiden Stellen ermitteln. Bei genügend kleinem Abstand zwischen den Stellen, lässt sich dann iterativ bei gegebenem

Startwert der nächste Funktionswert bestimmen. Es gilt zunächst:

$$\psi(\xi_1) = \psi(\xi_0) - \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{4G \cdot M(\xi)}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot \xi \cdot c^2} d\xi = \psi(\xi_0) - \frac{4G}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot c^2} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{M(\xi)}{\xi} d\xi \quad . \quad (5.64)$$

Unbekannt an dieser Stelle ist die Massenverteilung $M(\xi)$ der Linse. Im simpelsten Fall kann die Gravitationslinse als punktförmig und dementsprechend als Punktmasse angenommen werden. Dies bedeutet, dass sie als so klein ist, dass der Masse gar keine räumlich relevante Ausbreitung zukommt und somit $M(\xi) = M$ gilt. Für weitere Ausführungen, gerade bezüglich unterschiedlicher Annahmen bei der Masseverteilung, sei auf [64] verwiesen. Hier soll nur der oben genannte Fall verdeutlicht werden. Es folgt aus Gleichung 5.64:

$$\psi(\xi_1) = \psi(\xi_0) - \frac{4G \cdot M}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot c^2} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{1}{\xi} d\xi \quad (5.65)$$

$$= \psi(\xi_0) - \frac{4G \cdot M}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot c^2} \cdot \ln \left| \frac{\xi_1}{\xi_0} \right| = \psi(\xi_0) + \frac{4G \cdot M}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot c^2} \cdot \ln \left| \frac{\xi_0}{\xi_1} \right| \quad . \quad (5.66)$$

Führt man den SCHWARZSCHILD-Radius \mathfrak{R}_s ein, so verkürzt sich die Gleichung auf:

$$\psi(\xi_1) = \psi(\xi_0) + \frac{2\mathfrak{R}_s}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)} \cdot \ln \left| \frac{\xi_0}{\xi_1} \right| \quad . \quad (5.67)$$

Die Bestimmung der Oberflächenlinienfunktion ψ für die Massenverteilung einer Spiralgalaxie soll Teil der in Kapitel 5.3.5 vorgestellten Übungsaufgaben sein.

Simulation mit einem Tabellenkalkulationssoftware

Mit Hilfe von Gleichung 5.67 lässt sich die Form der Linse durch eine im Rahmen dieser Arbeit geschriebene Software simulieren. In diesem Fall ist die Software **Excel** aus dem Paket Microsoft Office verwendet worden. Die meisten Schulen haben über die Office-Schullizenzen Zugang zu eben diesem Programm. Sollte dies nicht der Fall sein, so lässt

sich die Simulation auch über kostenlose Office-Programme öffnen, durchführen und bearbeiten. Eine genaue Bedienungsanleitung mit zusätzlichen Einstellmöglichkeiten folgt in Anhang C.1.

Grundsätzlich arbeitet die Simulation iterativ. Punkt für Punkt werden die Funktionswerte für die Glaslinsenform berechnet, abhängig von bestimmten Parametern und Variablen, die der Nutzer per Schieberegler zuvor einstellt und auch nachträglich ändern kann. Es wird von der Simulation ein Diagramm erstellt, welches sich bei Ändern der Parameter live ändert.

Die zugrunde gelegte Funktion für die Glaslinsenform lautet:

$$\psi(\xi_1) = \psi(\xi_0) + z \cdot \ln \left| \frac{\xi_0}{\xi_1} \right| . \quad (5.68)$$

Dabei ist z als Koeffizient zu verstehen, der stellvertretend für $\frac{2R_s}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)}$ steht. Da die Linse während einem Strahlendurchgang nicht verändert wird, können die Werte für den SCHWARZSCHILD-Radius und die Brechungsindices als konstant betrachtet werden und dementsprechend zu einem Koeffizienten zusammengefasst werden.

Für die Simulation müssen geeignete Intervallgrenzen für die einzelnen Parameter und Variablen gewählt werden, innerhalb derer der Nutzer einen Wert wählen kann. In der zur Verfügung gestellten Variante müssen zunächst vier solcher Werte gewählt werden.

1. Startwert ξ_0 :

Dieser Wert gibt an, welchen Radius die Linse aufweisen soll (vgl. Abbildung 5.26). Dieser Wert ist also wichtig für die Breite der Linse und wird später im Diagramm den maximal erreichbaren Wert auf der horizontalen Achse angeben.

ξ_0 ist standardmäßig auf den Zahlenwert 100 eingestellt. Per Schieberegler lassen sich in Einserschritten auch kleinere Werte bis 1 einstellen.

2. Inkrement i und zweite Stelle ξ_1 :

Da die Simulation schrittweise, also Punkt für Punkt arbeitet, muss eine zweite Stelle definiert werden. Über das Inkrement i lässt sich festlegen, wie weit die zweite Stelle ξ_1 von dem zuvor definierten Startwert ξ_0 entfernt sein soll. Es gilt $\xi_1 = \xi_0 - i$. Der

Wert i ist standardmäßig auf den Zahlenwert 1 eingestellt, lässt sich jedoch über den Schieberegler schrittweise bis 100 erhöhen. Bei einer Erhöhung des Wertes für i ist zu bedenken, dass der Startwert ξ_0 den maximalen Wert für i vorgibt. Wird i vergrößert, aber gleichzeitig der Startwert ξ_0 nicht erhöht, reduziert sich die Anzahl der Punkte im später entstehenden Diagramm.

3. Funktionswert $\psi(\xi_0)$ zum Startwert:

Der Funktionswert vom Startwert muss ebenfalls vorgegeben werden. Dieser gibt an, wie hoch die Linse am Rand werden soll. In den Standardeinstellungen werden per Schieberegler Werte zwischen 1 und 25 zugelassen.

4. Koeffizient z :

Der Koeffizient z lässt in den Standardeinstellungen Werte zwischen 0,01 und 0,1 zu.

In der Excel-Simulation sieht die Oberfläche für den Benutzer zum Wählen der Parameter mittels Schieberegler wie in Abbildung 5.27 dargestellt aus.

Sind die Parameter gewählt, so ergeben sich in einer Tabelle die iterativ bestimmten Werte gemäß Formel 5.68. Hierbei ist zu beachten, dass je nach Wahl der Startwerte die Anzahl der iterativ ermittelten Funktionswerte variieren kann. Die Berechnung bricht automatisch ab, sobald im Logarithmus die Zahl Null oder negative Zahlen stehen. In der Tabelle wird dann das Akronym # NV für „nicht verfügbar“ eingetragen. Die Simulation ist so erstellt worden, dass die Werte direkt in ein Diagramm übertragen werden. Dieses lässt sich nachträglich nahezu beliebig formatieren. Die ausgegebene Version des Diagramms richtet sich automatisiert nach den vom Nutzer gesetzten Parametern. In Abbildung 5.28 ist beispielhaft das Diagramm für die Parameter $\xi_0 = 100$, $i = 1$, $\psi(\xi_0) = 25$ und $z = 0,01$ dargestellt.

Unabhängig von der Wahl der Parameter wird der Verlauf der Kurve immer gleich sein, was mit Blick auf die Funktionsgleichung und der immer gleich bleibenden Struktur der abzubildenden Logarithmus-Funktion nachvollziehbar ist. Diese Funktion beschreibt also nach den mathematischen Vorüberlegungen die Oberflächenform einer Glaslinse, welche die Effekte einer Gravitationslinse simulieren soll.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Simulation einer Gravitationslinse durch eine Glaslinse						
2	<i>Autor: P. Krumm</i>						
3							
4	Vorgehen:						
5	1. Wählen Sie zunächst mit den Schiebereglern einen Wert für ξ_0 sowie für das						
6	Inkrement i aus. Damit sind die Werte für ξ_0 und ξ_1 festgelegt.						
7	2.						
8	Wählen Sie anschließend mit dem dritten Schieberegler einen Wert für $\psi(\xi_0)$ aus.						
9	Dieser gibt den Startwert (niedrigster Wert) auf der vertikalen Achse an.						
10	3. Anschließend wählen Sie einen Wert für den Parameter z . Dieser ist proportional zur						
11	Masse der Linse.						
12							

(a) Startbildschirm der Simulation.

Wählen von ξ_0 :	$\xi_0 = 100$	<input type="range"/>
Wählen von ξ_1 :	Inkr. $i = 1$ $\xi_1 = 99$	<input type="range"/>
Wählen von $\psi(\xi_0)$:	$\psi(\xi_0) = 15$	<input type="range"/>
Wählen von z :	$z = 0,02$	<input type="range"/>

(b) Oberfläche zum Einstellen der Parameter.

Abbildung 5.27: Benutzeroberfläche der Excel-Simulation mit beispielhaft gewählten Werten für die Parameter.

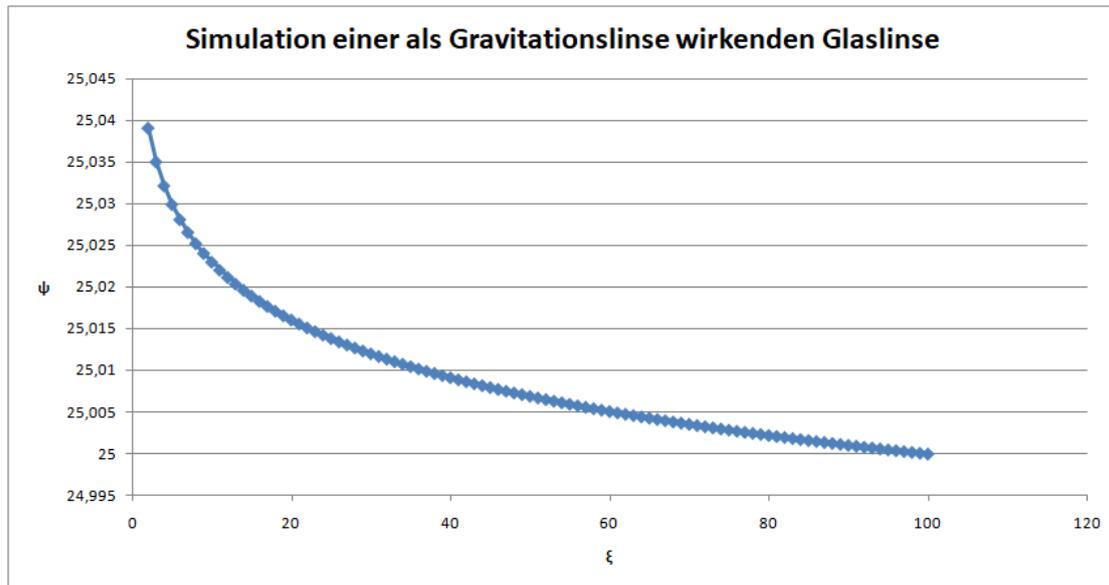


Abbildung 5.28: Graphik aus der Excel-Simulation für $\xi_0 = 100$, $i = 1$, $\psi(\xi_0) = 25$ und $z = 0,01$.

5.3.4.3 Analogieexperiment zur Veranschaulichung eines Einstein-Rings

Nutzt man die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Kapitel, so lässt sich feststellen, dass die Oberfläche einer Glaslinse, welche die Effekte einer Gravitationslinse simulieren soll, ungefähr so geformt ist wie der Fuß eines Weinglases. Diese Erkenntnis ist keineswegs neu, sondern geht in ihrer mathematischen Überlegung zurück auf die Ausführungen von Sidney LIEBES [82] sowie Jean SURDEJ und Sjur REFSDAL [62] und wurde bereits vielfach mit einem Weinglasfuß [vgl. z. B. 87] und von Karl-Heinz LOTZE mit einer von der Sternwarte Hamburg nach der Logarithmus-Funktion geschliffenen Glaslinse, die die beschriebene Form eines Weinglasfußes hat, untersucht [63]. Nachfolgend wird das Experiment daher nur kurz vorgestellt und um weitere Beobachtungsmöglichkeiten zum Strahlenverlauf und zur Erzeugung von Mehrfachbildern ergänzt. Durch das Weinglas werden die Lichtstrahlen gebündelt, so wie es aus der Strahlenoptik von der Konvexlinse bekannt ist, vergleiche hierzu Abbildung 5.29. Im Unterschied zu den Konvexlinsen, besitzt das Weinglas jedoch keinen Brennpunkt, sondern eine Brennlinie.

Eine einfache und in Schülerexperimenten gut umsetzbare Möglichkeit, mit einer solchen

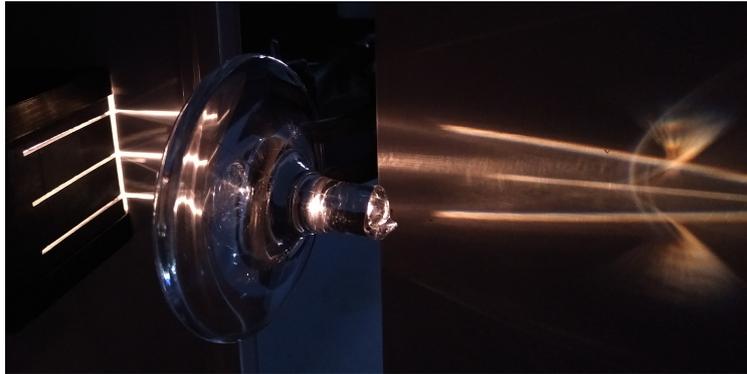
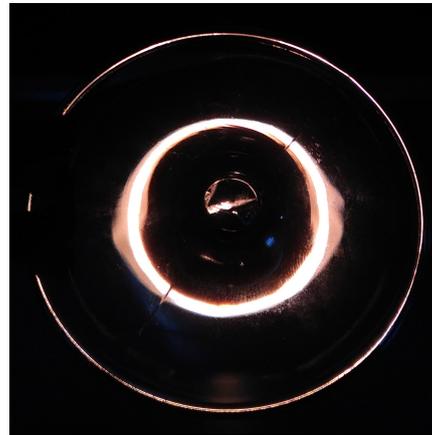


Abbildung 5.29: Der Lichtstrahlenverlauf ähnelt dem einer Konvexlinse.

Glaslinse einen EINSTEIN-Ring oder Mehrfachbilder wie sie beim Gravitationslinseneffekt auftreten zu simulieren, ist die Verwendung eines Teelichts als Lichtquelle. Der eingespannte Fuß eines Weinglases, durch welchen man hindurch schaut, wird vor dem Teelicht arretiert. Bei einer geraden Ausrichtung, das heißt, dass Beobachter, Weinglasfuß und Teelicht auf einer Ebene in gerader Linie positioniert sind, lässt sich das Licht der Kerzenflamme als Ring durch das Weinglas beobachten, vgl. hierzu Abbildung 5.30. Verschiebt man den Beobachtungspunkt etwas nach oben, unten oder zur Seite, lassen sich Mehrfachbilder erzeugen, vgl. Abbildung 5.31 links. Statt dem Teelicht lassen sich auch Lampen oder Laser verwenden. Exemplarisch ist in Abbildung 5.31 rechts ein durch einen Laserstrahl erzeugter Ring zu sehen.



(a) Experimenteller Aufbau mit einem Teelicht als Lichtquelle und einem eingespannten Weinglas-Fuß.



(b) Beobachtung bei gerader Ausrichtung von Beobachter, Weinglas-Fuß und Teelicht.

Abbildung 5.30: Experimenteller Aufbau und Beobachtung zum Analogieexperiment zur Veranschaulichung der Entstehung eines EINSTEIN-Rings.



(a) Bei Verschiebung des Beobachtungspunktes nach oben entsteht ein Doppelbild.



(b) Die gleichen Beobachtungen lassen sich statt eines Teelichts als Lichtquelle auch mit einer Lampe oder einem Laser durchführen.

Abbildung 5.31: Experimentelles Setup mit veränderter Ausrichtung zur Erzeugung von Mehrfachbildern und einer anderen Lichtquelle.

5.3.5 Vertiefende Aufgaben für den Unterricht

1. Albert EINSTEIN schreibt in seiner 1911 veröffentlichten Publikation „Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes“:

„Diese Erfahrung vom gleichen Fallen aller Körper im Gravitationsfelde ist eine der allgemeinsten, welche die Naturbeobachtung uns geliefert hat, [...]“. [68, S. 899]

Erläutern Sie, was damit gemeint ist.

Lösung: EINSTEIN bezieht sich auf das Phänomen, dass alle Körper, unabhängig von ihren äußeren Eigenschaften (Masse, Volumen, Form), gleichermaßen in einem Gravitationsfeld im Vakuum fallen. Dieses Phänomen ist bereits aus der Mechanik bekannt.

In der Regel erfolgt im Unterricht irgendwann einmal die Analyse des freien Falls eines Tischtennisballs und einer Stahlkugel. Beide Objekte, obwohl sie unterschiedliche Masse haben, erreichen den Erdboden zur gleichen Zeit, wenn sie gleichzeitig aus gleicher Höhe fallen gelassen wurden. Bei zu geringen Massen und großen Querschnittsflächen macht sich der Effekt des Auftriebs bemerkbar (Beispiel: freier Fall einer Feder oder eines Blatts Papier). Im Vakuum jedoch wird dieser Effekt ausgeschaltet, da hier keine Luft für Auftrieb sorgen kann. Im Vakuum fallen alle Körper gleich.

Speziell für den Kontext, auf den sich EINSTEIN bezieht, lässt sich somit sagen: Wenn alle Objekte im Gravitationsfeld gleich fallen, müssen auch die Photonen des Lichtstrahls im Gravitationsfeld „fallen“.

2. Im Unterricht wurde eine Formel für den Ablenkungswinkel δ hergeleitet.

Erläutern Sie die einzelnen Herleitungsschritte und begründen Sie beim Aufstellen der Bahnkurve des Lichtstrahls die Analogie zum waagerechten Wurf in der Mechanik.

Lösung: Teil 1: Erläuterung der Herleitungsschritte, siehe Kapitel 5.3.1.2.

Teil 2: Erläuterung der Analogie zum waagerechten Wurf.

Die Analogie zum waagerechten Wurf besteht darin, dass auch hier zwei Bewegungen betrachtet wurden, nämlich die gleichförmige Bewegung in x -Richtung sowie die gleichmäßig beschleunigte Bewegung in y -Richtung, wobei diese natürlich nur in erster Näherung gilt. Die gleichförmige Bewegung in x -Richtung begründet sich durch die konstante Lichtgeschwindigkeit. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist beim waagerechten Wurf eine gute Näherung, obwohl natürlich bedacht werden muss, dass die Ablenkung, also die Richtung der Beschleunigung respektive der Gravitationskraft zum Gravitationszentrum zeigt und damit die Vektoren nicht parallel sind. Aufgrund der Dimensionen (kleine Strecke in x -Richtung und große Strecke in y -Richtung) gilt die getroffene Annahme aber in sehr guter Näherung. Die Ablenkung des Lichtstrahls in dem hier vorliegenden Kontext erfolgt zum Schwerpunkt der Gravitationslinse und somit auch nicht konstant in y -Richtung. Dennoch lässt sich aus Gründen der einfachen Berechnung diese Annäherung so treffen. Es ergibt sich dementsprechend die gleiche Formel wie beim waagerechten Wurf, nur dass hier für die Geschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit c eingesetzt wird.

3. Albert EINSTEIN leitet die Formel für den Ablenkungswinkel auf eine etwas andere Art her. Er verwendet hierfür das Gravitationspotential und bestimmt den Winkel schließlich unter Verwendung von Polarkoordinaten (siehe hierzu auch Abbildung 5.32) zu:

$$\delta = \frac{1}{c^2} \int_{\vartheta=-\frac{\pi}{2}}^{\vartheta=+\frac{\pi}{2}} \frac{GM}{r^2} \cos \vartheta \, ds \quad . \quad \text{vgl. [68, S. 908]}$$

Lösen Sie das Integral und bestätigen Sie die Formel für den Ablenkungswinkel.

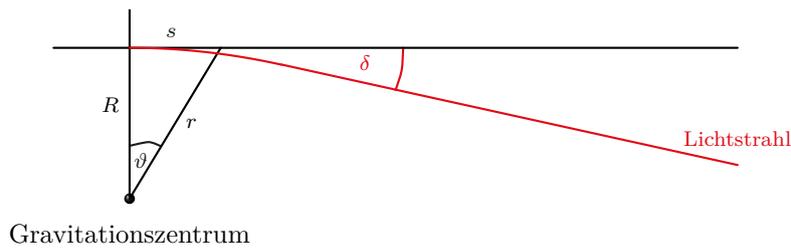


Abbildung 5.32: Schematische Darstellung der Lichtablenkung durch den Gravitationslinseneffekt zur Verdeutlichung der Herleitung einer Formel für den Ablenkungswinkel δ nach Albert EINSTEIN.

Lösung: Das Wegelement ds in Polarkoordinaten ist gegeben durch $ds = r d\vartheta$.

$$\begin{aligned}
 \delta &= \frac{1}{c^2} \int_{\vartheta=-\frac{\pi}{2}}^{\vartheta=+\frac{\pi}{2}} \frac{GM}{r^2} \cos \vartheta ds \\
 &= \frac{1}{c^2} \int_{\vartheta=-\frac{\pi}{2}}^{\vartheta=+\frac{\pi}{2}} \frac{GM}{r^2} r \cos \vartheta d\vartheta \\
 &= \frac{1}{c^2} \cdot \frac{GMR}{R^2} (\sin \vartheta) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \\
 &= \frac{1}{c^2} \cdot \frac{GM}{R} \cdot (+1 - (-1)) \\
 &= \frac{2GM}{c^2 R} .
 \end{aligned}$$

Dies entspricht der Gleichung für den Ablenkungswinkel, vgl. Formel 5.29.

4. Bei der Herleitung einer Formel für die entstehenden Bilder beim Gravitationslinsengesetz, wird der reduzierte Ablenkungswinkel $\hat{\alpha}$ eingeführt, vgl. 5.3.1.3. Wir haben diesen Winkel über die Linsengleichung bestimmt, vgl. Formel 5.32 und dann Formel 5.33 als Ergebnis erhalten.

Leiten Sie diese Formel mit Hilfe des Sinussatzes her.

Lösung: In Anlehnung an Abbildung 5.22 folgt die Skizze in Abbildung 5.33, ergänzt um zwei Längenangaben. Es gelten nach dem Sinussatz folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} \frac{\sin \hat{\alpha}}{z} &= \frac{\sin \gamma}{\hat{d}_{OL}} \quad \text{und} \quad \frac{\sin \alpha}{z} = \frac{\sin \gamma}{\hat{d}} \quad . \\ \Rightarrow z &= \frac{\hat{d}_{OL} \sin \hat{\alpha}}{\sin \gamma} = \frac{\hat{d} \sin \alpha}{\sin \gamma} \\ \Rightarrow \hat{d}_{OL} \sin \hat{\alpha} &= \hat{d} \sin \alpha \quad . \end{aligned}$$

Mit $\sin x \simeq x$ als Kleinwinkelnäherung

$$\text{und } \hat{d} \simeq d \text{ für große Abstände folgt: } d_{OL} \cdot \hat{\alpha} \simeq d \cdot \alpha \quad .$$

$$\Rightarrow \hat{\alpha} = \frac{d}{d_{OL}} \cdot \alpha \quad .$$

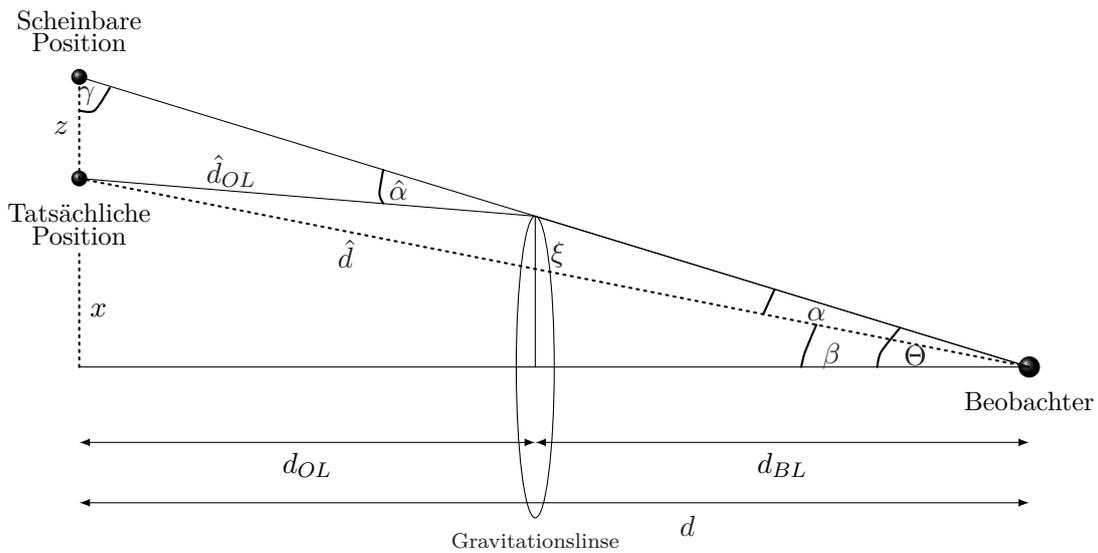


Abbildung 5.33: Skizze für die Herleitung einer Formel zum EINSTEIN-Radius.

5. Bei der Simulation einer Gravitationslinse durch eine Glaslinse gilt für die Funktionswerte Formel 5.64:

$$\psi(\xi_1) = \psi(\xi_0) - \frac{4G}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot c^2} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{M(\xi)}{\xi} d\xi \quad . \quad (5.69)$$

Zur Lösung des Integrals muss die Massenverteilung $M(\xi)$ bekannt sein. In der bereits durchgeführten Version wurde die Annahme einer punktförmigen Gravitationslinse getroffen, das heißt, dass $M(\xi) = \text{const.}$ gilt.

Berechnen Sie die Oberflächenlinienfunktion ψ für die Annahme, dass die Gravitationslinse eine Massendichte einer Spiralgalaxie aufweist.

Hinweis: Die Massenverteilung ist abhängig von der Oberflächen-Massendichte Σ . Diese ist bei einer Spiralgalaxie exponentiell abfallend, vgl. hierzu beispielsweise die Ausführungen von Jaan EINASTO und Urmas HAUD in [88]. Es gilt: $\Sigma = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right)$. Ferner ist Voraussetzung, dass die Spiralgalaxie zumindest teilweise transparent sein muss.

Lösung: Nach Formel 5.45 gilt aufgrund der sphärischen Geometrie für die Massenverteilung innerhalb von ξ : $M(\xi) = 2\pi \int_0^\xi \Sigma(\xi') \xi' d\xi'$.

$$\begin{aligned}
 M(\xi) &= 2\pi \int_0^\xi \Sigma(\xi') \xi' d\xi' = 2\pi \Sigma_0 \int_0^\xi \xi' \exp\left(-\frac{\xi'}{\xi_{cr}}\right) d\xi' \\
 &= 2\pi \Sigma_0 \left[-\xi' \xi_{cr} \exp\left(-\frac{\xi'}{\xi_{cr}}\right) \Big|_0^\xi + \int_0^\xi \xi_{cr} \exp\left(-\frac{\xi'}{\xi_{cr}}\right) d\xi' \right] \\
 &= 2\pi \Sigma_0 \left[-\xi \xi_{cr} \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) - \xi_{cr}^2 \exp\left(-\frac{\xi'}{\xi_{cr}}\right) \Big|_0^\xi \right] \\
 &= 2\pi \Sigma_0 \left[-\xi \xi_{cr} \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) - \xi_{cr}^2 \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) + \xi_{cr}^2 \right] \\
 &= 2\pi \Sigma_0 \xi_{cr}^2 \left[1 - \left(\frac{\xi}{\xi_{cr}} + 1\right) \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) \right].
 \end{aligned}$$

Dies wird nun in Formel 5.64 eingesetzt und somit die Funktion für die Oberflächenlinie der Glaslinse bestimmt.

$$\begin{aligned}
 \psi(\xi_1) &= \psi(\xi_0) - \frac{4G}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot c^2} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{M(\xi)}{\xi} d\xi \\
 &= \psi(\xi_0) - \underbrace{\frac{8\pi G \xi_{cr}^2 \Sigma_0}{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot c^2}}_{=:z} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{1 - \left(\frac{\xi}{\xi_{cr}} + 1\right) \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right)}{\xi} d\xi \\
 &= \psi(\xi_0) - z \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{1}{\xi} d\xi + z \int_{\xi_0}^{\xi_1} \left(\frac{1}{\xi_{cr}} + \frac{1}{\xi}\right) \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) d\xi \\
 &= \psi(\xi_0) - z \cdot \ln\left(\frac{\xi_1}{\xi_0}\right) - z \cdot \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) \Big|_{\xi_0}^{\xi_1} + z \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) d\xi \\
 &= \psi(\xi_0) + z \left[\ln\left(\frac{\xi_0}{\xi_1}\right) - \exp\left(-\frac{\xi_1}{\xi_{cr}}\right) + \exp\left(-\frac{\xi_0}{\xi_{cr}}\right) + \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_{cr}}\right) d\xi \right].
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle lässt sich das Integral nicht weiter auflösen. Man erkennt im Vergleich zur Oberflächenlinie bei der Annahme einer punktförmigen Gravitationslinse, dass der erste Term (Logarithmus-Summand) gleich ist. Bei der Erweiterung auf eine Massenverteilung einer Spiralgalaxie kommen noch weitere Korrekturterme (Exponential-Summanden) hinzu sowie das Integral am Ende, welches sich nur noch mit numerischen Verfahren annähern lässt.

5.4 Erprobung

5.4.1 Vorgehensweise

Das hier vorgestellte Modul zu den Beobachtungen und Befunden der Gravitationsphysik ist mit Schülerinnen und Schülern der Oberstufe an einem Gymnasium in Nordrhein-Westfalen erprobt worden. Die Erkenntnisse aus dieser Erprobung sollen hier vorgestellt werden. Zunächst sollen in diesem Zusammenhang die Rahmenbedingungen kurz dargestellt werden. Das Modul wurde in zwei Kursen mit insgesamt 41 Schülerinnen und Schülern unterrichtet. Nach der Erarbeitung der fachlichen Grundlagen und der historischen Entwicklung zu den Rotationskurven von Spiralgalaxien wurde das Analogieexperiment zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit als Demonstrationsexperiment durchgeführt. Die Auswertung erfolgte dann in Schülergruppen an Laptops mit der vom Verfasser erarbeiteten `Root`-Software. Ebenso wurden die fachlichen Grundlagen und die historische Entwicklung zum Gravitationslinseneffekt behandelt. Anschließend folgt das Analogieexperiment zur Veranschaulichung der Verzerrungseffekte aufgrund des verwendeten Lasers als Demonstrationsexperiment (nach den Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht an allgemeinbildenden Schulen in Nordrhein-Westfalen [89, S. 63 f.]). Die Simulation zur Gravitationslinse und das Analogieexperiment zur Veranschaulichung des EINSTEIN-Rings wurden in Schülergruppen eigenständig durchgeführt. Sowohl nach den Einheiten zu den Rotationskurven als auch nach den Einheiten zum Gravitationslinseneffekt wurden die Schülerinnen und Schüler auf ihr erreichtes Wissen getestet. Dazu wurden spezielle Test-Fragebögen entwickelt, in denen Fragen zum grundlegenden Verständnis zur Thematik wie auch vertiefende Fragen (vergleiche Kapitel 5.3.5) gestellt wurden. Die Test-Fragebögen sind in Anhang D.1 eingefügt. Um eine entsprechende Auswertung vornehmen zu können, wurden die gestellten Fragen drei Anforderungsbereichen zugeteilt worden. Die Definition dieser Anforderungsbereiche ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

Anforderungsbereich I	Aufgaben und Problemstellungen werden bearbeitet, indem bekannte Inhalte reproduziert werden.
Anforderungsbereich II	Aufgaben und Problemstellungen werden bearbeitet, indem bekannte Inhalte verknüpft werden und somit Zusammenhänge hergestellt werden können.
Anforderungsbereich III	Aufgaben und Problemstellungen werden bearbeitet, indem komplexe Sachzusammenhänge erschlossen werden, bekannte Inhalte verallgemeinert werden oder auf andere Sachzusammenhänge übertragen werden.

Tabelle 5.3: Definition der drei Anforderungsbereiche (Kurz: AFB I bis AFB III).

5.4.2 Ergebnisse und Auswertung

Der Tabelle 5.4 sind die einzelnen inhaltlichen Schwerpunkte zu entnehmen mit einer entsprechenden Zuordnung einer Anzahl an Schülerinnen und Schülern, welche die Fragen zu dem jeweiligen inhaltlichen Schwerpunkt vollständig, größtenteils, zum Teil oder nicht korrekt beantwortet haben.

	vollständig korrekt	größtenteils korrekt	zum Teil korrekt	nicht korrekt
Prinzip der Messung von Rotationskurven (AFB I)	35	5	1	0
Zusammenhang zwischen astronomischer Messung und Analogieexperiment (AFB II)	30	8	3	0
Begründung der Existenz Dunkler Materie mittels Rotationskurven (AFB III)	15	19	6	1

Tabelle 5.4: Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu Rotationskurven und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

Die entsprechende graphische Darstellung in Form eines Säulendiagramms folgt in Abbildung 5.34. Es ist zu erkennen, dass die Aufgaben zum Messprinzip von Rotationskurven von nahezu allen Schülerinnen und Schülern vollständig oder größtenteils korrekt beant-

wortet wurde. Die Schülerinnen und Schüler mussten hier auf die Messung der Geschwindigkeit über den DOPPLER-Effekt eingehen und das prinzipielle Vorgehen beim Messen von Geschwindigkeit und Abstand nennen. Da der DOPPLER-Effekt im Bereich der mechanischen Schwingungen und Wellen bereits behandelt wurde, ist die hohe Anzahl an korrekten Schülerlösungen nicht verwunderlich. Eben aufgrund der bereits bekannten Inhalte und der zuvor durchgenommenen Unterrichtssequenzen zu Rotationskurven, handelt es sich bei dieser ersten Frage um eine Reproduktionsleistung, weswegen sie dem Anforderungsbereich I zugeordnet wurde. In der zweiten Aufgabe sollten die Schülerinnen und Schüler den Zusammenhang zwischen der astronomischen Messung und dem Analogieexperiment herausstellen. Da hier bekannte Inhalte verknüpft werden müssen, handelt es sich um Anforderungsbereich II. Von 41 Schülerinnen und Schülern konnten 38 eine vollständig oder größtenteils korrekte Antwort geben. Dies spricht unter anderem auch für eine gelungene Wahl des Analogieexperiments, da der Zusammenhang zwischen diesem und der eigentlichen astronomischen Messung gut erkennbar ist. Die Übertragung auf das Analogieexperiment scheint bei den befragten Schülerinnen und Schülern problemlos geklappt zu haben. Leichte Differenzen ergeben sich dann im dritten Anforderungsbereich. In der letzten Aufgabe sollten die Lernenden den Zusammenhang zur Dunklen Materie aufzeigen, indem sie auf Grundlage einer gemessenen Rotationskurve die Existenz Dunkler Materie begründen. Auch hier antworteten immerhin 34 von 41 Schülerinnen und Schülern vollständig oder größtenteils korrekt, jedoch ist klar zu erkennen, dass der Anteil der vollständig korrekten Lösungen deutlich kleiner wird. Betrug er bei den ersten beiden Aufgaben noch 85% beziehungsweise 73%, ist er schließlich mit knapp 37% auf deutlich unter die Hälfte gefallen. Interessant ist bei der Auswertung, dass die Schwierigkeiten hier keineswegs bei dem Erkennen der fachlich relevanten Informationen liegen, sondern vielmehr in der sprachlichen Formulierung und dem In-Beziehung-Setzen unterschiedlicher Informationen und der sich daraus ergebenden logischen Konsequenz. Bis hierhin lässt sich festhalten, dass gemäß der aufsteigenden Anforderungsbereiche ein zu erwartender leichter Abfall der korrekten Schülerlösungen feststellbar ist. Die aber dennoch hohe Zahl an überzeugenden Schülerantworten kann als Erfolg des ersten Teils

von Modul 1 gewertet werden.

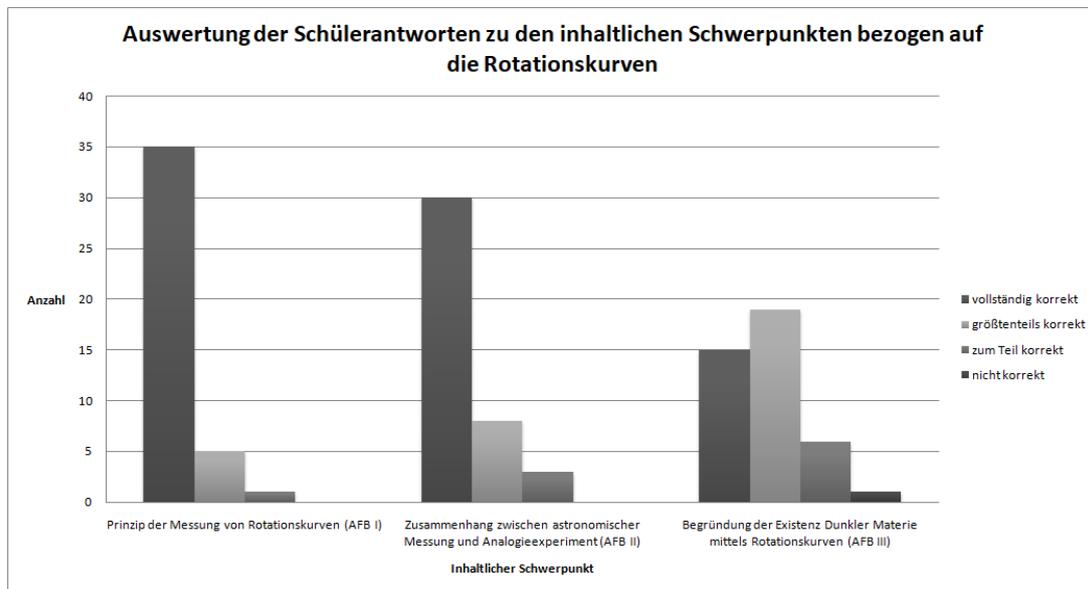


Abbildung 5.34: Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu Rotationskurven und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

Im Bereich des Gravitationslinseneffektes wurden den Schülerinnen und Schülern fünf Fragen gestellt, wobei die ersten drei vergleichbar zu denen der Rotationskurven sind. Die letzten beiden Aufgaben beziehen sich auf mathematische Herleitungen, einmal zum Ablenkungswinkel und einmal zum EINSTEIN-Radius.

Tabelle 5.5 zeigt die Zuordnung der entsprechenden Schülerzahl zu den einzelnen Aufgaben gemäß der Einteilung in vollständig, größtenteils, zum Teil oder nicht korrekte Antworten. In Abbildung 5.35 ist die entsprechende graphische Darstellung der Ergebnisse in Form eines Säulendiagramms zu erkennen. Die Analyse der Daten ergibt, dass das Prinzip der Lichtablenkung durch ein Gravitationsfeld nahezu allen Schülerinnen und Schülern verständlich gemacht werden konnte. Auch das Nennen der unterschiedlichen Phänomene gelingt bei fast allen vollständig korrekt. Da es sich hier um eine rein reproduktive Leistung der Schülerinnen und Schüler handelt, ist diese Aufgabe dem Anforderungsbereich I zuzuordnen. Beim Zusammenhang zwischen den durchgeführten Experimenten und dem Gravitationslinseneffekt verschiebt sich die Verteilung etwas.

Hier müssen Zusammenhänge hergestellt werden, sodass sich diese Aufgabe dem Anforderungsbereich II zuordnen lässt. Von zuvor 36 Personen, die im Anforderungsbereich I eine vollständig korrekte Lösung erbracht haben, sind es nun nur noch 25. Immerhin konnten 11 Schülerinnen und Schüler eine größtenteils korrekte Lösung angeben. Bei genauerer Betrachtung der Schülerantworten fällt auf, dass hier bei einigen Antworten nicht alle Phänomene genannt wurden, sodass zwar eine korrekte Lösung vorliegt, aber keine vollständige. Dementsprechend sinkt der Anteil von Schülerinnen und Schülern, die eine vollständig korrekte Lösung angegeben haben.

	vollständig korrekt	größtenteils korrekt	zum Teil korrekt	nicht korrekt
Prinzip der Lichtablenkung durch ein Gravitationsfeld, inkl. des Nennens unterschiedlicher Phänomene beim Gravitationslinseneffekt (AFB I)	36	3	1	1
Zusammenhang zwischen Experimenten (Verzerrereffekte durch Salzlösung im Wasser sowie Simulation durch eine Glaslinse) und dem Gravitationslinseneffekt (AFB II)	25	11	4	1
Begründung für die Existenz Dunkler Materie mittels Gravitationslinseneffekte (AFB III)	32	8	1	0
Rechnerische Bestimmung eines Ablenkwinkels (AFB II)	16	5	15	5
Rechnerische Herleitung einer Formel für den Einstein-Radius (AFB III)	2	1	17	21

Tabelle 5.5: Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zum Gravitationslinseneffekt und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

Im Anforderungsbereich III wurde nach der Begründung für die Existenz Dunkler Materie gefragt auf Grundlage des Gravitationslinseneffektes. Hier konnten immerhin 32 Schülerinnen und Schüler eine vollständig korrekte Lösung angeben. Vergleicht man diesen Wert mit der entsprechenden Aufgabe bei den Rotationskurven (Tabelle 5.4), so ist zu konstatieren, dass den Schülerinnen und Schülern offenbar die Begründung für die Existenz der Dunklen Materie mit dem Gravitationslinseneffekt einfacher fällt als die entsprechende Begründung mit einer Rotationskurve. Dies könnte mutmaßlich daran liegen, dass das optische Phänomen der Lichtablenkung etwas einfacher nachzuvollziehen und auf den Kontext der Dunklen Materie zu übertragen ist als die Interpretation eines Diagramms, welches einen komplexen Zusammenhang zwischen der Existenz Dunkler Materie und der Rotationsgeschwindigkeit von Objekten in einem bestimmten Abstand vom Galaxienzentrum herstellt.

Bei der dann folgenden ersten Rechenaufgabe handelt es sich um eine eher einfache Herleitung (Ablenkungswinkel), die aus dem Unterricht bekannt war. Nichtsdestotrotz ist dies keine rein reproduktive Leistung, da die Herleitungsschritte nicht auswendig gelernt wurden, sondern vielmehr neu durch Verknüpfen der Bewegungsgleichungen mit den Erkenntnissen aus der Steigung der Tangente durchdacht und aufgeschrieben werden mussten. Der Ansatz ist allerdings über die Bewegungsgleichungen den Schülerinnen und Schülern aus der Mechanik bekannt. Aufgrund der Analogie zum waagerechten Wurf wird die Aufgabe insgesamt dem Anforderungsbereich II zugeordnet. Mit insgesamt 16 vollständig korrekten Lösungen und 5 größtenteils korrekten Lösungen, können die Hälfte der befragten Schülerinnen und Schüler eine überzeugende Antwort geben. Man erkennt eine deutliche Diskrepanz zu den vorherigen drei Aufgaben. Waren es bei Aufgabe 1 noch 95% der Lernenden, die entweder eine vollständig oder eine größtenteils korrekte Antwort geben konnten, sank dieser Anteil dann auf 88% bei Aufgabe 2. Aufgabe 3 war, wie oben beschrieben, mit 98% überzeugender Antworten überraschend gut. In der vierten Aufgabe jedoch, also der ersten Herleitungsaufgabe, sank der Anteil auf 51%. Ein noch niedrigerer Wert wird bei der fünften Aufgabe, der zweiten Herleitungsaufgabe, mit 7% erreicht. Lediglich drei Schülerinnen und Schüler konnten hier eine überzeugende

Antwort geben. Dies ist jedoch aufgrund der hohen Anforderung zu erwarten gewesen. Die Herleitung des EINSTEIN-Radius, nach welcher hier gefragt wurde, ist ohne vorheriges Lernen seitens der Schülerinnen und Schüler nicht einfach reproduzierbar oder durch Verknüpfungen von Bekanntem direkt ersichtlich. Dass hier überhaupt drei Schülerinnen und Schüler im überzeugenden Bereich liegen, kann als Erfolg gewertet werden. Ebenso ist die Tatsache, dass immerhin 17 Schülerinnen und Schüler Ansätze formulieren konnten und so zumindest die Aufgabe zum Teil korrekt lösen konnten, positiv zu sehen. Insgesamt bleibt jedoch festzuhalten, dass die Schülerinnen und Schüler gerade bei Rechenaufgaben Probleme haben, die grundlegenden fachlichen Zusammenhänge jedoch verstanden wurden.

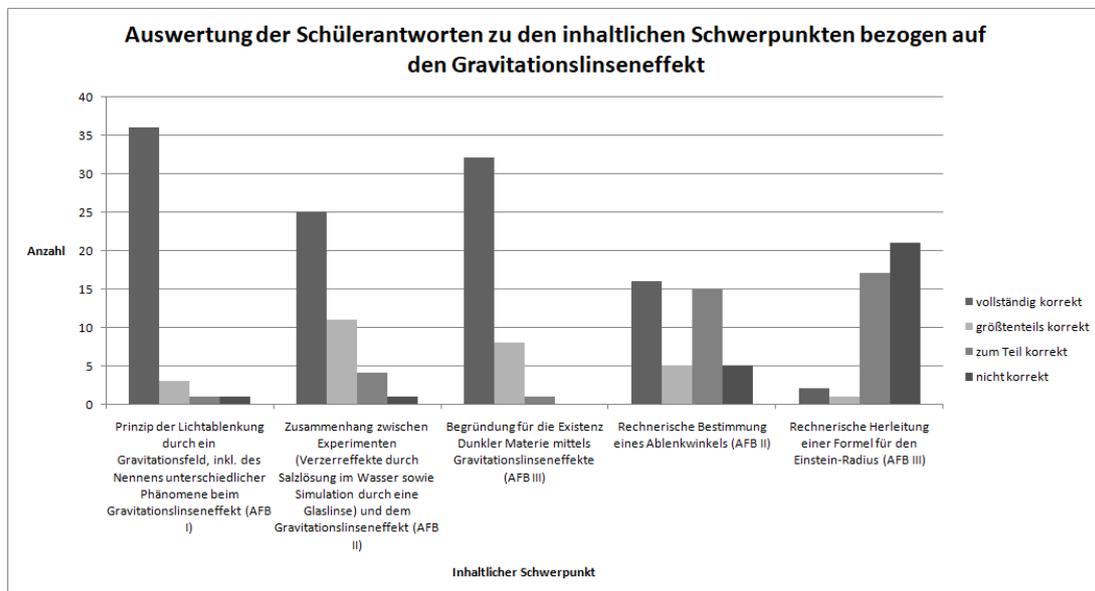


Abbildung 5.35: Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zum Gravitationslinseneffekt und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

Neben den fachlichen Einschätzungen in Form von Aufgaben, wurde auch nach einer persönlichen Einschätzung der Schülerinnen und Schüler gefragt. Dies gelang mit einem Fragebogen, der ebenfalls in Anhang D.1 eingefügt ist. Auf einer entwickelten vierstufigen LIKERT-Skala mit den Rubriken „stimme voll zu“, „stimme teilweise zu“, „stimme eher nicht zu“ und „stimme nicht zu“ konnten die Befragten Angaben zu folgenden Aussagen

machen:

- Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ wurde verstanden.
- Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ war interessant.
- Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ hat den Schülerinnen und Schülern zu neuen Erkenntnissen verholfen.
- Die Wahl der Experimente und Simulationen war angemessen und für mich ersichtlich.
- Die Wahl der Aufgaben und Rechnungen war angemessen und für mich ersichtlich.
- Ich möchte mehr zum Thema „Dunkle Materie“ erfahren.

Die Ergebnisse der Befragung sind in Tabelle 5.6 und graphisch in Form eines Säulendiagramms in Abbildung 5.36 dargestellt. Man erkennt deutlich, dass der Großteil der Schülerinnen und Schüler den Aussagen voll oder zumindest teilweise zustimmen. Lediglich bei der Bewertung der Aufgaben und Rechnungen ist ein signifikanter Unterschied zu den anderen Aussagen feststellbar. Dennoch stimmen auch hier deutlich mehr als die Hälfte der Befragten der Aussage mindestens teilweise zu. Allerdings ist der Anteil derjenigen, die der Aussage voll zustimmen, mit 36% der niedrigste im Vergleich zu den anderen Aussagen. Besonders deutlich fällt im Unterschied dazu auch auf, dass bis auf eine Person alle Schülerinnen und Schüler die Wahl der Experimente und Simulationen als angemessen und für sie ersichtlich bewerten. Man kann daher zurecht vermuten, dass die hier gewählten Materialien und Übertragungsmöglichkeiten der fachlichen Inhalte auf den Schulunterricht passend sind. Ebenfalls erfreulich sind die Angaben zur letzten Frage. 88% der befragten Personen stimmen der Aussage voll zu, dass sie mehr zur Dunklen Materie erfahren möchten. Dies legitimiert die Entwicklung weiterer Module. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass aus Schülersicht das Modul sehr positiv bewertet

worden ist. Natürlich muss auch bedacht werden, dass der Stichprobenumfang mit 41 Personen nicht besonders groß ist und dass die befragten Schülerinnen und Schüler alle Interesse am Fach Physik haben. Dies lässt sich darin erkennen, dass die Befragungen in AG-Stunden, die freiwillig besucht wurden, durchgeführt wurden. Auch ist zu bedenken, dass gerade bei der persönlichen Einschätzung der Lernenden in der Regel immer etwas zu positive Antworten gewählt werden, sodass möglicherweise die wahren Ergebnisse leicht unter den hier vorgestellten liegen. Nichtsdestotrotz ist zu erkennen, dass mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modul offenbar die Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik gut vermittelt werden können. Die hier befragten Schülerinnen und Schüler haben gezeigt, dass sie die fachlichen Inhalte verstanden haben und auch auf motivationaler Ebene noch weiteres Interesse am Themengebiet der Dunklen Materie zeigen. Zur Vollständigkeit sei an dieser Stelle erwähnt, dass im Rahmen dieser Evaluation keine Post-Befragung einige Zeit später durchgeführt werden konnte, da der Verfasser dieser Arbeit während der Erprobung die Schule gewechselt hat.

Neben den Erkenntnissen durch die Auswertung der von Schülerinnen und Schülern bearbeiteten Aufgaben sowie durch die per Fragebogen ermittelten persönlichen Einschätzungen der Lernenden zum ersten hier vorgestellten Modul, wurden auch zwei Lehrkräfte nach ihren Einschätzungen befragt. Dies geschah in einem persönlichen Gespräch, in welchem die beiden Lehrkräfte positive und verbesserungswürdige Aspekte zur unterrichtlichen Vorbereitung und Durchführung des Moduls benennen sollten. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Materialien standen den Lehrkräften zur Verfügung. Die nachfolgende Auflistung zeigt die genannten positiven (mit einem + gekennzeichnet) und verbesserungswürdigen Punkte (mit einem – gekennzeichnet).

- + Die fachlichen Grundlagen sind detailliert und übersichtlich dargestellt. So gelingt auch in diesem Fachgebiet unerfahrenen Kolleginnen und Kollegen eine gute Vorbereitung.
- + Die Experimente sowie die Simulation sind sachlich sinnvoll und gleichermaßen gut

	stimme voll zu	stimme teilweise zu	stimme eher nicht zu	stimme nicht zu
Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ wurde verstanden.	31	9	1	0
Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ war interessant.	29	10	1	1
Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ hat zu neuen Erkenntnissen geführt.	24	13	3	1
Die Wahl der Experimente und Simulationen war angemessen und für mich ersichtlich.	40	1	0	0
Die Wahl der Aufgaben und Rechnungen war angemessen und für mich ersichtlich.	15	17	8	1
Ich möchte mehr zum Thema „Dunkle Materie“ erfahren.	36	4	1	0

Tabelle 5.6: Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik“ der Schülerinnen und Schüler.

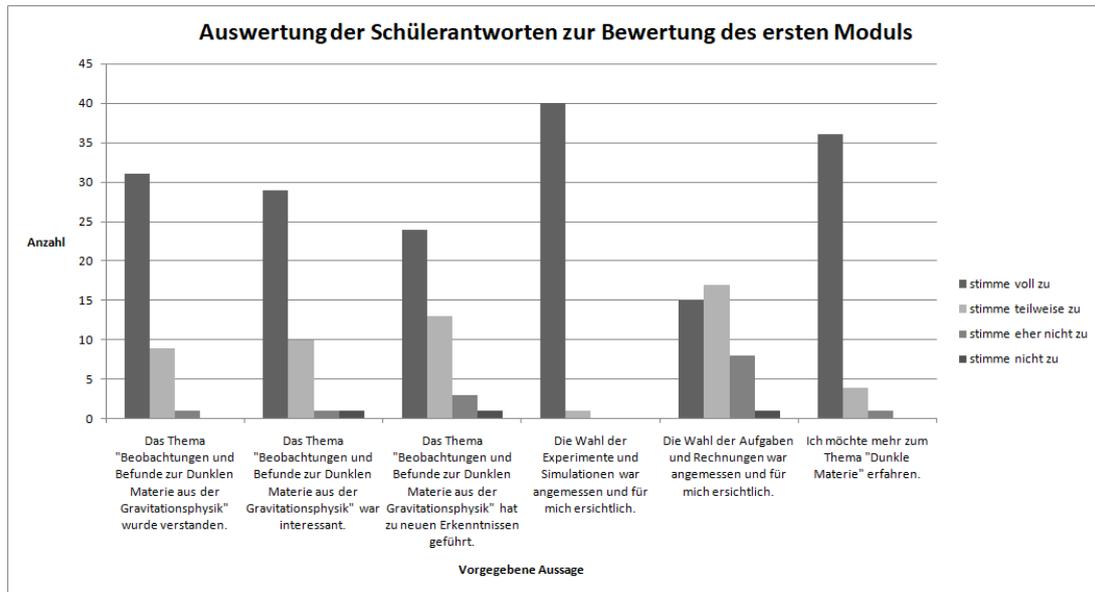


Abbildung 5.36: Graphische Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik“ der Schülerinnen und Schüler.

- im Unterricht einsetzbar, da keine spezielle Hardware oder Software notwendig ist, welche zunächst noch angeschafft werden müsste.
- + Der Bezug zwischen fachlichen Inhalten und den praktischen Einheiten ist für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar und steht auch in einem guten Verhältnis zueinander.
- + Durch die detaillierte Anleitung sind alle Experimente problemlos durchführbar.
- + Gerade bei den praktischen Experimenten benötigt man im Vorfeld keine langen Vorbereitungen.
- + Durch die Aufgaben wird direkt diverses Material zur Erweiterung und Differenzierung mitgeliefert.
- Gerade das erste Experiment zur Veranschaulichung der Messung einer Rotationskurve ist in der Ausrichtung recht schwierig, zumindest wenn man Daten aufneh-

men möchte, die später auszuwerten sind. Wenn nur das Phänomen der Dopplerverschiebung gezeigt werden soll, ist es einfacher.

- Gerade bei der Auswertung mit der entsprechenden Fehleranalyse muss bedacht werden, dass nicht alle Schülerinnen und Schüler die mathematischen Fertigkeiten mitbringen, um dies nachzuvollziehen. Dies gilt auch für die Rechenschritte in manchen Aufgaben. Nicht alle Aufgaben eignen sich uneingeschränkt für den Schulunterricht.

Insgesamt ziehen die beiden befragten Lehrkräfte ein positives Fazit und würden nach ihrer Einschätzung mit den zur Verfügung stehenden Materialien das Modul 1 unterrichten können. Gerade dieser Aspekt war dem Verfasser dieser Arbeit nach den in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Bedenken von Lehrkräften bezüglich fehlendem Material und mangelnder Unterstützung in Form von vorgefertigten Unterrichtshilfen wichtig. Die entsprechende Umsetzung scheint zumindest bei den hier befragten Kollegen positiv aufgenommen worden zu sein. Dass nicht alle im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Aufgaben uneingeschränkt im Unterricht einsetzbar sind, liegt an den unterschiedlichen Kenntnisständen der Schülerinnen und Schüler, gerade was mathematische Fertigkeiten angeht. Dennoch hat die unterrichtende Lehrkraft durch die hier vorgestellten Aufgaben ein gewisses Repertoire an möglichen Vertiefungsaufgaben zur Hand, sodass auch besonders starke Schülerinnen und Schüler entsprechend gefördert werden können.

5.5 Fazit

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass im Rahmen dieses ersten Moduls die Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik anhand der Rotationskurven zu Spiralgalaxien sowie des Gravitationslinseneffektes elementarisiert wurden und durch geeignete Analogieexperimente und Simulationen eine Möglichkeit geschaffen wurde, diese Thematik im Schulunterricht zu behandeln. Durch Aufgaben und weitere vertiefende Fragestellungen stehen außerdem differenzierende und vertiefende Materialien bereit. Die Aufteilung des Moduls in fachliche Grundlagen, historische Entwicklung sowie die dann folgende Übertragung auf den Schulunterricht mit den entsprechenden Ausführungen zu den entwickelten Experimenten und Simulationen und den abschließenden Materialien in Form von Aufgaben und Klausurfragen, ist gerade für die unterrichtenden Lehrkräfte eine sinnvolle Strukturierung, um sich in die für sie meist neue Thematik einzuarbeiten und diese für den unterrichtlichen Einsatz vorzubereiten. Die Erprobung im realen Schulunterricht zeigte, dass der Einsatz der entsprechenden Experimente mit etwas Übung problemlos funktioniert. Durch die beschriebenen Analyseschritte und zusätzlich programmierte Auswertungssoftware stehen auch mehrere Möglichkeiten bereit, um die experimentellen Daten auszuwerten. Bei den zur Verfügung gestellten Materialien zeigten sich speziell bei den mathematisch anspruchsvollen Aufgaben Probleme bei der Bearbeitung. Dies ist nach Einschätzung des Autors jedoch ein flächendeckendes Phänomen in der heutigen Schülerschaft, da die Lehrpläne auch im Fach Mathematik an vielen Stellen gekürzt und vereinfacht wurden, sodass einige mathematische Kompetenzen nicht mehr angebahnt werden. Der sich daraus ergebende Effekt sind klare Defizite bei etwas komplexeren Rechnungen und Herleitungen. Die fehlende Übung in diesen Bereichen führt zu eher schwachen Ergebnissen der im Rahmen dieser Arbeit befragten Schülerinnen und Schüler bei eben diesen Aufgaben. Dennoch zeigte sich, dass vereinzelt solche Aufgaben auch vollständig korrekt gelöst werden konnten. Ziel sollte es in jedem Fall sein, gerade diese Schülerinnen und Schüler auch entsprechend ihren Fähigkeiten fördern und fordern zu können. Das mit diesem Modul mitgelieferte Material eröffnet hier verschiedene Mög-

lichkeiten der individuellen Förderung.

Die Erprobung zeigte außerdem, dass aus Sicht der Schülerinnen und Schüler die Thematik verstanden wurde und ihnen neue Erkenntnisse brachte. Gerade für das Verständnis sind mit Sicherheit auch die entsprechenden praktischen Elemente in Form von Experimenten und Simulationen verantwortlich. Es zeigte sich weiterhin ein nach wie vor starkes Interesse der Schülerinnen und Schüler an der Thematik der Dunklen Materie. Die folgenden Lernmodule zielen darauf ab, die Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik um die entsprechenden aus der Kosmologie zu ergänzen.

KAPITEL 6

Modul 2: Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie

In diesem Modul sollen die Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik um solche erweitert werden, welche die Kosmologie zur Begründung der Existenz Dunkler Materie beisteuern kann. Hierbei sollen zwei konkrete Inhalte thematisiert werden:

- Entwicklungen im frühen Universum (speziell zur Nukleosynthese und Elemententstehung),
- Erkenntnisse aus der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Dabei werden zunächst wie gehabt die fachlichen und historisch relevanten Grundlagen dargestellt, bevor dann auf die notwendigen Elementarisierungen für die Übertragung auf den Schulunterricht eingegangen wird. Im Rahmen dieses Moduls ist es Schülerinnen und Schülern möglich, eine Simulation durchzuführen und die sich daraus ergebenden graphischen Darstellungen zu analysieren. Des Weiteren wird ein anschauliches Analogieexperiment zur Entkopplung von Strahlung und Materie im frühen Universum vorgestellt.

6.1 Lernziel dieses Moduls

Das Ziel dieses Moduls soll sein, fachlich fundiert eine Vorstellung davon zu vermitteln, wie durch Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie die Existenz Dunkler Materie nahegelegt werden kann. Das Modul dient gewissermaßen als Ergänzung zu den bereits thematisierten Beobachtungen und Befunden aus der Gravitationsphysik. Durch eine

Simulation gelingt das Anbahnen eines Verständnisses für das Abschätzen der Menge an Dunkler Materie in unserem Universum. Die wesentlichen Lernziele sind die folgenden:

- Die Lernenden sind in der Lage, die Begründung für die Existenz nicht-baryonischer dunkler Materie nachzuvollziehen, indem sie die relativen Anteile baryonischer und nicht-baryonischer Materie im Vergleich zur Gesamtmaterie durch Simulationen abschätzen.
- Die Lernenden können die Entstehung der leichten Elemente und die sich daraus ergebenden Anteile an der Gesamtmaterie nachvollziehen und in ihrer Bedeutung erfassen, indem sie die grundlegenden Prozesse der Nukleosynthese und die daraus folgenden Massenabschätzungen verstehen.
- Die Lernenden können die Bedeutung einzelner Parameter am Standard-Urknall-Modell erkennen, indem sie auf die Auswirkungen dieser Parameter für die Entwicklung der Nukleosynthese und des Universums eingehen.
- Die Lernenden sind in der Lage, den physikalischen Vorgang der Entkopplung von Strahlung und Materie nachzuvollziehen, indem sie ein im Rahmen dieser Arbeit vorgestelltes anschauliches Experiment durchführen und die Analogien beschreiben.
- Die Lernenden werden in die Lage versetzt, die Existenz primordialer Dunkler Materie zu begründen, indem sie auf Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung eingehen.
- Die Lernenden können das neu Gelernte üben und vertiefen, indem sie Aufgaben lösen.

6.2 Entwicklungen im frühen Universum

6.2.1 Fachliche Grundlagen

Die Entwicklungen im frühen Universum sind zum großen Teil Gegenstand aktueller Forschung. Spätestens seit der Entdeckung der Expansion des Universums herrscht Einigkeit darüber, dass das beobachtbare Universum in der Vergangenheit immer kleiner gewesen sein muss. Simuliert man die Entwicklung des Universums, so führt dies zu der Vorstellung, dass das Universum aus einer Singularität mit unendlich hoher Materie- und Energiedichte heraus entstanden ist. Diese Singularität ist demnach der Ursprung von Raum, Zeit und Materie. Theorien können die Entwicklung des Universums nach Verstreichen der PLANCK-Zeit ($\simeq 5 \cdot 10^{-43}$ s) beschreiben. Den heutigen Vorstellungen nach waren die vier bekannten Wechselwirkungen zunächst gekoppelt. Nach und nach entkoppelten diese, während das Universum sich ausdehnte. Die ersten Teilchen, die entstanden, waren Quarks, Leptonen und Photonen. Immer noch innerhalb der ersten Sekunde des aus der Singularität hervorgegangenen Universums bildeten sich Protonen und Neutronen sowie deren Antiteilchen durch entsprechenden Zusammenschluss von up- und down-Quarks und deren Antiteilchen. Erst als diese vorhanden waren, konnten sich durch sie die Atomkerne der leichten Elemente bilden. Dieser Prozess, als Nukleosynthese bezeichnet, ist somit ein zentraler Vorgang, um die Entstehung der Elemente in unserem Universum zu erklären und die Entwicklung des Kosmos zu verstehen. Während all dieser Prozesse expandierte das Universum immer weiter, infolge dessen die Materiedichte und Temperatur stetig sanken. Am Ende der Nukleosynthese war das Universum erst wenige Minuten alt. Die ersten vollständigen Atome bildeten sich viel später zu einem Zeitpunkt, an dem Photonen nicht mehr mit den freien Elektronen wechselwirkten, sodass die Strahlung entkoppeln konnte. Abbildung 6.1 zeigt grob die einzelnen Entwicklungsstufen des Universums bis zu diesem Zeitpunkt.

Entwicklungs- stufe	Zeitspanne	Vorgang
PLANCK-Ära	$t < 10^{-43}$ s	Die vier Wechselwirkungen sind gekoppelt und lassen sich nicht unterscheiden.
GUT-Ära	bis $t = 10^{-35}$ s	Die Gravitation entkoppelt, wohingegen die drei weiteren Wechselwirkungskräfte gekoppelt bleiben (daher Grand Unification - GU).
Inflationäre Phase	bis $t = 10^{-32}$ s	Das Universum expandiert. Starke und elektroschwache Wechselwirkung entkoppeln.
Quark-Ära	bis $t = 10^{-12}$ s	Quarks, Leptonen und Photonen bilden das Quark-Gluon-Plasma.
Hadronen-Ära	bis $t = 10^{-4}$ s	Es werden Protonen und Neutronen sowie ihre Antiteilchen gebildet (Baryogenese).
Leptonen-Ära	bis $t = 1$ s	Elektronen und Positronen zerstrahlen. Myonen sind noch instabil und zerfallen.
Nukleosynthese	bis $t \approx$ wenige min	Die Kerne der leichten Elemente (Wasserstoff, Helium, Deuterium und Lithium) bilden sich durch Fusion von Protonen und Neutronen. Elektronen bleiben frei. Photonen wechselwirken weiterhin mit Atomkernen und Elektronen.
Entkopplung	ab $t \approx 3 \cdot 10^5$ a	Aus Atomkernen und Elektronen bilden sich Atome. Photonen hören auf zu wechselwirken (Entkopplung) und bilden die kosmische Hintergrundstrahlung.

Tabelle 6.1: Entwicklung des frühen Universums bis zur Nukleosynthese. Die Tabelle ist angelehnt an [90] und [45], wobei die Zahlenwerte gemittelte Näherungswerte darstellen. Während diesen Vorgängen expandiert das Universum und kühlt sich dabei stetig ab. Zur PLANCK-Zeit beträgt die Temperatur etwa $T = 10^{32}$ K. Zu Beginn der Nukleosynthese hat sich das Universum auf etwa $T = 10^{10}$ K abgekühlt und zum Zeitpunkt der Entkopplung beträgt die Temperatur nur noch etwa $T = 3000$ K.

6.2.1.1 Vorgänge während der primordialen Nukleosynthese

Analysiert man die Vorgänge während der primordialen Nukleosynthese, so müssen die Entwicklungen des expandierenden und in Folge dessen sich adiabatisch abkühlenden Universums zu dieser Zeit immer in Abhängigkeit von der jeweils vorherrschenden Temperatur betrachtet werden.

Vor Beginn der Nukleosynthese bildeten sich die Nukleonen, also Protonen und Neutronen, bei Temperaturen von weit über 10^{11} K (siehe Tabelle 6.1, Hadronen-Ära). Protonen und Neutronen wandelten sich ineinander um, wobei die Anzahl von Protonen und Neutronen zunächst in etwa gleich blieb. Man spricht hier vom thermischen Gleichgewicht. Die Kernumwandlungen geschahen nach den Reaktionsgleichungen



Da die Ruhemasse eines Neutrons größer ist als die eines Protons, trat die erste Reaktion zur Erzeugung eines Neutrons nur bei hohen Energien der Protonen ein. Die beiden anderen Reaktionen konnten, da das Proton hier ein Elektron bindet, auch bei niedrigeren Protonenenergien stattfinden. Allerdings muss auch hier die Summe der kinetischen Energien von Proton und Elektron größer sein als die Ruheenergie des Neutrons. Als die Summe der kinetischen Energien unter diesen Wert sank, wurden keine Neutronen mehr erzeugt, wohingegen die umgekehrten Reaktionen zunächst noch weiter laufen konnten. Bestimmt man die Differenz aus Neutronen-Ruhemasse und der Summe von Protonen- und Elektronen-Ruhemasse und rechnet diesen Energiewert über die BOLTZMANN-Konstante in eine Temperatur um, so ergibt sich:

$$T = \frac{(m_n - m_p - m_e) \cdot c^2}{k_B} \simeq \frac{782 \frac{\text{keV}}{c^2}}{k_B} \simeq 9,08 \cdot 10^9 \text{ K} \approx 10^{10} \text{ K} . \quad (6.4)$$

Dies ist also die Temperatur des Universums, bei der die Erzeugung von Neutronen gerade noch möglich war. Als die Temperatur unter 10^{10} K sank, konnte eine Erzeugung von Neutronen gemäß der Reaktionsgleichungen 6.1 bis 6.3 nicht mehr stattfinden. In Folge dessen nahm das Verhältnis von Neutronen zu Protonen, welches zu Beginn (thermisches Gleichgewicht) in etwa 1 war, nun kleinere Werte an, wie die folgende Abschätzung über die Teilchenzahldichte der Nukleonen zeigt.

Die Teilchenzahldichten n unterliegen der MAXWELL-BOLTZMANN-Verteilung. Es gilt:

$$n_p \propto (m_p)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_p c^2}{k_B T}\right) \quad , \quad n_n \propto (m_n)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_n c^2}{k_B T}\right) \quad . \quad (6.5)$$

Das Verhältnis χ von Neutronen zu Protonen lässt sich bestimmen zu

$$\chi = \frac{n_n}{n_p} = \left(\frac{m_n}{m_p}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{np}}{k_B T}\right) \quad . \quad (6.6)$$

Dabei ist mit E_{np} die Differenz der Ruheenergien von Neutron und Proton gemeint: $E_{np} = (m_n - m_p) c^2 \simeq 1,293 \frac{\text{MeV}}{c^2}$. Setzt man nun alle Größen ein, so ergibt sich:

$$\chi(T = 10^{10} \text{ K}) = \left(\frac{939,565 \text{ MeV}}{938,272 \text{ MeV}}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{1,293}{0,782}\right) \simeq 0,19 \approx \frac{1}{5} \quad . \quad (6.7)$$

Dieses Nukleonenverhältnis sollte mit der Zeit weiter deutlich sinken, da die freien Neutronen gemäß der rückwärts gelesenen Reaktionsgleichung 6.3 bei einer Halbwertszeit von $t_h \simeq 610$ Sekunden [91] zerfallen konnten. Neben dem Zerfall der Neutronen war aber auch ein weiterer Prozess für das Erreichen dieses Wertes verantwortlich. Die Neutronen konnten nämlich durch Fusion mit Protonen Deuteriumkerne bilden (siehe Gleichung 6.9). Bei einer Temperatur von etwa $0,7 \cdot 10^9$ K war die Bindungsenergie der Deuteriumkerne hoch genug, dass sich die Kerne nicht wieder erneut spalteten und somit die Zahldichte dieser Kerne stetig zunahm. Die Temperatur von knapp unter 10^9 K war nun maßgeblich für die Zahl der in Atomkernen gebundenen und damit stabilen Neutronen. Das Universum war bei dieser Temperatur in etwa 340 Sekunden alt. Da diese Zeitspanne doch deutlich unter der Halbwertszeit der freien Neutronen liegt, konnten

die meisten Neutronen überleben und nur wenige wieder in Protonen zerfallen. Es ergab sich in jedem Fall ein neues Verhältnis von Neutronen zu Protonen, welches sich durch eine Korrektur auf Grundlage der Zerfallsgleichung zu

$$\chi = \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{t_h} \cdot \Delta t\right) \simeq \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{610 \text{ s}} \cdot 340 \text{ s}\right) \simeq 0,136 \approx \frac{1}{7,36} \quad (6.8)$$

abschätzen lässt. Erst als die Temperatur unter $0,9 \cdot 10^9 \text{ K}$ sank, konnten zwei dieser Deuteriumkerne wiederum miteinander oder mit einem Proton fusionieren, sodass nach und nach auch Tritium-, Helium-, Lithium- und Beryllium-Kerne entstanden. Hierbei waren insgesamt zwölf Reaktionen möglich, siehe hierzu Abbildung 6.1.

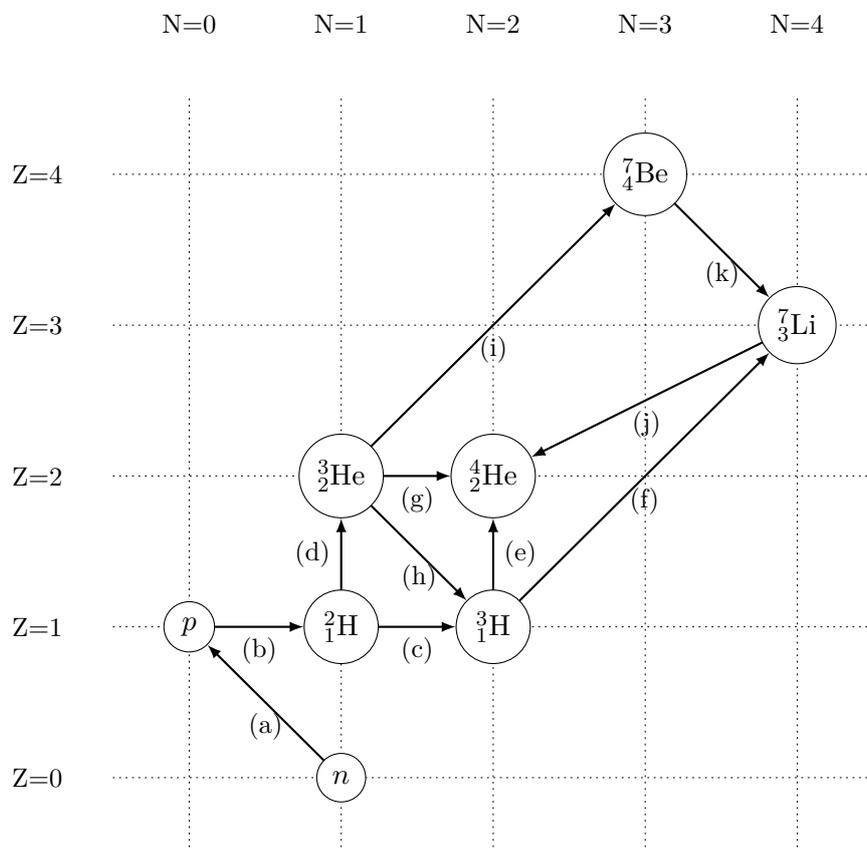
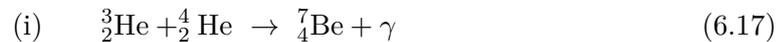
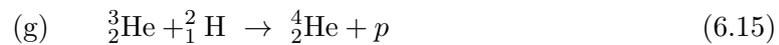
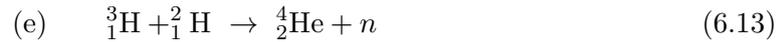
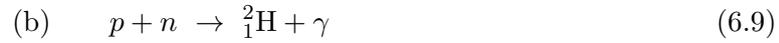


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der möglichen Kernreaktionen während der Nukleosynthese. Für die Reaktionsgleichung (a) siehe Phase 1. Die Reaktionsgleichungen ab (b) werden nachfolgend im Text aufgeführt.



Sowohl Tritium als auch das hier vorkommende Beryllium-Isotop sind instabil und werden über den β -Zerfall in leichtere Kerne übergehen. Elemente mit noch höheren Massenzahlen spielen statistisch keine große Rolle mehr, da die Temperatur des expandierenden Universums rasch abfiel und die COULOMB-Barrieren, welche zur Erzeugung der Kerne durchtunnelt werden müssen, mit steigender Massenzahl zunehmen. Diese COULOMB-Barrieren sind gegeben durch

$$E_C = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (6.20)$$

mit Z_1 und Z_2 als Kernladungszahlen der beiden Fusionspartner und R als Kernradius. Unter quantenmechanischen Bedingungen kann diese COULOMB-Barriere auch bei geringeren Energien als E_C überwunden werden. Schwerere Kerne weisen eben aufgrund der größeren Ladungsmenge höhere COULOMB-Potentiale auf. Die Situation beim Tunneleffekt ist graphisch in Abbildung 6.2 dargestellt. Da jedoch einerseits durch die sinkende

Temperatur des Universums die Energiedichte im Universum abnahm und gleichermaßen für schwerere Kerne die notwendige Energie zur Erzeugung zunahm, wurde die Bildung der schwereren Kerne mit zunehmender Kernladungszahl immer unwahrscheinlicher.

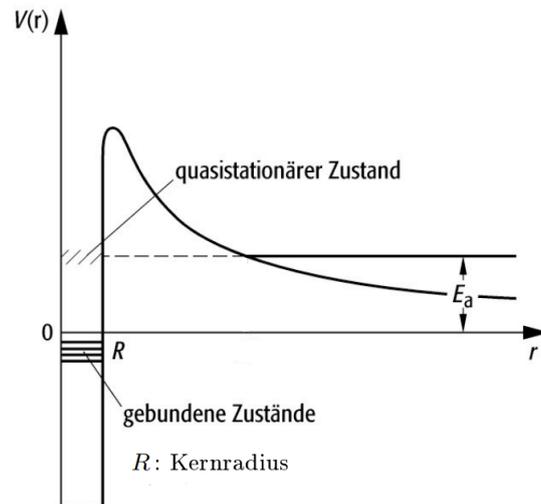


Abbildung 6.2: Graphische Darstellung der Situation beim Tunneleffekt mit Auftragung des Potentials gegen den Radius. Die hier eingetragene Anfangsenergie E_a würde normalerweise nicht ausreichen, um die COULOMB-Barriere zu überwinden. Durch den Tunneleffekt gelingt es jedoch dennoch, die Barriere zu durchdringen. Die Abbildung ist in gängigen Lehrwerken zur Quantenmechanik häufig zu finden, hier entnommen aus [92].

Weiterhin muss gerade bei Kernen mit zunehmender Massenzahl das Phänomen der Resonanz immer stärker mit bedacht werden, welches dann auftreten kann, wenn die im Kern befindlichen Protonen gegen die Neutronen schwingen. Wenn die Energie dieses Schwingungszustandes die Bindungsenergie im Kern übersteigt, werden somit keine stabilen Kerne entstehen. Da die Resonanzbreite empfindlich von der Massenzahl des Kerns abhängt, wird dies vor allem die Entstehung Kerne mit höherer Massenzahl verhindern. Insgesamt werden dadurch Reaktionen, an deren Ende schwerere Kerne als Lithium entstehen, sehr unwahrscheinlich und daher im Folgenden nicht mit berücksichtigt (siehe hierzu Kapitel 6.2.1.2). Die Tatsache, dass es keine stabilen Kerne mit den Massenzahlen 5 oder 8 gibt und dass das ${}^4_2\text{He}$ die höchste Bindungsenergie pro Nukleon unter den leichten Kernen aufweist, erklärt, dass am Ende der hier ablaufenden Kernreaktionen

hauptsächlich ${}^4_2\text{He}$ entstehen wird. Abschätzungen hierzu folgen im nächsten Kapitel.

6.2.1.2 Abschätzungen zu Elementhäufigkeiten

Die Häufigkeiten der leichten Elemente lassen sich nach den Vorgängen in der Phase der Nukleosynthese theoretisch berechnen und mit den heute messbaren Häufigkeiten vergleichen. Geht man mit Bezug auf die im vorherigen Kapitel bereits genannten Gründe davon aus, dass ${}^4_2\text{He}$ das mit Abstand am häufigsten aus den möglichen Kernreaktionen hervorgehende Element war, lässt sich die Annahme treffen, dass das Universum am Ende der Nukleosynthese hauptsächlich aus Wasserstoff- und Helium-Kernen bestand. Die Gesamtzahl der Nukleonen ist die Summe aus Protonen und Neutronen, also $n_p + n_n$. Zum Teil fusionierten sie zu Deuterium-Kernen und reagierten dann weiter nach den beschriebenen Prinzipien. Setzt man nun die Zahl der übrig bleibenden Protonen ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Nukleonen, ergibt sich daraus die relative Häufigkeit χ_{H} der Wasserstoff-Kerne zu

$$\chi_{\text{H}} = \frac{n_p - n_n}{n_p + n_n} . \quad (6.21)$$

Mit der Annahme, dass Wasserstoff- und Helium-Kerne nahezu die gesamte Dichte an baryonischer Materie ausmachten, folgt, dass die Summe der relativen Häufigkeiten dieser beiden Kerne ungefähr 1 ergeben muss. Für χ_{He} folgt dann:

$$\chi_{\text{He}} \simeq 1 - \chi_{\text{H}} = 1 - \frac{n_p - n_n}{n_p + n_n} = \frac{2n_n}{n_p + n_n} = \frac{2 \cdot \frac{n_n}{n_p}}{1 + \frac{n_n}{n_p}} . \quad (6.22)$$

Durch Einsetzen des bereits abgeschätzten Wertes für den Quotienten $\frac{n_n}{n_p}$ (vergleiche Gleichung 6.8), ergibt sich für die relative Häufigkeit von Helium:

$$\chi_{\text{He}} \simeq \frac{2 \cdot \frac{1}{7,36}}{1 + \frac{1}{7,36}} \simeq 0,239 \approx 24\% . \quad (6.23)$$

Dies bedeutet, dass Helium-Kerne etwa 24% der baryonischen Masse des Universums nach dem Ende der Nukleosynthese ausmachten und Wasserstoff-Kerne etwa 76%. Die anderen Kerne wurden in dieser Abschätzung vorerst nicht berücksichtigt. Eine korrekte und ausführlichere analytische Berechnung dieses Wertes führt zu dem Ergebnis $\chi_{\text{He}} = 0,2482$ [93, S. 51], womit die obige Abschätzung als erstaunlich genau gelten darf. Numerische Methoden wie Monte-Carlo-Simulationen ergeben ebenfalls eine klare Übereinstimmung mit diesen Werten. Exemplarisch sei hier auf [94], nach deren Berechnungen $\chi_{\text{He}} \simeq (0,2477 \pm 0,029)$ gilt oder auch auf [95] verwiesen, wonach $\chi_{\text{He}} \simeq (0,250 \pm 0,004)$ gilt.

Da die bei der Nukleosynthese entstandenen Tritium- und Beryllium-Kerne instabil sind, bleiben noch die Häufigkeiten von ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$ und ${}^7_3\text{Li}$ zu bestimmen. Auf eine rechnerische Abschätzung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Ergebnisse bereits durchgeführter Simulationen verwiesen. Der grobe Verlauf der Häufigkeiten der einzelnen Kerne ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

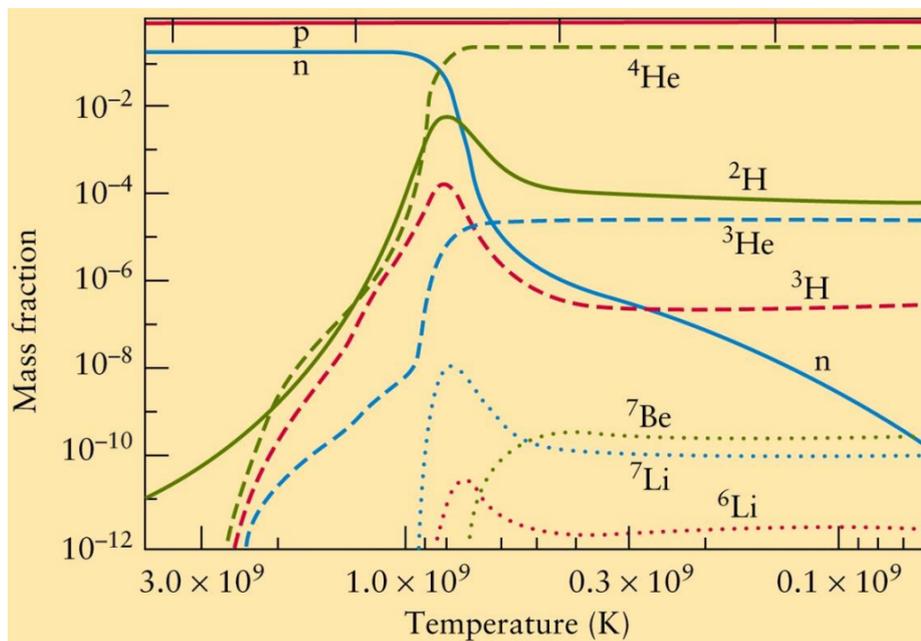


Abbildung 6.3: Entwicklung der Massenverteilung einzelner Kerne in der Frühphase des Universums in Abhängigkeit von der Temperatur. [96]

Man erkennt, dass die Häufigkeit der Kerne mit abfallender Temperatur, also mit zunehmender Zeit, konstante Werte annahm. Dies änderte sich erst mit der Entstehung der Sterne Hunderte Millionen Jahre später, in denen weitere Kerne fusionierten. Trotz geringerer Reaktionsraten in Sternen im Vergleich zum Frühstadium des Universums steht für die Fusion schwererer Kerne deutlich mehr Zeit zur Verfügung, sodass etwa der 3α -Prozess zur Bildung von Kohlenstoff in der stellaren Kernfusion möglich ist. Diese stellaren Kernfusionen führten auch dazu, dass die heutige Verteilung der Elemente nicht der Häufigkeitsverteilung am Ende der Nukleosynthese entspricht. Durch Beobachtungen von Objekten, in welchen die vorherrschende Massenverteilung der Elemente der ursprünglichen Verteilung recht nahe kommt oder aber durch die auf diese geschlossen werden kann, lassen sich Vergleiche von Beobachtungsdaten mit den Messwerten ziehen.

6.2.1.3 Vergleich mit Beobachtungsdaten und Konsequenzen für den Anteil Dunkler Materie im Universum

Durch Beobachtungen der heute vorkommenden Elementhäufigkeiten lassen sich die Werte für die primordialen Elementhäufigkeiten zumindest eingrenzen. Dabei müssen Verschiebungen der Häufigkeitswerte durch stellare Kernfusionen und andere Prozesse bedacht und in der Statistik berücksichtigt werden. Man versucht in der Regel, Beobachtungen bei Objekten geringer Metallizität vorzunehmen, also bei Objekten, in welchen nur geringe Anteile von Elementen, die schwerer als Helium sind, vorkommen. Dadurch wird die beobachtete und gemessene Verteilung einigermaßen vergleichbar zu der theoretisch vorhergesagten nach der primordialen Nukleosynthese.

Die Häufigkeiten der von ${}^3_2\text{He}$ abweichenden Elemente werden in der Regel nicht in Abhängigkeit von der Gesamtbaryonenmasse, sondern in Abhängigkeit von der Anzahl der Wasserstoffkerne angegeben. Die aus Beobachtungen ermittelten Werte sehen dabei wie folgt aus [93]:

$$\left[\begin{array}{c} {}^2_1\text{H} \\ {}^1_1\text{H} \end{array} \right] \simeq 2,7 \cdot 10^{-5} \quad , \quad \left[\begin{array}{c} {}^3_2\text{He} \\ {}^1_1\text{H} \end{array} \right] \simeq 1,1 \cdot 10^{-5} \quad , \quad \left[\begin{array}{c} {}^7_3\text{Li} \\ {}^1_1\text{H} \end{array} \right] \simeq 1,3 \cdot 10^{-10} \quad . \quad (6.24)$$

Der Vergleich von theoretischen Berechnungen und Beobachtungen kann üblicherweise in Abhängigkeit von der relativen Baryonendichte $\Omega_B h^2$ erfolgen. Dabei gilt für den normierten HUBBLE-Parameter h folgender Zusammenhang

$$H_0 = h \cdot 100 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \quad . \quad (6.25)$$

H_0 stellt hierbei die HUBBLE-Konstante dar. Diese gibt an, wie stark das Universum expandiert und kann über die Entfernung und die Geschwindigkeit von astronomischen Objekten, mit welcher diese sich von uns weg bewegen, gemessen werden. Wichtig ist es, an dieser Stelle anzumerken, welches kosmologische Modell den in diesem Modul folgenden Berechnungen und Simulationen zugrunde liegt. Es wird das Λ CDM-Modell genutzt, welches von einem flachen Universum ausgeht. Dies stimmt mit aktuellen Mes-

sungen überein und ist daher das Standardmodell der Kosmologie. Die Gesamtdichte des Universums ergibt sich dabei als Summe der Materiedichte und der Dichte der Dunklen Energie. Dies wird später noch mit einer graphischen Darstellung veranschaulicht. Die kosmologischen Hintergründe sollen hier nicht weiter ausgeführt werden, um sich im Folgenden auf den Anteil der Dunklen Materie zu konzentrieren. Es ist zuvor jedoch noch wichtig, zu erläutern, wozu relative Dichten, wie die hier erwähnte relative Baryondichte $\Omega_B h^2$, in Beziehung stehen, da im Folgenden noch von weiteren Dichten die Rede sein wird und die theoretischen Grundlagen hierzu noch nicht behandelt wurden.

Geht man davon aus, dass das beobachtbare Universum ein kugelförmiger Ausschnitt des gesamten Universums ist, so befindet sich der Beobachter im Mittelpunkt dieser Kugel mit Radius r . Man nimmt weiterhin an, dass diese Kugel homogen mit einer mittleren Dichte ρ mit Galaxien gefüllt ist. Diese Galaxien bewegen sich nun mit einer Geschwindigkeit v vom Beobachter weg. Die Fluchtgeschwindigkeit ist dabei proportional zum Kugelradius r . Die Proportionalitätskonstante ist die HUBBLE-Konstante H_0 . Es gilt

$$v(r) = H_0 \cdot r \quad . \quad (6.26)$$

Schaut man sich nun die Gesamtenergie innerhalb der Kugelschale an, so lässt sich diese als Summe der kinetischen und potentiellen Energien ausdrücken und muss nach dem Energieerhaltungssatz konstant sein. Mit der Masse $M(r)$ innerhalb der Kugelschale, die sich über die mittlere Dichte zu $M(r) = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ bestimmen lässt, kann die Gesamtenergie E folgendermaßen berechnet werden:

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2}m(v(r))^2 - G \cdot \frac{mM(r)}{r} \quad (6.27)$$

$$= \frac{1}{2}mH_0^2 r^2 - G \cdot \frac{m}{r} \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \rho = \frac{mr^2}{2} \cdot \left(H_0 - \frac{8\pi G\rho}{3} \right) = \text{const.} \quad . \quad (6.28)$$

Durch das Minus-Zeichen innerhalb der Klammer kann die Energie nach diesen mathematischen Überlegungen größer, kleiner oder auch gleich Null sein. Ist sie größer Null, überwiegt der Anteil der kinetischen Energie und das Universum expandiert. Ist sie klei-

ner Null, überwiegt der Anteil der potentiellen Energie und das Universum zieht sich zusammen, wird also irgendwann kollabieren. Ist die Energie jedoch gleich Null, so sind die Anteile von kinetischer und potentieller Energie gleich groß und das Universum würde sich weder ausdehnen noch zusammenziehen. Dieser Fall tritt genau dann ein, wenn die Klammer in Gleichung 6.28 Null ist. Die zugehörige Dichte bezeichnet man als kritische Dichte ϱ_{cr} , für die

$$\varrho_{cr} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (6.29)$$

gilt. Es ist üblich, Dichten in Abhängigkeit von der kritischen Dichte anzugeben. Dadurch entsteht eine dimensionslose Größe, die als relative Dichte Ω bezeichnet wird. Es gilt also

$$\Omega = \frac{\varrho}{\varrho_{cr}} = \frac{8\pi G}{3h^2 \cdot \left(100 \frac{\text{km}}{\text{s}\cdot\text{Mpc}}\right)^2} \cdot \varrho \quad (6.30)$$

Da der HUBBLE-Faktor h , wie sich noch zeigen wird, im Vergleich zu den anderen Konstanten doch recht stark fehlerbehaftet ist, multipliziert man diesen aus dem Nenner des Bruchs, sodass auf der linken Seite der Gleichung Ωh^2 als immer noch dimensionslose relative Dichte stehen wird. Somit ergeben sich relative Dichten, wie die zuvor angesprochene relative Baryondichte, in der Form $\Omega_B h^2$.

Nach Auswertung von Messungen der Raumsonde WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [97] lässt sich der Wert für $\Omega_B h^2$ einschränken [vgl. z. B. 45, S. 70] auf das Intervall

$$0,016 \leq \Omega_B h^2 \leq 0,024 \quad (6.31)$$

Trägt man die sich aus theoretischen Rechnungen ergebenden Werte der Häufigkeiten graphisch gegen verschiedene Werte von $\Omega_B h^2$ auf, so ergeben sich die in Abbildung 6.4 dargestellten Kurven. Als vertikaler grauer Streifen ist dabei der aus den WMAP-Daten bestimmte Bereich für $\Omega_B h^2$ dargestellt. Die horizontale Linien kennzeichnen die gemittelten Beobachtungsdaten für die Häufigkeiten von ${}^4_2\text{He}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$ und ${}^7_3\text{Li}$.

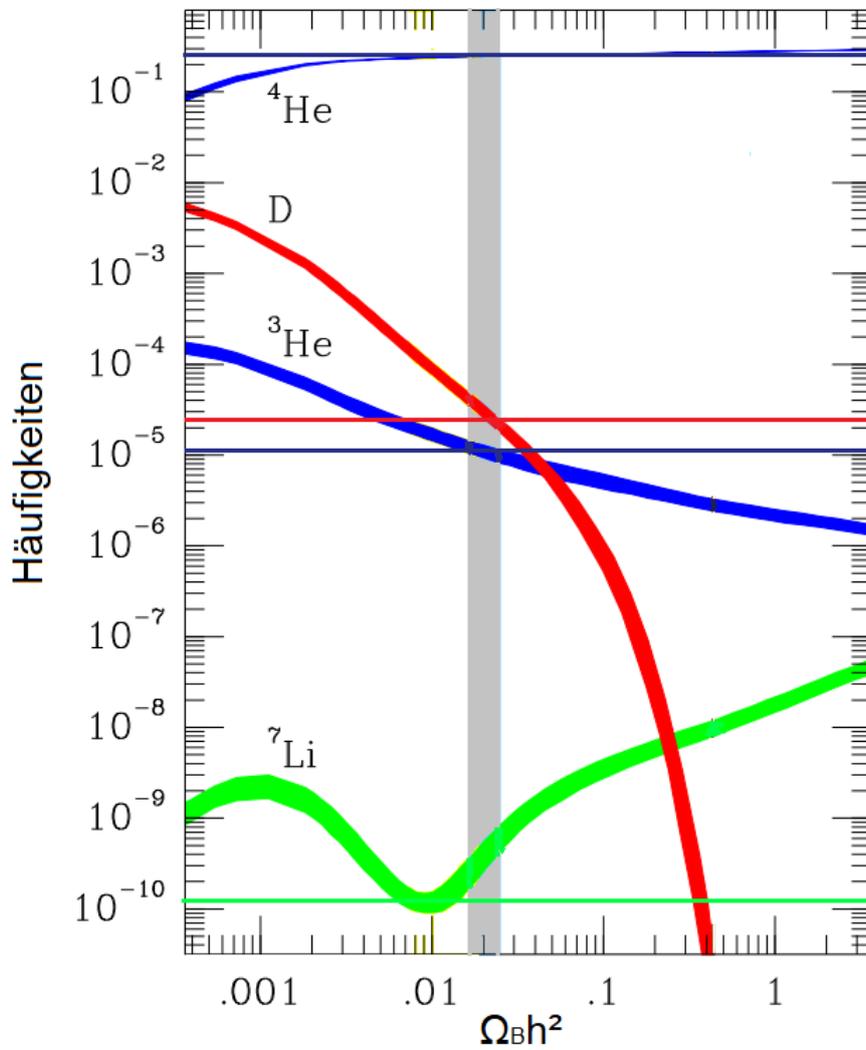


Abbildung 6.4: Graphische Darstellung der Häufigkeiten gegen die relative Baryonendichte $\Omega_B h^2$. Der vertikale graue Streifen markiert das durch Messungen vorgegebene Intervall für $\Omega_B h^2$. Die Kurven (entnommen aus [98]) entstehen durch theoretische Berechnungen, die horizontalen Linien markieren die mittleren Werte aus Beobachtungsdaten.

Man erkennt, dass bei den drei erstgenannten Kernen der Bereich, welcher durch das Intervall der relativen Baryondichte $\Omega_B h^2$ und der simulierten Häufigkeitskurve festgelegt wird, von den horizontalen Linien der beobachteten Häufigkeit geschnitten wird. Damit stimmen die theoretisch bestimmten Häufigkeiten bei der eingegrenzten relativen Baryondichte mit den gemessenen Häufigkeiten überein. Bei ${}^7_3\text{Li}$ kommt es allerdings zu kleinen Abweichungen. Da für die anderen hier dargestellten Kerne keine Diskrepanzen festgestellt werden können, liegt die Vermutung nahe, dass hier keine Fehler in den Berechnungen vorliegen, sondern, dass hier noch nicht alle physikalische Prozesse bei der Bildung von ${}^7_3\text{Li}$ während der gesamten Entwicklung des Universums, zum Beispiel während der stellaren Kernfusion, verstanden worden sind.

Geht man davon aus, dass der Wert für $\Omega_B h^2$ korrekt ist, lassen sich Abschätzungen zur Baryondichte Ω_B und zur gesamten Materiedichte Ω_M durchführen.

Die Messungen und Analysen, die der Ermittlung solcher Größen zugrunde liegen, sind hoch komplex und in den letzten Jahren immer wieder verfeinert und aktualisiert worden. Ein Blick in die aktuellen Veröffentlichungen zeigt, dass in den letzten zwei Jahrzehnten unzählige Artikel mit aktualisierten Daten und neuen Fehlerabschätzungen publiziert wurden. Die Diskrepanzen der angegebenen Werte sind dabei nie besonders groß, aber auch nicht immer mit den jeweiligen Konfidenzintervallen der anderen Angaben vereinbar. Dies liegt an den Analysen und Fitparametern, die den einzelnen Berechnungen zugrunde liegen. Durch Berücksichtigen aller statistisch relevanten Parameter ändern sich die Bereiche und Fehlerintervalle der Ergebnisse. Es fällt daher schwer, konkrete Werte für die Baryondichte oder die Gesamtmateriedichte anzugeben, da eine Unzahl an Beobachtungsdaten und Analysemöglichkeiten vorliegt. Exemplarisch sollen hier zwei große Projekte zur Bestimmung der wichtigsten kosmologischen Größen vorgestellt und deren Daten angegeben werden. Dabei handelt es sich zum einen um Analysen von Messungen mit der Raumsonde WMAP, die für die NASA zwischen 2001 und 2010 Daten aufgenommen hat [97]. Ergänzt werden diese Daten um Messungen des SDSS-Projekts [99]. Zum anderen werden die Analysen von Messungen mit dem PLANCK-Weltraumteleskop [100] vorgestellt. Es handelt sich hier um den europäischen Nachfolger der WMAP-Raumsonde

[101], welche für die ESA von 2009 bis 2013 Daten aufgenommen hat. Da es sich jedoch hier nur um eine exemplarische Auswahl von zwei Projekten handelt, werden für die im Rahmen dieses Kapitels entwickelte Simulation zusätzlich Intervalle angegeben, in denen sich laut gängiger Fachliteratur der mit Abstand größte Teil der aktuellen Messungen bewegt. Tabelle 6.2 zeigt die jeweiligen Daten.

Größe	WMAP + SDSS	PLANCK	Intervallgrenzen
HUBBLE-Parameter			
H_0 in $\frac{\text{km}}{\text{s}\cdot\text{Mpc}}$	$68_{-2,4}^{+2,2}$	$67,8 \pm 0,9$	[68; 74] [102]
h	$0,680_{-0,024}^{+0,022}$	$0,678 \pm 0,009$	[0,68; 0,74]
Gesamtmateriedichte			
$\Omega_M h^2$	$0,1459_{-0,0073}^{+0,0084}$	$0,142 \pm 0,006$	
Ω_M	$0,315_{-0,032}^{+0,041}$	$0,308 \pm 0,012$	$\geq 0,2$, $\simeq 0,3$ [45]
Baryondichte			
$\Omega_B h^2$	$0,0226_{-0,0006}^{+0,0006}$	$0,0223 \pm 0,0002$	[0,016; 0,024] [45]
Ω_B	$0,0489_{-0,0021}^{+0,0020}$	$0,0485 \pm 0,0008$	[0,0292; 0,0519]
Neutrindichte Ω_ν		$< 0,016$	[0,0012; 0,016] [91]
Dichte der sichtbaren Materie Ω_{vis}			$\simeq 0,005$ [103]

Tabelle 6.2: Tabellarische Auflistung der für dieses Kapitel wichtigen kosmologischen Parameter. Die WMAP- und SDSS-Daten in der zweiten Spalte sind aus [99], die PLANCK-Daten aus [100] entnommen.

Aus diesen Daten lassen sich die folgenden Ergebnisse ableiten:

1. Materie trägt nur zu etwa 30% zur Gesamtdichte des Universums bei. Die restlichen 70% sind ein bislang unbekannter und noch nicht verstandener Anteil der Gesamtdichte. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Dunkler Energie, jedoch wäre es spekulativ, Aussagen über die Zusammensetzung und die Art dieses nicht-materiellen Anteils zur Dichte zu treffen. In jedem Fall erkennt man an der Größe Ω_M , dass wir bislang nur einen Bruchteil des Universums kennen und verstehen.

2. Selbst von der Materiedichte ist nur ein kleiner Teil auf baryonische Materie zurückzuführen. Der prozentuale Anteil der baryonischen Materie an der Gesamtdichte entspricht nach Messungen von WMAP und SDSS sowie von PLANCK knapp unter 5%. Der fehlende Anteil zur Gesamtmateriedichte ist nicht-baryonischer Art.
3. Der Anteil der tatsächlich sichtbaren Materie ist dann wiederum um gut das Zehnfache geringer als der Anteil der baryonischen Materie [103]. Der Rest muss dunkel sein und damit zur Dunklen Materie zählen.
4. Die Neutrinos bilden ebenfalls nur einen geringen Anteil an der Gesamtdichte des Universums. Nach Messungen von PLANCK liegt ihr Anteil bei deutlich unter 2%.

Diese Ergebnisse lassen nun Schlussfolgerungen für den Anteil Dunkler Materie im Universum zu. Dabei muss zwischen baryonischer und nicht-baryonischer Dunkler Materie unterschieden werden.

- Für uns sichtbare Materie ist in jedem Fall baryonischer Art. Demnach lässt sich durch die Differenz von Baryonendichte und der Dichte der sichtbaren Materie der Anteil baryonischer Dunkler Materie bestimmen.
- Durch die Differenz von Materiedichte und Baryonendichte ergibt sich der Anteil nicht-baryonischer Materie im Universum. Dieser kann für uns nicht sichtbar sein und bildet damit den Anteil nicht-baryonischer Dunkler Materie.

Konkrete Simulationen zur Berechnung dieser Anteile folgen in Kapitel 6.2.4. An dieser Stelle werden als Schaubild in Abbildung 6.5 noch einmal die oben genannten Abhängigkeiten der einzelnen Anteile verdeutlicht.

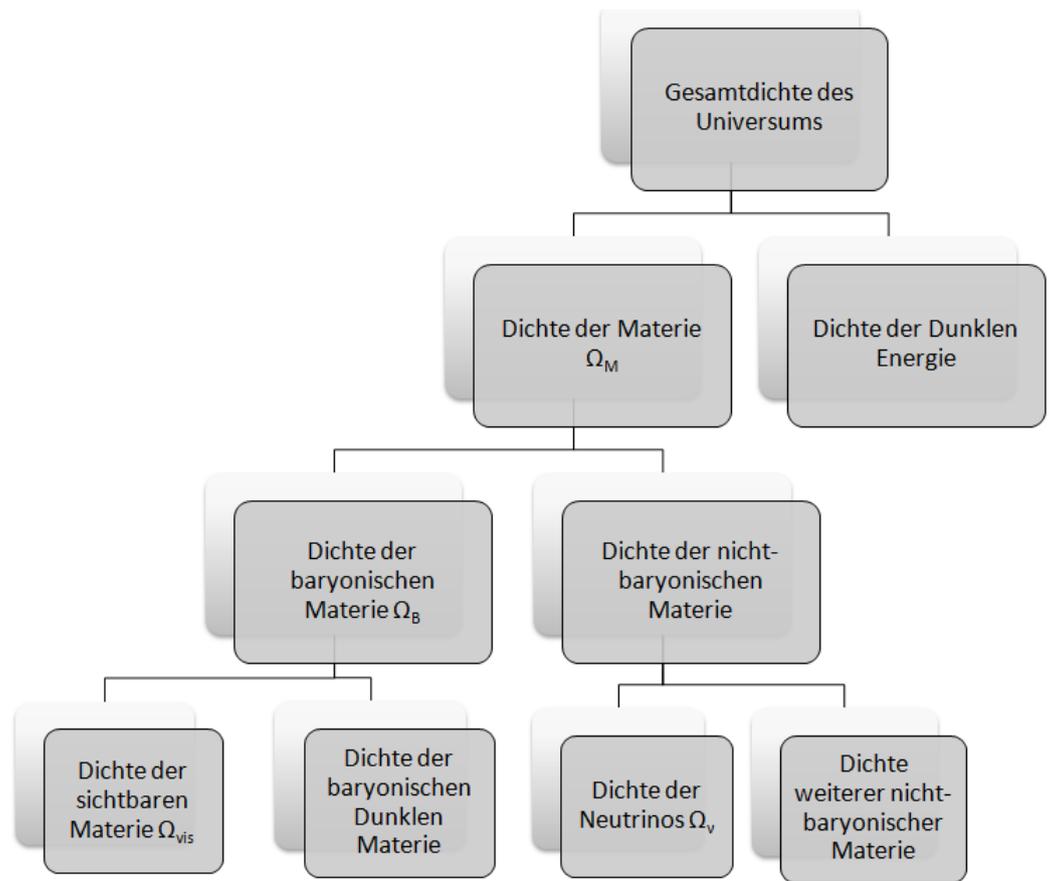


Abbildung 6.5: Strukturdiagramm zu den Abhängigkeiten der einzelnen Dichteanteile im Universum.

6.2.2 Historische Entwicklung

Die ersten Erkenntnisse zu konkreten Abläufen der Elemententstehung dokumentierten in den 1930er Jahren die beiden Physiker Hans Albrecht BETHE und Carl Friedrich VON WEIZSÄCKER. Sie erkannten, dass die schwereren Elemente entstanden sein müssen, bevor die Sterne ihre jetzige Temperatur und Dichte erreichten. Einer Publikation BETHES aus dem Jahr 1939 ist zu entnehmen:



Abbildung 6.6: Hans Albrecht BETHE. [104]

„The first main result is that, under present conditions, no elements heavier than helium can be built up to any appreciable extent. Therefore we must assume that the heavier elements were built up before the stars reached their present state of temperature and density.“ [105]

Eine wesentliche Grundlage dieser zeitgenössischen Erkenntnis war der bereits zuvor von BETHE und WEIZSÄCKER entwickelte CN-Zyklus, in welchem schrittweise durch die Fusion von vier Wasserstoffkernen mit schwereren Elementen ein Helium-Kern entsteht. Die Fusionsreaktionen beginnen bei dem Isotop ^{12}C und enden im Produkt der sechsten Reaktion mit ^4_2He . Da in den Reaktionen Kohlenstoff, Stickstoff und ein instabiles Isotop von Sauerstoff entstehen, wird der Zyklus als CN- bzw. CNO-Zyklus bezeichnet.





BETHE und WEIZSÄCKER waren also in der Lage, die Entstehung von Helium durch Fusion mit bereits existierenden schweren Kerne zu erklären, fanden jedoch keinen Weg, die Entstehung von Helium durch eine Fusion von Protonen und Neutronen untereinander zu erklären. Dieser heute als Proton-Proton-Zyklus bekannte Weg, um Helium zu erzeugen, wurde dann in den 40er Jahren nach und nach bekannt. Im Jahr 1942 kam dann von George Anthony GAMOW die Theorie auf, dass der Ursprung der Elemente in „ungewöhnlichen Zuständen“ des sehr frühen Universums zu finden sei [106]. Durch ihn wurde das erste Mal die Nukleosynthese als der Vorgang, bei welchem die leichten Elemente entstehen, beschrieben. Konkrete Ausführungen der einzelnen Prozesse zur Bildung der Elemente wurden dann von GAMOW und seinem Doktoranden Ralph ALPHER sowie BETHE im Jahr 1948 veröffentlicht.

„The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed protons must have led first to the formation of deuterium nuclei, and the subsequent neutron captures resulted in the building up of heavier and heavier nuclei.“ [107, S. 803]

Dieses Dokument stellt den Beginn der Theorie der primordialen Nukleosynthese dar. Die hier beschriebene Reaktion, nämlich die Fusion eines Protons mit einem Neutron, gemäß



ist der Ausgangspunkt der möglichen Kernreaktionen in der Nukleosynthese (vgl. hierzu Abbildung 6.1 und Gleichungen 6.9 bis 6.19). ALPHER führte 1949 zusammen mit Robert HERMAN weitere Berechnungen durch. Die beiden konnten zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Vorgänge der Nukleosynthese korrekt nachvollziehen. Sie nahmen in ihren Veröffentlichungen Bezug auf die bereits zuvor gewonnen, aber nicht publizierten,

Erkenntnisse von Enrico FERMI und Anthony TURKEVICH, welche vermuteten, dass schwerere Kerne als ${}^4_2\text{He}$ keine signifikanten Anteile an der Gesamtmaterie beisteuern dürften, da einerseits keine stabilen Kerne mit Massenzahl 5 oder 8 existieren und andererseits die zu überwindenden COULOMB-Barrieren für noch schwerere Elemente zu hoch seien. ALPHER und HERMAN schrieben hierzu:

„The major difficulty faced by this theory is the non-existence of nuclei at atomic weights 5 and 8, with the consequence that a formation chain through the lightest elements has not yet been constructed.“ [108]

Im Jahr 1953 gelang es ALPHER und HERMAN zusammen mit James FOLLIN dann, die Nukleosynthese und die sich daraus ergebenden großen Häufigkeiten von ${}^4_2\text{He}$ zu erklären [109]. Damit waren die grundlegenden Prozesse der Nukleosynthese zur Entstehung der leichten Kerne verstanden. Die Erklärung der Erzeugung der schwereren Kerne durch stellare Fusionsprozesse gemäß den heutigen Vorstellungen gelang dann im Jahr 1957 den vier Wissenschaftlern Margaret und Geoffrey BURBIDGE, William FOWLER und Fred HOYLE [110]. Diese heute nach den Autoren als B²FH-Publikation benannte Abhandlung stellte somit einen fundamentalen Durchbruch für das Verständnis der Kern- und Elemententstehung im Universum dar. In den 1960er Jahren konnten dann durch immer mehr Messungen und Beobachtungen starke Übereinstimmungen bezüglich der relativen Anteilen von Wasserstoff und Helium zwischen den theoretischen Vorhersagen und der Analyse von Beobachtungsdaten festgestellt werden [111]. Dies gilt nach wie vor als großer Erfolg der Theorie der primordialen Nukleosynthese. In den 1980er Jahren wurden dann immer genauere Werte für die primordialen Häufigkeiten der einzelnen Elemente vorhergesagt und durch Messungen bestätigt. Gleichmaßen konnten fortlaufend präzisere Werte für die Baryonendichte angegeben werden. Eine genaue chronologische Auflistung der einzelnen Veröffentlichungen zu den Berechnungen und Messungen der Elementhäufigkeiten sowie der Baryonen- und Materiedichte ist an dieser Stelle nicht zielführend. Immer genauere Berechnungen und Messungen schränken die jeweiligen Wertebereiche weiter ein, sodass wir heute von den in den fachlichen Grundlagen (Kapitel 6.2.1) angegebenen Größen ausgehen. Dass an dieser Stelle keine weiteren

Personen und deren Erfolge in der Erforschung der Prozesse während der Nukleosynthese erwähnt werden, soll also keineswegs die Bedeutung aktueller Veröffentlichungen schmälern, sondern vielmehr herausstellen, dass die Vorgänge in der primordialen Nukleosynthese als solche bereits bekannt und durch die hier erwähnten Wissenschaftler und ihre Arbeiten verstanden worden sind.

6.2.3 Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion

Bei der Übertragung auf den Schulunterricht sollen einerseits die Prozesse während der Nukleosynthese inklusive der Bedeutung verschiedener Größen (zum Beispiel der Halbwertszeit der Neutronen) für die Elementverteilung aufgezeigt werden und andererseits die Anteile der Materiearten im Universum graphisch dargestellt werden. Letzteres wurde mit Hilfe einer `Excel`-Simulation realisiert. Bei der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulation können die in Tabelle 6.2 angegebenen Parameter über Schieberegler innerhalb der Intervallgrenzen beliebig gewählt und damit die prozentualen Anteile einzelner Materiearten im Universum numerisch und graphisch dargestellt werden. Bei einer Veränderung der Parameter werden live auch die prozentualen Anteile errechnet. Damit gelingt es, den Schülerinnen und Schülern einen Eindruck dessen zu vermitteln, wie wenig vom Universum tatsächlich bekannt ist und dass die Dunkle Materie einen doch beträchtlichen Anteil des noch Unbekannten im Universum darstellt. Bei der Berechnung der Werte werden die Expansion des Universums und die sich daraus ergebenden Folgerungen vorausgesetzt.

Ziel dieser Simulation ist es, den Nutzerinnen und Nutzern zu verdeutlichen, wie viel die Dunkle Materie von der Dichte des Universums ausmacht und somit die Thematik der Dunklen Materie auf Grundlage dieser Abschätzung zu legitimieren.

6.2.4 Simulation zur Abschätzung des Anteils nicht-baryonischer Dunkler Materie an der Gesamtmaterie

Mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten `Excel`-Simulation kann der Anteil der baryonischen Materie von der Gesamtmaterie des Universums graphisch dargestellt werden. Dies geschieht nach der Wahl verschiedener Parameter, wobei sich die graphische Darstellung inklusive der numerischen Zahlenwerte für die jeweiligen Anteile live ändern. Die Parameter lassen sich über Schieberegler in bestimmten Intervallen, die sich nach Tabelle 6.2 richten, einstellen. Es sind dabei folgende Parameter zu wählen:

1. HUBBLE-Parameter H_0 :

Der HUBBLE-Parameter nimmt nach Tabelle 6.2 Werte zwischen $68 \frac{\text{km}}{\text{s}\cdot\text{Mpc}}$ und $74 \frac{\text{km}}{\text{s}\cdot\text{Mpc}}$ an. Der Schieberegler ist hierbei so programmiert, dass nur natürliche Zahlen angenommen werden können. Dies vereinfacht spätere Rechnungen, da die Auswirkung möglicher Nachkommastellen von H_0 in der graphischen Darstellung unerheblich sind. Mit der Festlegung von H_0 wird dann der Faktor h automatisch durch Division durch 100 berechnet und darunter ausgegeben.

2. Gesamtmateriedichte Ω_M :

Die Gesamtmateriedichte muss nach Tabelle 6.2 größer als 0,2 sein. Es können hier Werte zwischen 0,2 und 2,0 auf zwei Nachkommastellen genau angegeben werden.

3. Baryondichte Ω_B :

Die relative Baryondichte nimmt nach Tabelle 6.2 Werte zwischen 0,016 und 0,024 an. Die Wahl dieses Parameters kann auf vier Nachkommastellen genau erfolgen. Durch die Festlegung eines Wertes berechnet sich dann nach Division durch den Faktor h^2 automatisch die Baryondichte Ω_B .

4. Neutrinodichte Ω_ν :

Die Neutrinodichte kann Werte zwischen 0,0012 und 0,016 annehmen.

5. Dichte der sichtbaren Materie Ω_{vis} :

Die Dichte der sichtbaren Materie liegt nach Tabelle 6.2 bei etwa 0,5%. In der Simulation können Werte zwischen 0,003 und 0,008 eingestellt werden.

Die Benutzeroberfläche der Simulation mit dem Startbildschirm und den Schiebereglern zum Einstellen der Parameter ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

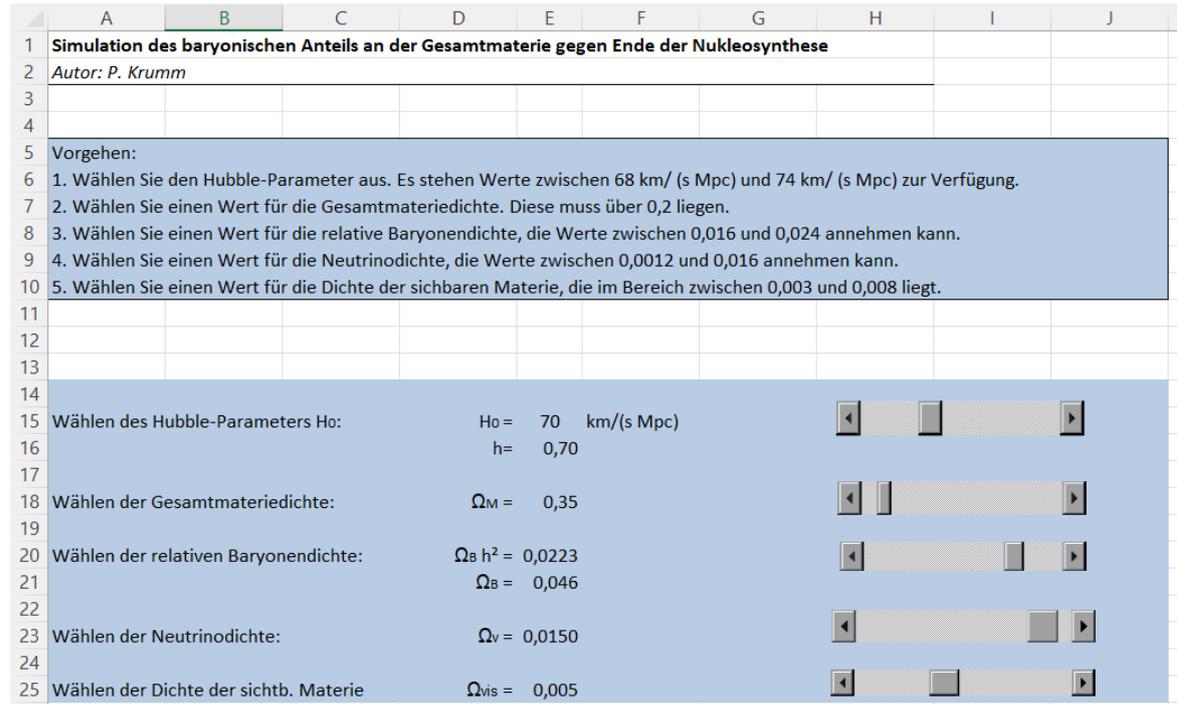


Abbildung 6.7: Benutzeroberfläche der Excel-Simulation mit beispielhaft gewählten Werten für die Parameter.

Eine genaue Erklärung bezüglich der Bedienung und der Änderung der Parameterintervalle sowie der graphischen Darstellungen erfolgt in Anhang C.2. An dieser Stelle soll exemplarisch nur auf die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse eingegangen werden. Für die Tiefenstruktur, also die Berechnung der einzelnen Anteile sei auch hier auf das entsprechende Kapitel im Anhang verwiesen. Sind die Parameter festgelegt worden, so werden die einzelnen Anteile in beschrifteten Kreisdiagrammen graphisch dargestellt. Je nach Wahl der Parameter ergeben sich unterschiedliche Prozentsätze, die jedoch alle klar auf einen signifikanten Anteil baryonischer und vor allem nicht-baryonischer Dunk-

ler Materie hinauslaufen. Dadurch kann den Schülerinnen und Schülern verdeutlicht werden, dass der größte Dichteanteil des Universums keineswegs aus Materie besteht (Abbildung 6.8), dass der größte Anteil der Materie nicht-baryonischer Art ist (Abbildung 6.9 (a)) und dass wiederum sowohl von der baryonischen als auch von der nicht-baryonischen Materie der größte Teil Dunkle Materie darstellt (Abbildung 6.9). Es wird somit eindrucksvoll erkennbar, dass wir bislang nur einen winzig kleinen Bruchteil des Universums überhaupt kennen und der mit Abstand größte Teil noch unbekannt ist – in Form von Dunkler Materie und ein noch größerer Teil in Form der noch viel rätselhafteren Dunklen Energie. In den nachfolgenden Abbildungen sind die exemplarischen Werte nach Abbildung 6.7 dargestellt.

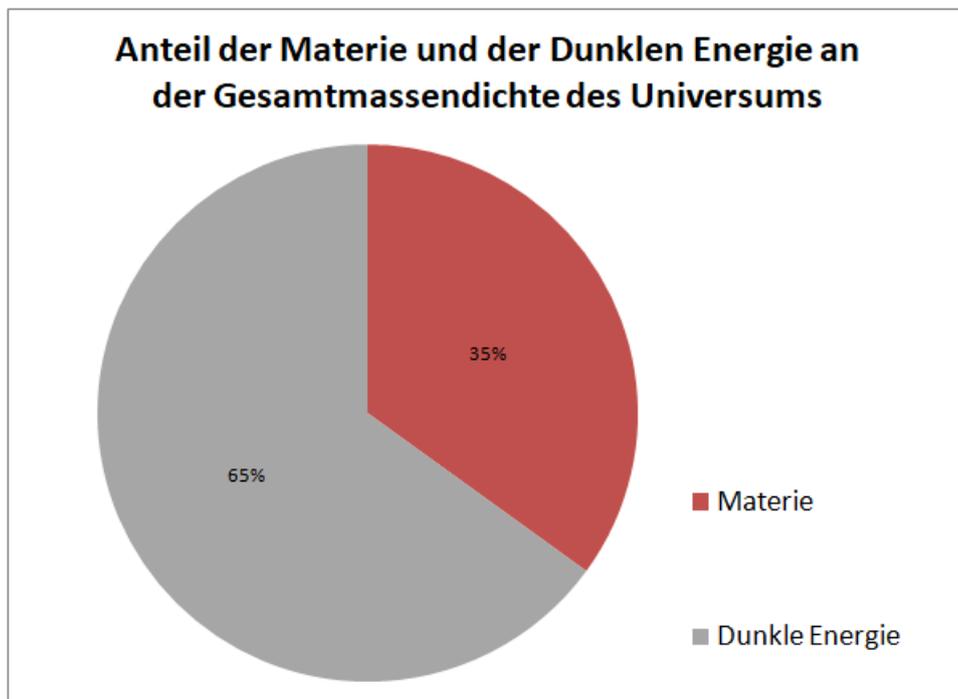
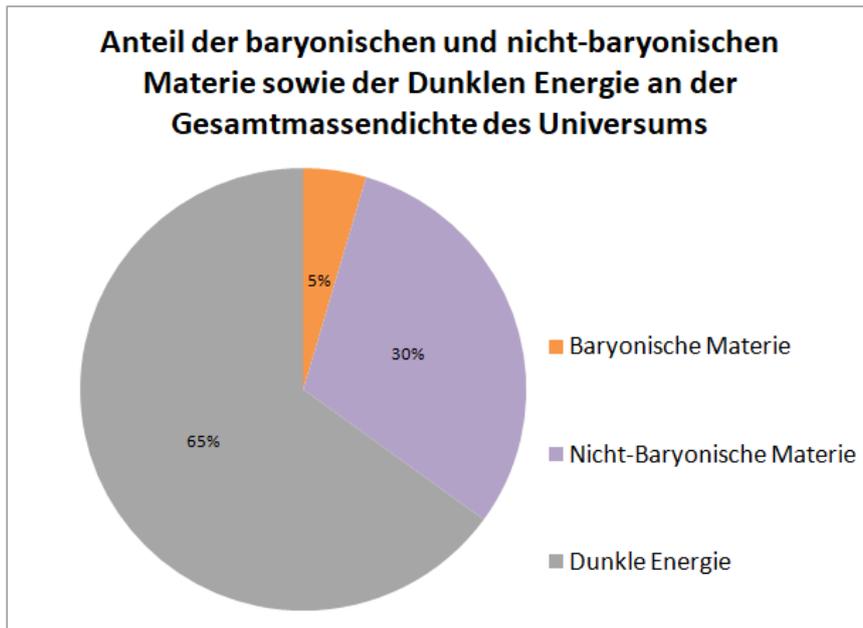
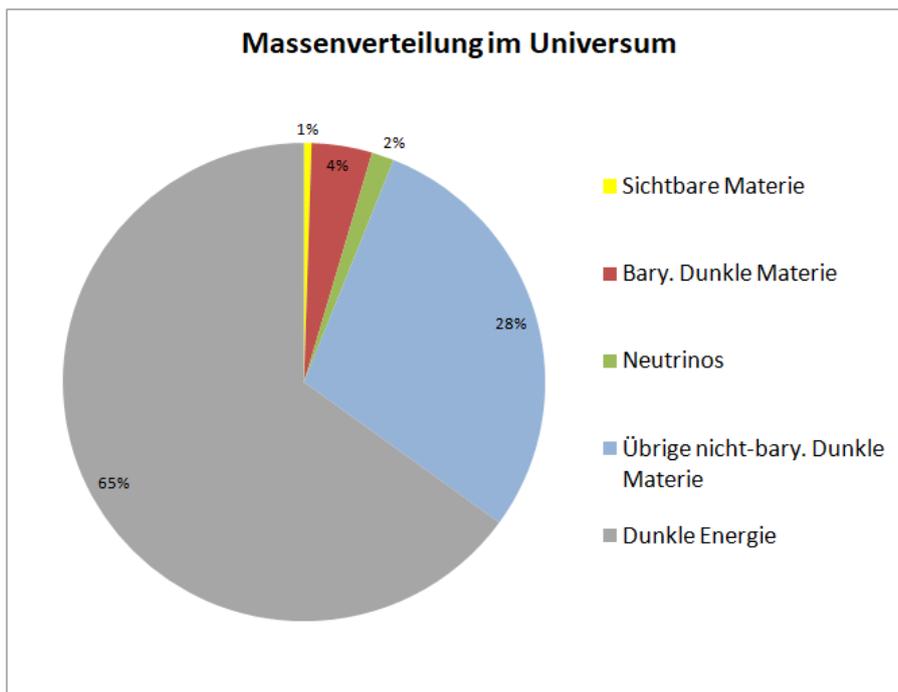


Abbildung 6.8: Graphische Darstellung der Ergebnisse der Excel-Simulation aus den zuvor beispielhaft gewählten Werten für die Parameter – Teil I: Anteil der Materie an der Gesamtdichte des Universums.



(a) Anteil baryonischer und nicht-baryonischer Materie an der Gesamtdichte des Universums.



(b) Anteile der einzelnen Materiearten an der Gesamtdichte der Materie im Universum.

Abbildung 6.9: Graphische Darstellung der Ergebnisse der Excel-Simulation aus den zuvor beispielhaft gewählten Werten für die Parameter – Teil II: Anteil der einzelnen Materiearten an der Gesamtdichte des Universums.

6.2.5 Vertiefende Aufgaben für den Unterricht

Zusätzliches Material für den Unterricht in Form von Aufgaben und Klausurfragen wird in diesem Kapitel dargestellt.

1. *Erläutern Sie, wie man zu der Annahme kommt, dass am Ende der primordialen Nukleosynthese knapp ein Viertel der baryonischen Materie aus Helium-Kernen und nahezu der gesamte Rest aus Wasserstoff-Kernen, also Protonen, besteht.*

Lösung: Aus den Teilchenzahldichten, der Ruheenergiedifferenz von Proton und Neutron sowie der Halbwertszeit von Neutronen lässt sich das Proton-Neutron-Verhältnis gegen Ende der Nukleosynthese auf etwa $7,36 : 1$ abschätzen, vergleiche Kapitel 6.2.1.1. Geht man nun davon aus, dass fast nur Wasserstoff- und Helium-Kerne gebildet werden, ergibt sich die Schlussfolgerung, dass entweder freie Protonen (Wasserstoff-Kerne) oder aber 2-Proton-2-Neutron-Verbindungen (Helium-Kerne) vorliegen. Da die Protonen in der Überzahl sind (Verhältnis von $7,36 : 1$), kann man weiterhin schlussfolgern, dass, nachdem alle Protonen mit je einem Neutron zu einem Helium-Kern fusioniert sind, Protonen übrig bleiben. Die Anzahl der übrig bleibenden Protonen ist $n_p - n_n$. Setzt man diese Zahl mit der Gesamtzahl der Nukleonen $n_p + n_n$ ins Verhältnis, so ergibt sich die relative Häufigkeit von Wasserstoff. Die relative Häufigkeit von Helium errechnet sich daraus dann ebenfalls. Es ergeben sich

$$\chi_{\text{H}} = \frac{n_p - n_n}{n_p + n_n} = \frac{1 - \frac{n_n}{n_p}}{1 + \frac{n_n}{n_p}} \quad , \quad \chi_{\text{He}} = 1 - \chi_{\text{H}} \quad . \quad (6.39)$$

Einsetzen des Wertes $\frac{1}{7,36}$ für $\frac{n_n}{n_p}$ ergibt $\chi_{\text{H}} = 0,761$, also in etwa 76% und $\chi_{\text{He}} = 0,239$, also etwa 24%.

2. Erläutern Sie anschaulich (vielleicht mit einer bildlichen Darstellung), wie man mit einem Proton-zu-Neutron-Verhältnis von etwa 7:1 die Anteile 25% Helium-Kerne und 75% Wasserstoff-Kerne abschätzen kann.

Lösung: Geht man von einem Proton-Neutron-Verhältnis von 7:1 aus, lässt sich der Anteil der Helium-Kerne wie folgt abschätzen. Zwei Protonen und zwei Neutronen bilden einen Helium-Kern. Auf die zwei Neutronen kommen insgesamt 14 Protonen (Verhältnis 7:1), wovon nur zwei im Helium-Kern gebunden sind. Man erhält also 12 freie Protonen und vier gebundene Nukleonen. Das ergibt ein Verhältnis von 12:4 oder gekürzt 3:1, also 75% zu 25%. Im Schaubild könnte das Ganze so aussehen:

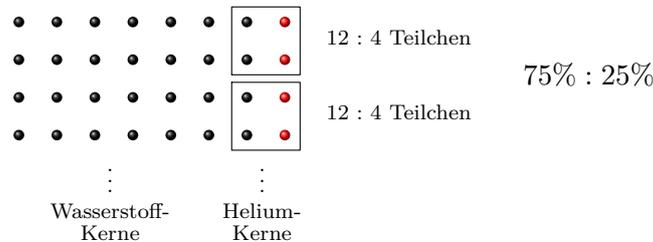


Abbildung 6.10: Schaubild zur Verdeutlichung des prozentualen Helium-Anteils.

3. In den aufgeführten Kernreaktionen ist die folgende, eigentlich naheliegende, Reaktion ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ nicht dabei.

Begründen Sie, warum diese Reaktion nicht aufgeführt worden ist.

Lösung: Diese Reaktion ist zwar möglich, aber sehr unwahrscheinlich. Um einen Helium-Kern zu erzeugen ist es wahrscheinlicher, dass bereits ein fertig gebildeter Tritium-Kern mit einem Deuterium-Kern oder Helium-3 mit einem Deuterium-Kern fusioniert, als dass vier Nukleonen in der Konstellation zweier Deuterium-Kerne zusammentreffen. Der Grund hierfür kann mit der Bindung der einzelnen Nukleonen anschaulich erklärt werden. Es ist einfacher, aus vier Nukleonen einen gebundenen Zustand mit

drei Nukleonen und einem freien Nukleon zu erzeugen, als einen gebundenen Zustand mit allen vier Nukleonen. Daher sind die Reaktionen 6.13 und 6.15 wahrscheinlicher als die Reaktion ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$, die damit nicht zu den Hauptreaktionen gehört und nicht mit aufgeführt wird.

4. Die Vorgänge während der Nukleosynthese und die am Ende vorherrschenden Häufigkeiten der einzelnen Elemente hängen empfindlich von der Halbwertszeit der Neutronen ab.

Diskutieren Sie die Auswirkungen einer veränderten Neutronen-Halbwertszeit auf die Vorgänge während der Nukleosynthese und die gemessenen Häufigkeiten.

Lösung: Wenn die Neutronen eine längere Halbwertszeit hätten, würden in der Zeit, bis sich Deuterium-Kerne bilden, weniger freie Neutronen zerfallen. Selbst bei der tatsächlichen Halbwertszeit von ca. 610 Sekunden zerfallen nur wenige Neutronen, da die meisten innerhalb der etwa 340 Sekunden in Deuterium-Kernen stabil gebunden werden. Die 340 Sekunden ergeben sich aus der dann vorherrschenden Temperatur, die maßgeblich für die Bindungsenergie und damit die Stabilität der Deuterium-Kerne ist. Interessant wird also der Fall, wenn die Halbwertszeit der Neutronen geringer ist. Wählt man hier eine Halbwertszeit, die deutlich kleiner als die angesprochenen 340 Sekunden ist, so werden nahezu alle Neutronen zerfallen und es wird zu sehr wenigen Deuterium-Kernfusionen kommen. Der Effekt wäre also, dass die freien Protonen als solche bleiben und die Neutronen wiederum in neue Protonen zerfallen. Das Universum würde also fast gänzlich aus Wasserstoff-Kernen bestehen.

5. *Berechnen Sie konkret den Anteil der Helium-Kerne gegen Ende der primordialen Nukleosynthese, wenn die Neutronen eine Halbwertszeit von 300 Sekunden (100 Sekunden, 10 Sekunden) hätten.*

Lösung: Das Verhältnis von Protonen zu Neutronen wird sich gegen Ende der Nukleosynthese verändern. Dieses ist gemäß Gleichung 6.8 für die verschiedenen Zeiten auszurechnen. Es ergeben sich

$$\chi(t_h = 300 \text{ s}) = \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{t_h} \cdot \Delta t\right) \simeq \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{300 \text{ s}} \cdot 340 \text{ s}\right) \simeq 0,09117, \quad (6.40)$$

$$\chi(t_h = 100 \text{ s}) = \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{t_h} \cdot \Delta t\right) \simeq \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{100 \text{ s}} \cdot 340 \text{ s}\right) \simeq 0,01895, \quad (6.41)$$

$$\chi(t_h = 10 \text{ s}) = \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{t_h} \cdot \Delta t\right) \simeq \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{10 \text{ s}} \cdot 340 \text{ s}\right) \simeq 1,164 \cdot 10^{-11}. \quad (6.42)$$

Daraus lassen sich dann die folgenden Verhältnisse für den Helium-Anteil bestimmen:

$$\chi_{\text{He}}(t_h = 300 \text{ s}) \simeq \frac{2 \cdot \frac{n_n}{n_p}}{1 + \frac{n_n}{n_p}} \simeq \frac{2 \cdot 0,09117}{1 + 0,09117} \simeq 0,167 = 16,7\%, \quad (6.43)$$

$$\chi_{\text{He}}(t_h = 100 \text{ s}) \simeq \frac{2 \cdot \frac{n_n}{n_p}}{1 + \frac{n_n}{n_p}} \simeq \frac{2 \cdot 0,01895}{1 + 0,01895} \simeq 0,037 = 3,7\%, \quad (6.44)$$

$$\chi_{\text{He}}(t_h = 10 \text{ s}) \simeq \frac{2 \cdot 1,164 \cdot 10^{-11}}{1 + 1,164 \cdot 10^{-11}} \simeq 2,3 \cdot 10^{-11} = 2,3 \cdot 10^{-9}\%. \quad (6.45)$$

Mit immer kleiner werdender Halbwertszeit der Neutronen wird der prozentuale Anteil der Helium-Kerne immer geringer. Bei einer Halbwertszeit von 10 Sekunden wäre der Helium-Anteil mit $2,3 \cdot 10^{-9}\%$ vernachlässigbar gering, sodass die Überlegungen aus Aufgabe 4 bestätigt werden.

6. Interpretieren Sie die Daten der vorherigen Aufgabe, indem Sie die Abhängigkeit von χ_{He} von der Halbwertszeit des Neutrons graphisch mit einem Tabellenkalkulationsprogramm darstellen.

Lösung: Man erkennt an den ausgerechneten Werten eine empfindliche Abhängigkeit des Helium-Verhältnisses von der Halbwertszeit der Neutronen.

Verringert sich die Halbwertszeit, geht die Helium-Konzentration drastisch nach unten. Die Abhängigkeit kann gemäß den in Aufgabe 5 genutzten Verhältnissen durch folgende Funktion ausgedrückt werden:

$$\chi_{\text{He}} = \frac{\frac{2}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{t_h} \cdot 340 \text{ s}\right)}{1 + \frac{1}{5} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{t_h} \cdot 340 \text{ s}\right)} \quad (6.46)$$

Plottet man χ_{He} gegen t_h , so erhält man das in Abbildung 6.11 gezeigte Diagramm. Auch hier wird deutlich, dass mit kleiner werdender Halbwertszeit der relative Anteil an Helium-Kernen stark sinkt. Als rote vertikale Linie ist die tatsächliche Halbwertszeit des Neutrons mit $t_h = 610 \text{ s}$ eingetragen.

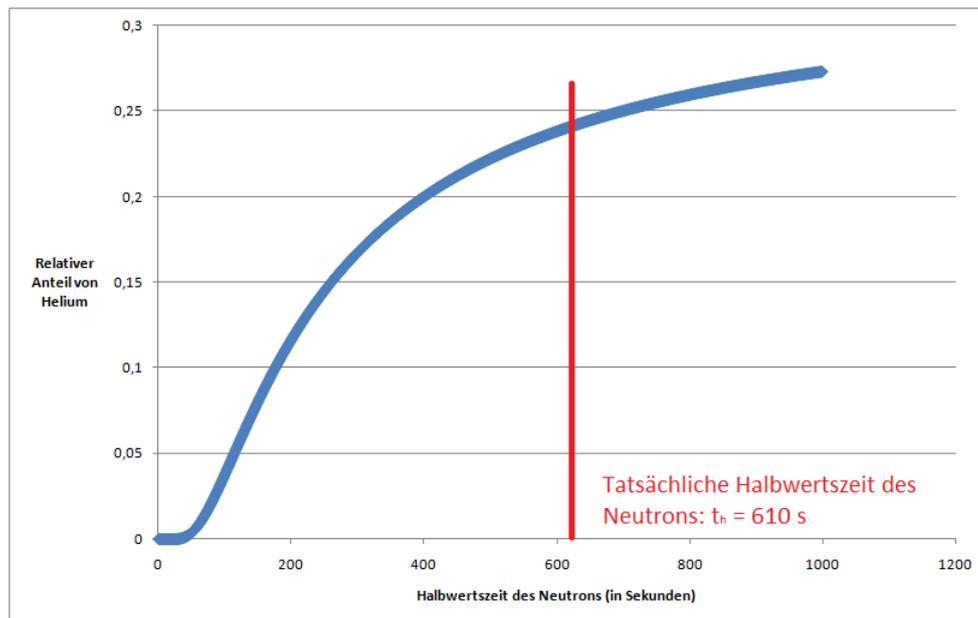


Abbildung 6.11: Graphische Darstellung des relativen Helium-Anteils χ_{He} gegen die Halbwertszeit t_h des Neutrons.

7. Bei der Nukleosynthese sind nur Spuren von schwereren Elementen als ${}^4_2\text{He}$ entstanden.

Erklären Sie, wie dann die schwereren Elemente entstanden sind.

Lösung: Schwerere Elemente sind erst viele Millionen Jahre später entstanden. Während der primordialen Nukleosynthese wurden vor allem Wasserstoff-Kerne und Helium-Kerne erzeugt. In geringen Mengen auch Lithium-Kerne, wie in den fachlichen Grundlagen (Kapitel 6.2.1) dargestellt. Erst als die aus diesen Elementen gebildeten Gaswolken unter ihrer eigenen Gravitationskraft kollabieren, entstehen im Zentrum dieser kollabierenden Wolken so hohe Temperaturen, dass Kernfusionen stattfinden können. Zunächst werden nur die leichten Elemente erzeugt, doch mit steigender Temperatur gelingt auch die Fusion zu Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff und so weiter. Das Element Eisen stellt dann jedoch das Ende der möglichen stellaren Kernfusionen dar, da nur bis zu diesem Element bei Kernfusionsreaktionen Energie freigesetzt wird. Bei schweren Elementen müsste zusätzlich Energie aufgewendet werden, um diese mittels Kernfusion zu bilden. Die schwereren Elemente werden dann während explosiver Phasen am Ende des Sternentwicklungsprozesses erzeugt. Liegt die Masse des Sterns bei über dem Achtfachen der Sonnenmasse, so wird er nach beendeter Kernbrennphase kollabieren und in einer Supernova die im Innern des Sterns erbrüteten Elemente mit großen Mengen an Protonen und Neutronen ins All stoßen. Durch Proton- und Neutronanlagerung an die Elemente entstehen dann auch schwerere Elemente als Eisen.

6.3 Erkenntnisse aus der kosmischen Hintergrundstrahlung

6.3.1 Fachliche Grundlagen

6.3.1.1 Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung

Bereits in Kapitel 6.2.1 wurden einzelne Entwicklungen im frühen Universum thematisiert. An dieser Stelle soll die Entkopplungsphase, die als Grund für das Entstehen der kosmischen Hintergrundstrahlung gelten kann, näher analysiert werden. Bis zum Zeitpunkt der Entkopplung von Materie und Strahlung konnten die Photonen mit freien geladenen Teilchen wechselwirken. Die vorhandene Materie war also mit der Strahlung über Streuprozesse gekoppelt. Diesbezüglich wurde in diesem Modul bereits das thermische Gleichgewicht zwischen baryonischer Materie und Strahlung angesprochen. Erst als das Universum weiter expandierte und aufgrund dieser Expansion die Temperatur und Teilchendichte sank, konnten sich mit den vormals freien Protonen und Elektronen neutrale Wasserstoffatome bilden (Rekombination). Der ebenfalls aufgrund der Expansion zu verzeichnende Energieverlust der Photonen führte dann dazu, dass diese nicht in der Lage waren, die sich nun bildenden Atome zu ionisieren. Die Photonen hatten damit keinen Wechselwirkungspartner mehr und konnten entweichen. Damit waren Strahlung und Materie entkoppelt. Die Temperatur des Universums betrug zu diesem Zeitpunkt etwa 3000 K. Mit fortschreitender Expansion des Universums kühlte sich dann die Strahlung weiter ab, wobei eben diese Abkühlung nur von der Expansion des Universums und nicht mehr von der Wechselwirkung mit der Materie abhing. Da sich die Photonen seither ununterbrochen in alle Richtungen fortbewegt haben, sind sie auch heute noch als Hintergrundstrahlung detektierbar. Diese ist, da sie aus allen Richtungen mit den gleichen Eigenschaften gemessen werden kann, isotrop. Aufgrund der Expansion des Universums entspricht die Entfernung, aus welcher die Photonen stammen, der Größe des beobachtbaren Teils des Universums. Die mit der Expansion einhergehende adiabatische Abkühlung hat dafür gesorgt, dass die Strahlung heute mit einer Temperatur von etwa $T = 2,725$ K detektiert werden kann.

6.3.1.2 Spektrum und Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung

Das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung entspricht dem Modell der Schwarzkörperstrahlung. Demnach kann die Quelle der Strahlung als ein Schwarzer Körper angesehen werden, der einkommende Strahlung vollständig absorbiert und nicht mehr reflektiert. In diesem Kapitel sollen nun die wesentlichen Schritte zur Herleitung der Intensitätsverteilung der Schwarzkörperstrahlung vorgestellt werden. Da die Strahlung aus Photonen besteht und diese zu den Bosonen zählen, muss zur mathematischen Beschreibung auf die BOSE-EINSTEIN-Statistik zurückgegriffen werden. Nach dieser haben die beiden für Photonen möglichen Polarisationsmöglichkeiten eine mittlere Besetzungszahl $\langle n \rangle$ pro Zustand der Energie $h_{\text{Pl}}f$, die durch die PLANCK-Funktion gegeben ist:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1} \quad . \quad (6.47)$$

Die mittlere Energie $\langle E \rangle$ eines Photons pro Zustand ergibt sich dann aus dem Produkt der Einzelenergie $h_{\text{Pl}}f$ mit der mittleren Besetzungszahl $\langle n \rangle$ zu

$$\langle E \rangle = \frac{h_{\text{Pl}}f}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1} \quad . \quad (6.48)$$

Mit Hilfe der spektralen Modendichte $n(f)$, die von der Hohlraumstrahlung in der Elektrodynamik bekannt ist [vgl. z. B. 112], ergibt sich durch Multiplikation mit der mittleren Energie die spektrale Energiedichte $\varepsilon(f)$ zu

$$\varepsilon(f) \, df = n(f) \cdot \langle E \rangle = \frac{8\pi}{c^3} \cdot f^2 \, df \cdot \frac{h_{\text{Pl}}f}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1} = \frac{8\pi h_{\text{Pl}}}{c^3} \cdot \frac{f^3 \, df}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1} \quad . \quad (6.49)$$

Durch den Exponenten $\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}$ im Nenner des Bruchs lassen sich an dieser Stelle zwei Grenzfälle betrachten, nämlich einmal der Fall, in welchem die Energie des Photons kleiner als die durch die BOLTZMANN-Konstante definierte charakteristische Energie ist ($h_{\text{Pl}}f \ll k_{\text{B}}T$) und einmal der umgekehrte Fall, in welchem die Energie des Photons größer als solche ist ($h_{\text{Pl}}f \gg k_{\text{B}}T$). Im ersten Fall erhält man das RAYLEIGH-JEANS-

Gesetz, im zweiten Fall die WIEN'sche Strahlungsformel. Die Berechnung und Interpretation dieser wohlbekannteren Grenzfälle wird eine Übungsaufgabe in Kapitel 6.3.5 sein. Integriert man nun die spektrale Energiedichte über alle Frequenzen, so erhält man die Gesamt-Energiedichte, die an dieser Stelle nur mit der notwendigen Substitution $z = \frac{h_{\text{Pl}} f}{k_{\text{B}} T}$ angegeben wird:

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \frac{8\pi k_{\text{B}}^4}{h_{\text{Pl}}^3 c^3} \cdot T^4 \cdot \int_0^{\infty} \frac{z^3}{\exp(z) - 1} dz = \frac{8\pi^5 k_{\text{B}}^4}{15 h_{\text{Pl}}^3 c^3} \cdot T^4 \quad . \quad (6.50)$$

Die konkrete Berechnung des Integrals wird ebenfalls Teil der Übungsaufgaben sein. Man erhält damit die Proportionalität $\varepsilon \propto T^4$, die als STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz bekannt ist. Für die spektrale Intensität des schwarzen Strahlers und damit der kosmischen Hintergrundstrahlung gilt:

$$I(f) df = \frac{c}{4\pi} \cdot \varepsilon(f) df = \frac{2h_{\text{Pl}}}{c^2} \frac{f^3 df}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} f}{k_{\text{B}} T}\right) - 1} \quad . \quad (6.51)$$

Misst man dieses Intensitätsprofil der kosmischen Hintergrundstrahlung und vergleicht die Messungen mit dem theoretischen Verlauf der Kurve, so stellt man fest, dass Theorie und Messung übereinstimmen, vergleiche Abbildung 6.12.

6.3.1.3 Anisotropien in der kosmischen Hintergrundstrahlung

Misst man die Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung im Universum, wird man leichte Schwankungen im Mikro-Kelvin-Bereich detektieren. Diese Temperaturverteilung mit den darin festgestellten Fluktuationen kann wie eine Art Foto des Universums zum Zeitpunkt der Entkopplung interpretiert werden. Die Anisotropien zeigen Temperaturunterschiede, welche auf eine unterschiedliche Dichte von Materie und Strahlung hinweisen. Diese Unterschiede in der Dichte müssen sich bis in die Gegenwart verstärkt haben, sodass nach und nach die ersten stellaren Objekte und später ganze Galaxien und Galaxienhaufen entstehen konnten.

Messungen mit der Raumsonde WMAP [97] zeigen die in Abbildung 6.13 dargestellte

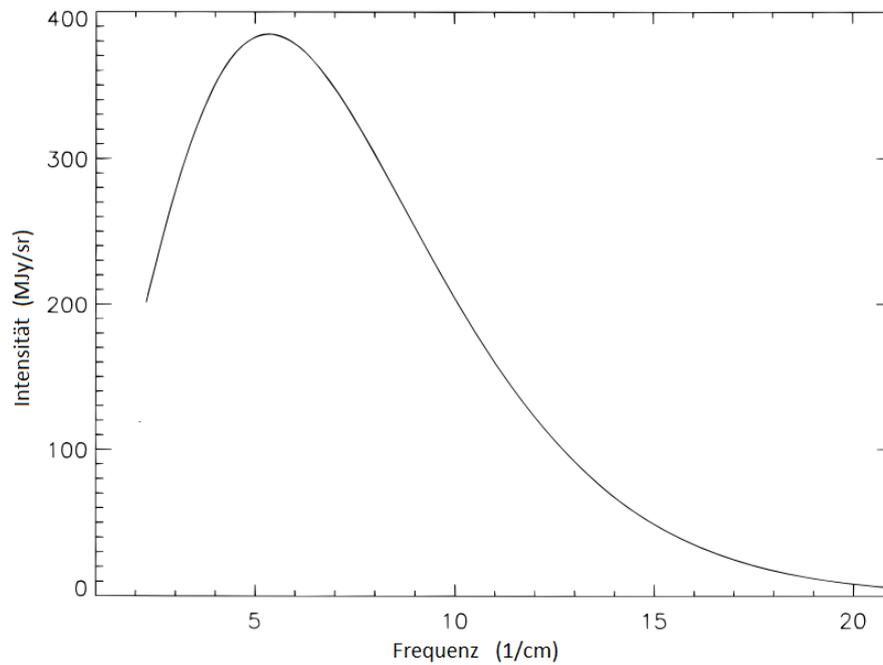


Abbildung 6.12: Messung der spektralen Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem Satelliten COBE [113]. Die Fehlerbalken der einzelnen Messwerte sind kleiner als die Dicke der Linie, welche auf den im Text genannten theoretischen Überlegungen basiert.

Temperaturverteilung.

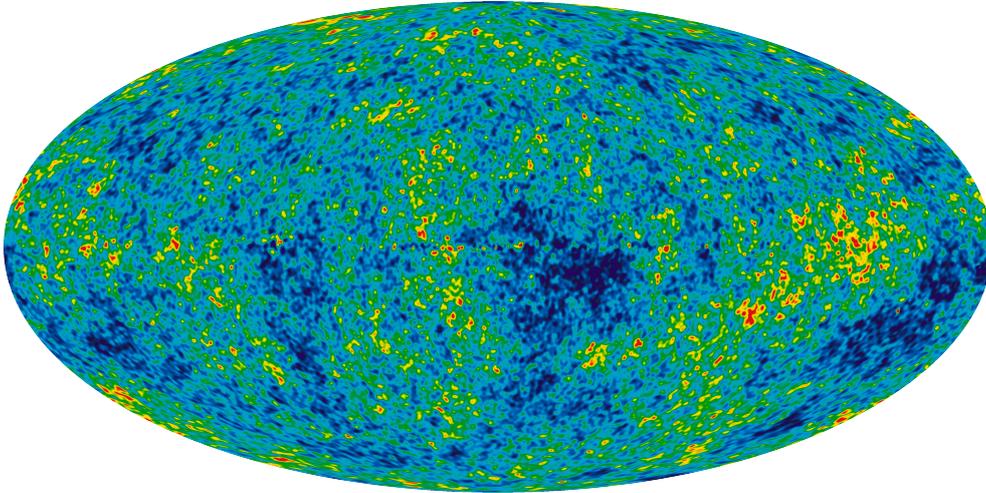


Abbildung 6.13: Räumliche Intensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung [114]. Die Daten sind von der Raumsonde WMAP aufgenommen worden und um die Eigenstrahlung der Milchstraße korrigiert worden. Die Milchstraße entspricht dem Äquator. Korrekturen, welche durch die Bewegung der Erde relativ zur kosmischen Hintergrundstrahlung nötig sind, sind ebenfalls berücksichtigt worden. Die Unterschiede der Temperatur reichen von $T = -200 \mu\text{K}$ (dunkelblau) bis $T = +200 \mu\text{K}$ (rot).

Bei der Untersuchung der Anisotropien wird üblicherweise eine Korrelationsfunktion der relativen Temperaturfluktuationen definiert und diese in LEGENDRE-Polynomen entwickelt. Genauere Ausführungen hierzu sind beispielsweise [115] zu entnehmen. Dabei entspricht die Multipolordnung ℓ einer Winkelauflösung. Das Produkt aus Multipolordnung und Winkelauflösung ergibt in etwa 180° . Mit größeren Werten für ℓ ergeben sich somit kleinere Winkelauflösungen, sodass schärfere Strukturen beschrieben werden können. Trägt man die Intensität der Winkelkorrelation gegen die Multipolordnung ℓ beziehungsweise gegen die Winkelauflösung auf, so ergibt sich das in Abbildung 6.14 dargestellte Diagramm.

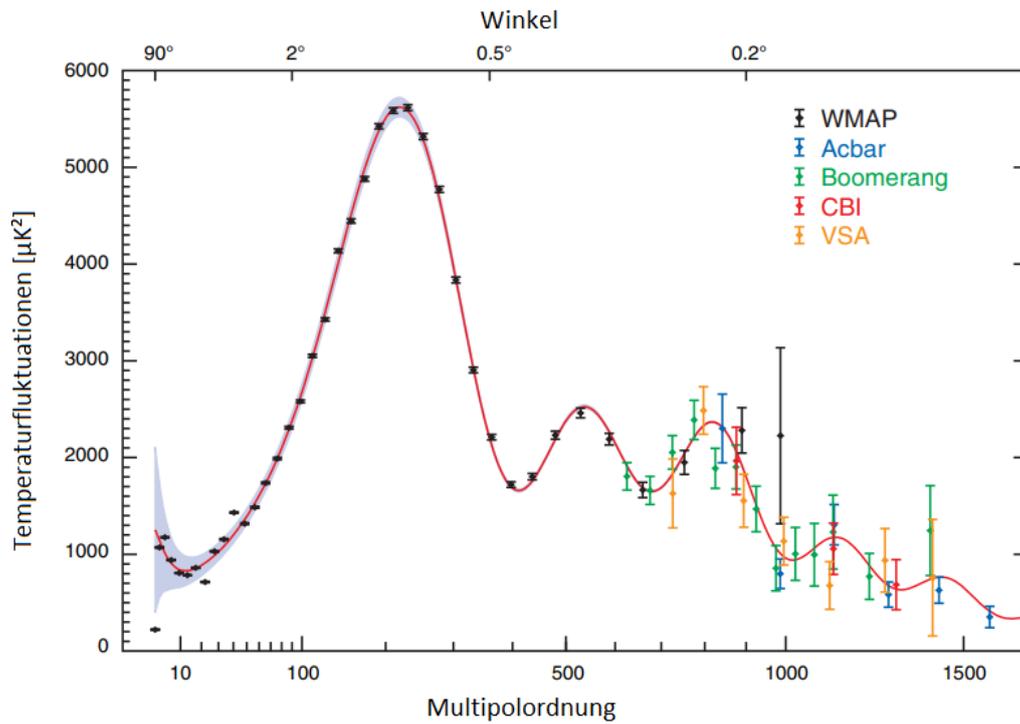


Abbildung 6.14: Temperaturfluktuationen in Abhängigkeit vom Winkel (obere Skala) sowie von der Multipolordnung (untere Skala) [115]. Die Messpunkte sind dabei von unterschiedlichen Experimenten mit den entsprechenden Fehlerbalken eingetragen. Zu erkennen sind nach dem ersten Peak bei $\ell \approx 200$ zwei kleinere in etwa gleich hohe Peaks. Diese gehören wie auch die dann noch folgenden relativen Maxima zu den im Text beschriebenen akustischen Oszillationen.

Die Analyse der Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung muss in Abhängigkeit des ausgewählten Bereichs erfolgen. Es lassen sich grob drei Bereiche ausmachen, die nachfolgend genauer etwas betrachtet werden sollen. Für eine ausführlichere Analyse sei an dieser Stelle auf [115] verwiesen.

1. Bereich: $\ell \leq 100$.

Für eine niedrige Multipolordnung und eine dementsprechend große Winkelauflösung ist ein leichter Anstieg zu erkennen. Dieser Anstieg lässt sich mit den zeitlichen Änderungen der Potentiale im frühen Universum begründen. Zum Zeitpunkt der Entkopplung entstanden im Universum Gebiete, deren Massendichte leicht vom isotropen Hintergrund abwich. So erzeugten Gebiete mit größerer Massendichte stärkere Gravitationspotentiale, Gebiete mit geringerer Massendichte schwächere Gravitationspotentiale. Die kinetische Energie der entkoppelten Photonen wird dabei zum Teil dafür aufgewendet, den Gravitationspotentialen entgegen zu wirken, sodass Photonen aus Gebieten höherer Massendichte nach dem Verlassen dieser Gebiete weniger Energie mit sich tragen als Photonen aus Gebieten kleinerer Massendichte. Die so entstehende gravitative Rotverschiebung bei Photonen aus Gebieten kleinerer Massendichte und die entsprechende gravitative Blauverschiebung bei Photonen aus Gebieten höherer Massendichte sind in der Literatur auch als SACHS-WOLFE-Effekt bekannt [116].

2. Bereich: $100 \leq \ell \leq 1000$.

In diesem Bereich kommt es zu ausgeprägten Peaks, die auch als akustische Oszillationen bezeichnet werden. Diese Oszillationen entstehen durch die Wechselwirkung von Gravitation und Strahlung. In den Gebieten mit höherer Massendichte und damit stärkerer Gravitation kommt es zur Kontraktion. Die Materie zieht sich aufgrund der Gravitation zusammen. Dadurch wiederum erwärmt sich die Materie und der Strahlungsdruck steigt. Der Kontrahierungsvorgang endet und wird umgekehrt. Die Tatsache, dass mehrere Peaks zu erkennen sind, die mit größer werdender Multipolordnung immer kleiner werden, liegt daran, dass in kleineren Gebieten die Oszillationen schneller ausgeführt werden, sodass es bis zum Zeitpunkt der Rekombination

mehrmals zu einer eben solchen Schwingung der Dichtewelle kommt. Aufgrund der geringeren Baryonendichte und des dadurch geringen Gravitationspotentials sind die Oszillationen kleinerer Gebiete entsprechend schwächer. Die Peaks für immer geringere Winkelauflösungen sind also auch immer schwächer ausgeprägt.

3. Bereich: $\ell \geq 1000$.

Für den Bereich bei sehr hoher Multipolordnung und dementsprechend kleinen Winkelauflösungen lassen sich die Peaks der akustischen Schwingungen kaum noch erkennen. Dies liegt daran, dass in sehr kleinen Bereichen die Bildung von Materieansammlungen, was mit einem höheren Gravitationspotential verbunden wäre, verhindert wird. Dieses als SILK-Dämpfung bekannte Phänomen [117] ist damit zu erklären, dass Photonen durch Diffusionsprozesse Baryonen von Orten höherer Materiedichte zu Orten geringerer Materiedichte transportieren. Dadurch wird die oben beschriebene Entstehung kleinerer Materiestrukturen unterbunden.

Dass aber gerade auf kleinen Skalen dennoch Fluktuationen zu messen sind, spricht für die Existenz nicht-baryonischer Dunkler Materie. Gerade die Temperaturfluktuationen bei kleinen Winkelauflösungen legen nahe, dass Gebiete unterschiedlicher Materiedichte vorliegen müssen, die aber eigentlich aufgrund der SILK-Dämpfung nicht existieren sollten. Die Tatsache, dass sie dennoch existieren, ist ein Indiz für das Vorhandensein einer Materieart, die eben nicht mit den Photonen wechselwirkt.

Damit ergeben sich auch aus der Analyse der Anisotropien in der Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung klare Anhaltspunkte für die Begründung der Existenz nicht-baryonischer Dunkler Materie.

6.3.2 Historische Entwicklung

Bereits 1933 sagte Erich REGENER eine Strahlung aus dem intergalaktischen Raum mit einer Temperatur von 2,8 Kelvin voraus, die er Ultrastrahlung nannte [118]. Er wies ebenfalls darauf hin, dass das Temperaturspektrum dem eines schwarzen Körpers gleichen muss [118, S. 668]. Die Vorhersage dieser Ultrastrahlung blieb jedoch zu dieser Zeit noch auf sehr theoretisch-abstrakter Ebene. Konkreter wurde es dann im Jahr 1940, als Andrew MCKELLAR in Temperaturmessungen des Rotationsspektrums von CN-Molekülen auf eine Anregung im Mikrowellenbereich stieß [119]. Hier deuteten sich die ersten experimentellen Hinweise auf die Existenz der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung an. Die tatsächliche Bedeutung dieser Beobachtung war MCKELLAR jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht bewusst.

„From the intensity ratio of the CN lines with $K=0$ and $K=1$ a rotational temperature of 2,3 K follows, which has of course only a very restricted meaning.“ [121, S. 496]

Ebenfalls in den 40er Jahren berechneten Ralph ALPHER und Robert HERMAN die Temperatur der von ihnen genannten ursprünglichen Strahlung zu 5 Kelvin [120]. Die eigentliche Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung gelang dann aber erst 1964 den beiden Radioastronomen Arno Allan PENZIAS und Robert Woodrow WILSON. Sie stellten bei einer neuen Antenne in den Bell Labs, bei denen sie beschäftigt waren, ein Störsignal bei einer Wellenlänge von $\lambda = 7,35$ cm fest. Dieses Störsignal war unabhängig von der Tageszeit und in jeder möglichen Ausrichtung der Antenne gleich stark.

PENZIAS und WILSON konnten sich dieses Störsignal zunächst nicht erklären. Sie vermuteten einen Fehler oder Verunreinigungen an der Antenne. Aber auch Reinigungsarbeiten änderten nichts an der Messung des isotropen Störsignals. Erst mit der Hilfe eines Teams um Robert Henry DICKE und David Todd WILKINSON, die ursprünglich ein eigenes Experiment geplant hatten, gelang die Interpretation des Signals als Nachweis der kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Ergebnisse wurden von beiden Teams 1965 veröffentlicht [123, 124]. In den 70er Jahren folgte dann die Messung des Temperatur-

spektrums der Strahlung auf verschiedenen Frequenzen und damit die Bestätigung des zugrunde liegenden PLANCK-Spektrums als theoretischen Verlauf der Kurve. Die Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung wurde schließlich 1989 stark vorangetrieben, als die NASA den COBE-Satelliten [125] auf eine Umlaufbahn um die Erde brachte. Die nachfolgenden Raumsonden WMAP [97] und Planck [101] konnten dann Messungen mit größerer Winkel- und Temperaturlösung vornehmen und erweiterten die Messungen, auf die in den fachlichen Grundlagen unter anderem mit den Abbildungen 6.13 und 6.14 eingegangen ist.

6.3.3 Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion

Für die Übertragung auf den Schulunterricht ist es insbesondere im Rahmen der hier thematisierten kosmologischen Zusammenhänge wichtig, die Phänomene anschaulich und schülerverständlich darzustellen. Es muss bedacht werden, dass – im Unterschied zu den Beobachtungen und Befunden aus der Gravitationsphysik – bei den hier vorgestellten aus der Kosmologie keine Anknüpfungspunkte zu bereits gelernten Inhalten bei den Schülerinnen und Schülern vorhanden sind. Die kosmologischen Inhalte stellen für die Lernenden somit eine besondere Herausforderung dar. Hinzu kommt, dass auch die Analyse einer Temperaturverteilung, wie sie hier für die Begründung der Existenz Dunkler Materie von entscheidender Bedeutung ist, für Schülerinnen und Schüler abstrakt und hochkomplex ist, da im Vorfeld nach gültigen Lehrplänen keinerlei Thermodynamik unterrichtet worden ist. Unter diesen Rahmenbedingungen sollte vorrangiges Ziel des Unterrichts sein, anschauliche Analogien zur Entkopplungsphase zu entwickeln, um die eigentliche Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung zu simulieren sowie die Messung einer Temperaturverteilung nachzustellen. Ersteres soll im Rahmen dieses Moduls durch Magnet- und Plastikkugeln auf einem Gummiband verdeutlicht werden. Die Magnetkugeln symbolisieren in diesem Zusammenhang Materieteilchen kurz vor der Entkopplungsphase. Die magnetische Anziehung ist damit das Analogon zur Gravitationskraft zwischen den Materieteilchen. Die Plastikkugeln symbolisieren die Photonen.

Es werden nun jeweils zwei Magnet- und Plastikkugeln auf einem Gummiband so positioniert, dass die Magnetkugeln anfangen, sich aufeinander zu bewegen. Durch Dehnen des Gummibandes wird die Expansion des Universums nachgestellt. Indem man geschickt am Gummiband zieht, werden die Magnetkugeln zwar zunächst noch auf Distanz gehalten und somit der Prozess des Aufeinanderzubewegens verlangsamt, jedoch wird die magnetische Anziehung dafür sorgen, dass die beiden Kugeln zusammenstoßen und als zusammenhängendes Objekt auf dem Gummiband positioniert bleiben. Dies kann im Unterricht als Simulation der Rekombination, also der Verbindung von Proton und Elektron zu einem Wasserstoffatom gelten. Die Plastikkugeln sind im Unterschied zu den Magneten, unbeeindruckt von der magnetischen Wirkung, mit dem gedehnten Gummiband von der Anordnung entfernt worden. Dadurch wird den Schülerinnen und Schülern bildlich vor Augen geführt, wie sich die Materie synthetisiert, die Photonen jedoch entkoppeln und damit die kosmische Hintergrundstrahlung entsteht.

Astronomisches Experiment		Analogieexperiment
Universum	↔	Gummiband
Expansion des Universums	↔	Dehnung des Gummibandes
Materieteilchen	↔	Magnetkugel
Elektrische Anziehung	↔	Magnetische Anziehung
Photon	↔	Plastikkugel

Tabelle 6.3: Auflistung der Analogien zwischen den grundlegenden Entwicklungen der Entkopplungsphase und dem Anschauungsexperiment.

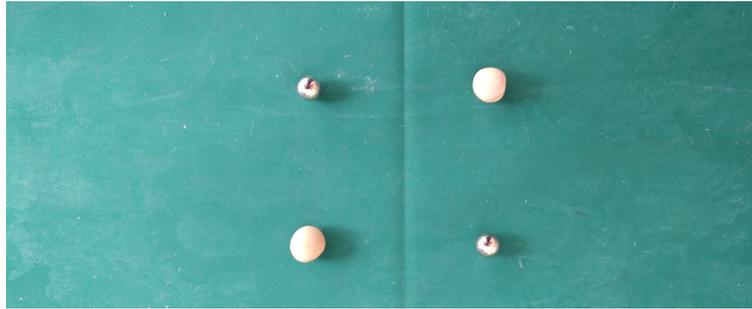
Ein zweites Experiment soll dazu dienen, die Temperaturverteilung einer Halogenlampe als Analogon zur kosmischen Hintergrundstrahlung zu messen. Dies ist ein typisches Experiment, welches gerade im Hochschulbereich häufig in Praktika durchgeführt und ausgewertet wird. Dieses Experiment ist also keineswegs neu entwickelt worden, sondern vielmehr an Praktikumsunterlagen einiger Universitäten angelehnt. Im Schulbereich wird man feststellen, dass unter Umständen die benötigten Materialien zur Durchführung fehlen. Dies sollte jedoch nicht davor zurückschrecken, den Versuchsaufbau zumindest mit

den zur Verfügung stehenden Mitteln nachzustellen und für eine Analyse die Messwerte aus bereits durchgeführten Versuchseinheiten zu nutzen. Auch durch dieses Nachstellen und Eintragen vorgegebener Messwerte kann bei Schülerinnen und Schülern so ein Eindruck davon vermittelt werden, wie ein Temperaturspektrum gemessen wird.

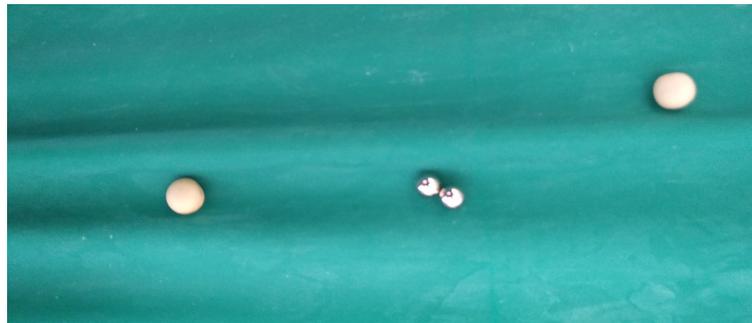
6.3.4 Analogieexperimente zur Entkopplungsphase und Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung

6.3.4.1 Analogieexperiment zur Veranschaulichung des Entkopplungsvorgangs

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, werden Magnet- und Styroporkugeln auf ein Gummiband gelegt. Dieses ist hier ein handelsübliches Theraband, wie es bei Fitness- und Gymnastikübungen verwendet wird. Die Kugeln werden im Folgenden so auf dem Theraband positioniert, dass sie die Eckpunkte eines Rechtecks bilden. Das Dehnen des Bandes kann beispielsweise durch zwei Schülerinnen und Schüler per Hand erfolgen. Eine maschinelle Lösung wäre auch denkbar, ist im Rahmen dieser Arbeit aber nicht gewählt worden, da durch den anfänglichen Ruck die Anordnung der Kugeln durcheinander gebracht wird und diese möglicherweise seitlich vom Band herunterfallen. Durch geschicktes Ziehen per Hand kann man diesen Effekt mit Fingerspitzengefühl leicht umgehen, sodass sehr schnell deutlich wird, dass sich die Magnetkugeln beim Ziehen mit angemessener Geschwindigkeit aufgrund der gegenseitigen Anziehungskraft trotz des sich dehnenden Bandes aufeinander zu bewegen, wohingegen die Plastikkugeln mit der Dehnung weiter voneinander entfernt werden. Bedacht werden muss bei der Anordnung, dass die Magnetkugeln beim Versuchsstart genau in dem Abstand positioniert werden, dass sie sich noch aufeinander zu bewegen. Die Dehnung des Therabandes darf nicht zu schnell vollzogen werden, damit die Magnetkugeln auch tatsächlich zusammen kommen können.



(a) Ausgangssituation: Magnet- und Plastikkugeln werden so auf dem Theraband positioniert, dass die Magnetkugeln sich gerade so aufeinander zu bewegen.



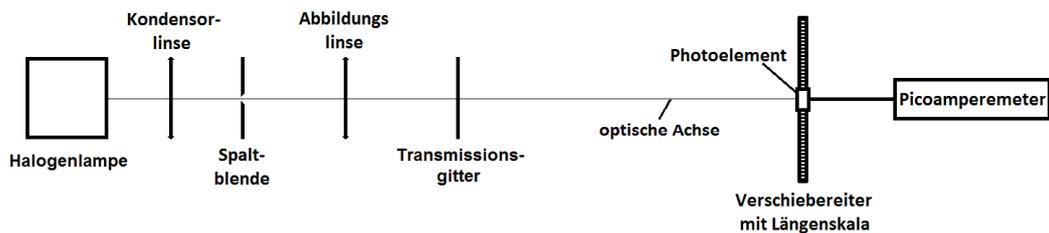
(b) Foto des gedehnten Therabandes: Die Magnetkugeln sind zusammengekommen (Bedeutung im kosmologischen Kontext: Neutrale Wasserstoffatome haben sich gebildet), die Plastikkugeln entfernen sich voneinander (Bedeutung im kosmologischen Kontext: Photonen entkoppeln).

Abbildung 6.15: Versuchsaufbau zum Analogieexperiment zur Veranschaulichung des Entkopplungsvorgangs.

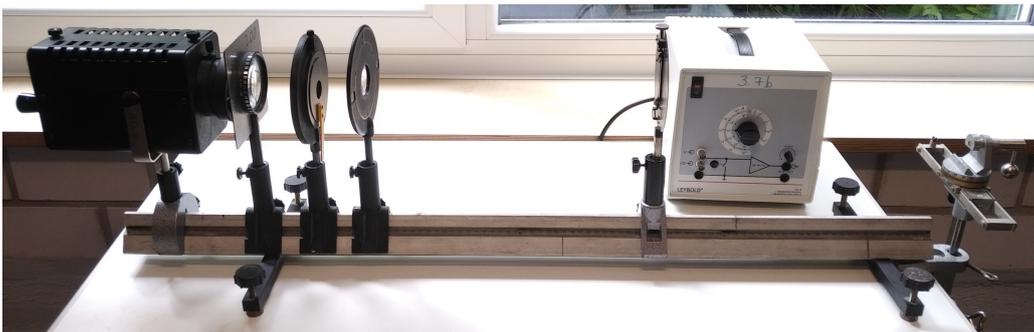
6.3.4.2 Analogieexperiment zur Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung

Die Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung kann mit der eines Schwarzen Körpers modelliert werden. Ein entsprechendes Analogieexperiment kann mit einer Halogenlampe und einem Photoelement realisiert werden. Die Glühwendel der Halogenlampe emittieren Wärmestrahlung, die zunächst durch eine Linse und ein Gitter gebündelt wird. Ein Transmissionsgitter spaltet das einfallende Licht nach den einzelnen Wellenlängen auf, sodass im sichtbaren Bereich die Spektralfarben zu sehen sind. Durch Spalt und Transmissionsgitter wird also ein räumlich und zeitlich kohärentes Lichtbün-

del erzeugt. Das von der Position her verschiebbare Photoelement, welches bolometrische Eigenschaften aufweisen sollte, detektiert dann in einzelnen Wellenlängenbereichen die einfallende Wärmestrahlung. Diese erzeugt über den photoelektrischen Effekt einen kleinen Stromfluss, der mit einem Picoamperemeter gemessen werden kann. Trägt man die gemessenen Stromstärken gegen die Wellenlänge beziehungsweise die Frequenz auf, so erhält man eine Verteilung, die in etwa der Temperaturverteilung eines Schwarzen Körpers entspricht. In Abbildung 6.16 ist ein entsprechender Versuchsaufbau dargestellt.



(a) Schematische Skizze des Versuchsaufbaus. [126]



(b) Foto des entsprechenden Versuchsaufbaus, allerdings mit fehlendem Photoelement.

Abbildung 6.16: Versuchsaufbau zum Analogieexperiment zur Messung der Temperaturverteilung eines Schwarzen Körpers.

Im Rahmen dieser Arbeit ist das Experiment nur nachgestellt worden, da die notwendigen Experimentiermaterialien nicht vollumfänglich an den Schulen, in welchen die hier vorgestellten Module erprobt wurden, vorhanden waren. Da das Experiment ein Standardexperiment in den physikalischen Praktika im Hochschulbereich ist, kann hierauf zurückgegriffen werden.

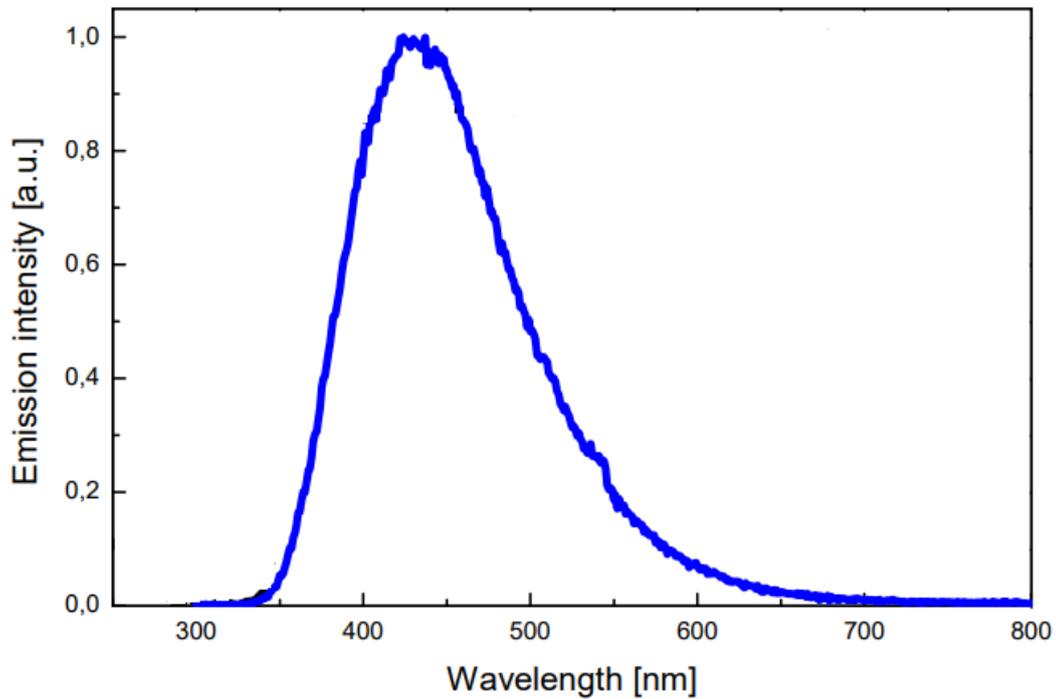


Abbildung 6.17: Gemessenes Temperaturspektrum einer Halogenlampe. [127]

Durch die Anordnung von Halogenlampe, Spalt und Transmissionsgitter ist es möglich, mit dem Photoelement die Intensität der Strahlung in Abhängigkeit der jeweiligen Wellenlänge zu messen. Vergleicht man Abbildung 6.17 mit Abbildung 6.12, so stellt man fest, dass das hier gemessene Temperaturspektrum den gleichen Verlauf aufweist wie das Spektrum der vom COBE-Satelliten gemessenen kosmischen Hintergrundstrahlung.

6.3.5 Vertiefende Aufgaben für den Unterricht

Zusätzliches Material für den Unterricht in Form von Aufgaben und Klausurfragen wird in diesem Kapitel dargestellt. Es sei direkt hier zu Beginn darauf hingewiesen, dass die Aufgaben zu großen Teilen nur unter Anleitung der Lehrkraft zu bewältigen sind. Die Aufgaben sind daher vorwiegend für den Leistungskurs- oder AG-Bereich gedacht.

1. Berechnen Sie die Frequenz, bei der das Maximum der Energiedichteverteilung ε eines Schwarzen Körpers auftritt.

Lösung: Für die Bestimmung des Maximums wird die Nullstelle der differenzierten Energiedichteverteilung bestimmt und auf einen Vorzeichenwechsel untersucht.

$$\varepsilon(f) df = \frac{8\pi h_{\text{Pl}}}{c^3} \cdot \frac{f^3 df}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1} \quad (6.52)$$

$$\frac{d\varepsilon(f)}{df} = \frac{d}{df} \frac{8\pi h_{\text{Pl}}}{c^3} \frac{f^3}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1} \quad (6.53)$$

$$= \frac{8\pi h_{\text{Pl}}}{c^3} \frac{3f^2 \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 3f^2 - f^3 \cdot \frac{h_{\text{Pl}}}{k_{\text{B}}T} \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right)}{\left[\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1\right]^2} \stackrel{!}{=} 0 \quad . \quad (6.54)$$

Der Zähler liefert insgesamt drei Nullstellen, darunter fällt auch die doppelt gezählte Nullstelle bei $f_{1,2} = 0$. Division durch f^2 ergibt dann für $f_3 \neq 0$ und $f_3 \equiv f$ die Gleichung

$$\begin{aligned} 3 \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 3 - f \cdot \frac{h_{\text{Pl}}}{k_{\text{B}}T} \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) &= 0 \\ \Leftrightarrow \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}}f}{k_{\text{B}}T}\right) \left(3 - f \cdot \frac{h_{\text{Pl}}}{k_{\text{B}}T}\right) &= 3 \quad . \end{aligned}$$

Diese Gleichung lässt sich für $f \neq 0$ analytisch nicht mehr lösen. Ein Wert für f lässt sich nur noch mit numerischen Näherungsverfahren bestimmen. Es ergibt sich somit als dritte Lösung: $f_3 \approx 2,82144 \cdot \frac{k_{\text{B}}T}{h_{\text{Pl}}}$.

Bei diesem Wert liegt ein Vorzeichenwechsel von $+$ nach $-$ vor, sodass bei dieser Frequenz ein lokales Maximum der Energiedichteverteilung gegeben ist.

Für $f_1 = f_2 = 0$ ergibt sich in der Ableitung der unbestimmte Ausdruck $0/0$. Auch nach Anwendung der Regel von DE L'HOSPITAL wird dieser Ausdruck beibehalten, sodass auf die komplexen Zahlen ausgewichen werden muss. Auch in \mathbb{C} divergiert die Ableitung der Energiedichteverteilung für $f_1 = f_2 = 0$, sodass mit f_3 das einzige relative Maximum vorliegt. Damit ergibt sich:

$$f_{max} \simeq 2,82144 \cdot \frac{k_B T}{h_{Pl}} \simeq 5,88 \cdot 10^{10} \left(\frac{T}{K} \right) \cdot \frac{1}{s} \quad . \quad (6.55)$$

2. Berechnen Sie die Frequenz der maximalen Energiedichte für die kosmische Hintergrundstrahlung und weisen Sie nach, dass die zugehörige Wellenlänge bei der maximalen Energiedichte tatsächlich im Mikrowellenbereich liegt.

Lösung: Einsetzen der Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung von $T = 2,725$ K in Gleichung 6.55 ergibt:

$$f_{max}^{CMB} \simeq 2,82144 \cdot \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot 2,725 K}{6,626 \cdot 10^{-34} Js} \approx 1,602 \cdot 10^{11} Hz \quad . \quad (6.56)$$

Für die zugehörige Wellenlänge bei der maximalen Energiedichte muss die Energiedichteverteilung zunächst in Abhängigkeit der Wellenlänge und anschließend - ähnlich wie in Aufgabe 1 - die Nullstelle der differenzierten Energiedichteverteilung bestimmt werden. Mit der Beziehung $c = \lambda f$, umgestellt zu $\lambda = \frac{c}{f}$, und $\frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2}$, umgestellt zu $df = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$, folgt für $\varepsilon(\lambda) d\lambda$:

$$\varepsilon(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi h_{Pl} c}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\exp\left(\frac{h_{Pl} c}{\lambda k_B T}\right) - 1} \quad . \quad (6.57)$$

Für die Ableitung gilt damit:

$$\frac{d\varepsilon(\lambda)}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \frac{8\pi h_{\text{Pl}} c}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) - 1} \quad (6.58)$$

$$= \frac{-40\pi h_{\text{Pl}} c}{\lambda^6} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) - 1} + \frac{8\pi h_{\text{Pl}} c}{\lambda^5} \cdot \frac{\frac{h_{\text{Pl}} c}{k_{\text{B}} T} \cdot \frac{1}{\lambda^2}}{\left[\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) - 1\right]^2} \cdot \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) \quad (6.59)$$

$$= \frac{\frac{-40\pi h_{\text{Pl}} c}{\lambda^6} \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) + \frac{40\pi h_{\text{Pl}} c}{\lambda^6} + \frac{8\pi h_{\text{Pl}}^2 c^2}{\lambda^7 k_{\text{B}} T} \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right)}{\left[\exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) - 1\right]^2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.60)$$

Setzt man den Zähler gleich Null und dividiert durch gemeinsame Faktoren, so reduziert sich die Gleichung auf:

$$\begin{aligned} -5 \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) + 5 + \frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T} \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) &= 0 \\ \Leftrightarrow \exp\left(\frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) \left(5 - \frac{h_{\text{Pl}} c}{\lambda k_{\text{B}} T}\right) &= 5 \quad . \end{aligned}$$

Auch diese Gleichung lässt sich analytisch nicht mehr lösen. Ein Wert für λ lässt sich aber mit numerischen Näherungsverfahren bestimmen. Es ergibt sich als Lösung $\lambda = \frac{h_{\text{Pl}} c}{4,965 k_{\text{B}} T}$. Bei diesem Wert liegt ein Vorzeichenwechsel von $+$ nach $-$ vor, sodass bei dieser Wellenlänge ein lokales Maximum der Energiedichteverteilung gegeben ist. Damit gilt also:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{h_{\text{Pl}} c}{4,965 k_{\text{B}} T} \simeq 2,897 \frac{1}{\left(\frac{T}{\text{K}}\right)} \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6.61)$$

Einsetzen der Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung von $T = 2,725 \text{ K}$ ergibt:

$$\lambda_{\text{max}}^{\text{CMB}} = \frac{2,897 \cdot 10^{-3}}{2,725} \text{ m} \approx 1,063 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,1063 \text{ cm} \quad (6.62)$$

Damit liegt die hier ausgerechnete Wellenlänge im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung im Bereich der Mikrowellenstrahlung, für die üblicherweise Wellenlängen von 1 mm bis zu 1 m angenommen werden.

3. Berechnen Sie die gesamte Energiedichte der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Lösung: Für die gesamte Energiedichte gilt Formel 6.50, in welche die entsprechenden Konstanten und die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung von $T = 2,725$ K eingesetzt werden müssen. Es folgt

$$\varepsilon_{\text{ges}}^{\text{CMB}} = \frac{8\pi^5 k_{\text{B}}^4}{15h_{\text{P1}}^3 c^3} \cdot T^4 \approx 4,1761 \cdot 10^{-14} \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad . \quad (6.63)$$

4. Betrachtet man bei der in den fachlichen Grundlagen hergeleiteten Formel zur spektralen Energiedichte die beiden Grenzfälle $h_{\text{P1}}f \ll k_{\text{B}}T$ und $h_{\text{P1}}f \gg k_{\text{B}}T$, so ergeben sich das RAYLEIGH-JEANS-Gesetz sowie die WIEN'sche Strahlungsformel. Leiten Sie beide Gesetzmäßigkeiten her und interpretieren Sie diese im Sachzusammenhang.

Lösung: Für die spektrale Energiedichte gilt nach Formel 6.49:

$$\varepsilon(f) \, df = \frac{8\pi h_{\text{P1}}}{c^3} \cdot \frac{f^3 \, df}{\exp\left(\frac{h_{\text{P1}}f}{k_{\text{B}}T}\right) - 1} \quad . \quad (6.64)$$

Bei den nachfolgenden Ausführungen handelt es sich selbstverständlich um bekannte Lösungsschritte. Es ist das typische Standardverfahren, welches sich in Lehrbüchern finden lässt, hier aber der Vollständigkeit halber auch mit aufgeführt wird.

Fall 1: $h_{\text{PI}}f \ll k_{\text{B}}T$

In diesem Fall wird das Argument der e -Funktion sehr klein. Entwickelt man die e -Funktion um den Wert Null (TAYLOR-Entwicklung) und bricht nach der ersten Ordnung ab, so erhält man:

$$\exp\left(\frac{h_{\text{PI}}f}{k_{\text{B}}T}\right) \approx 1 + \frac{h_{\text{PI}}f}{k_{\text{B}}T} + \dots \quad . \quad (6.65)$$

Einsetzen in Gleichung 6.64 liefert dann das RAYLEIGH-JEANS-Gesetz:

$$\varepsilon(f) \, df \approx \frac{8\pi h_{\text{PI}}}{c^3} \cdot \frac{f^3 \, df}{1 + \frac{h_{\text{PI}}f}{k_{\text{B}}T} - 1} = \frac{8\pi}{c^3} \cdot k_{\text{B}}T \cdot f^2 \, df \quad . \quad (6.66)$$

Interpretation dieses Grenzfalles: In diesem ersten Fall ist die Photonenenergie deutlich kleiner als die charakteristische Energie $k_{\text{B}}T$.

Die Besetzungszahl ist groß, sodass eine beträchtliche Anzahl an niederenergetischen Photonen erzeugt wird. Diese tragen aber nur bedingt zur Gesamtenergiedichte bei, da die Einzelenergie der Photonen klein ist und durch die große zugehörige Wellenlänge vergleichsweise viel Platz vom Photon eingenommen wird.

Fall 2: $h_{\text{PI}}f \gg k_{\text{B}}T$

In diesem Fall wird die e -Funktion sehr groß. Sie kann deutlich größer als 1 angenommen werden. Die Subtraktion mit 1 im Nenner bewirkt somit keinen nennenswerten Unterschied, sodass sich damit die WIEN'sche Strahlungsformel ergibt zu:

$$\varepsilon(f) \, df \approx \frac{8\pi h_{\text{PI}}}{c^3} \cdot \frac{f^3 \, df}{\exp\left(\frac{h_{\text{PI}}f}{k_{\text{B}}T}\right)} \quad . \quad (6.67)$$

Interpretation dieses Grenzfalles: In diesem Fall ist die Photonenenergie deutlich größer als die charakteristische Energie $k_B T$. Die Produktion von Photonen ist somit energetisch ungünstig, wodurch die Besetzungszahl exponentiell unterdrückt ist. Es existieren also nur wenige Photonen, die auch nur wenig zur Gesamtenergiedichte beitragen, auch wenn sie gerade im Vergleich zum ersten Fall deutlich höhere Energien aufweisen.

5. Für die Berechnung der Gesamtenergiedichte ist eine Integration über alle Frequenzen erfolgt.

Nutzen Sie die Substitution $z = \frac{h_{\text{Pl}} f}{k_B T}$ und führen Sie die Integration explizit aus.

Lösung: Für die spektrale Energiedichte gilt Formel 6.49. Mit der Substitution ergeben sich folgende Ersetzungen:

$$z = \frac{h_{\text{Pl}} f}{k_B T} \Leftrightarrow f = \frac{k_B T}{h_{\text{Pl}}} \cdot z \quad (6.68)$$

$$\frac{dz}{df} = \frac{h_{\text{Pl}}}{k_B T} \Leftrightarrow df = \frac{k_B T}{h_{\text{Pl}}} dz \quad (6.69)$$

Damit folgt:

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \int_0^{\infty} \varepsilon(f) df = \frac{8\pi h_{\text{Pl}}}{c^3} \int_0^{\infty} \left(\frac{k_B T}{h_{\text{Pl}}} \right)^3 \frac{k_B T}{h_{\text{Pl}}} \cdot \frac{z^3 dz}{\exp(z) - 1} \quad (6.70)$$

$$= \frac{8\pi k_B^4}{h_{\text{Pl}}^3 c^3} \cdot T^4 \int_0^{\infty} \frac{z^3 dz}{\exp(z) - 1} \quad (6.71)$$

Das Integral lässt sich nur mit einigen analytischen Tricks berechnen. Glücklicherweise erinnert es stark an ein Standardintegral aus der Analysis, in welchem die BERNOULLI-Zahlen Anwendung finden. Es gilt:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^{2n-1} dx}{\exp(x) - 1} = \frac{(2\pi)^{2n} B_n}{4n} \quad \text{mit} \quad B_n = \frac{(2n)!}{2^{2n-1} \pi^{2n}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^{2n}} \quad . \quad (6.72)$$

Hierbei sind B_n die BERNOULLI-Zahlen. Für $n = 2$ ergibt sich genau das Integral, welches zu lösen ist. Dazu muss zunächst die zweite BERNOULLI-Zahl berechnet werden. Diese ergibt sich zu

$$B_2 = \frac{4!}{2^3 \cdot \pi^4} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^4} = \frac{24}{8\pi^4} \cdot \frac{\pi^4}{90} = \frac{1}{30} \quad . \quad (6.73)$$

Eingesetzt in 6.72 folgt für die Berechnung des Integrals für $n = 2$:

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{\exp(x) - 1} = \frac{(2\pi)^4}{8} \cdot \frac{1}{30} = \frac{\pi^4}{15} \quad . \quad (6.74)$$

Dies wiederum eingesetzt für das Integral in Gleichung 6.71 liefert das gewünschte Ergebnis für die Gesamtenergiedichte:

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \frac{8\pi k_{\text{B}}^4}{h_{\text{P}}^3 c^3} \cdot T^4 \cdot \frac{\pi^4}{15} = \frac{8\pi^5 k_{\text{B}}^4}{15 h_{\text{P}}^3 c^3} \cdot T^4 \quad . \quad (6.75)$$

6.4 Erprobung

6.4.1 Vorgehensweise

Das hier vorgestellte Modul zu den Beobachtungen und Befunden aus der Kosmologie ist ebenfalls an einem Gymnasium in Nordrhein-Westfalen erprobt worden. Die Unterrichtssequenzen zu diesem Modul haben sich an Modul 1 angeschlossen, sodass auch hier die Inhalte in zwei Kursen mit insgesamt 41 Schülerinnen und Schülern unterrichtet wurden. Die im ersten Teil des Moduls vorgestellte Simulation zur Abschätzung des Anteils Dunkler Materie an der Gesamtmateriedichte des Universums wurde dabei von Schülerinnen und Schülern gruppenweise an Laptops durchgeführt. Zur Auswertung des Moduls wurden, ähnlich wie bei der Erprobung des ersten Moduls, die fachlichen Grundlagen zu den inhaltlichen Schwerpunkten in Testbögen abgefragt. Die Fragestellungen gliedern sich auch hier in drei Anforderungsbereiche und sind in Anhang D.2 eingefügt. Die Anforderungsbereiche sind analog zu Tabelle 5.3 definiert worden.

6.4.2 Ergebnisse und Auswertung

Für den ersten Teil des Moduls, also die Prozesse während der Nukleosynthese und die sich daraus ergebenden Elementhäufigkeiten im Universum sowie die damit folgende Abschätzung der Menge an Dunkler Materie im Universum, sind drei Fragen formuliert worden. Tabelle 6.4 zeigt die Anzahl der Schülerantworten, die als vollständig, größtenteils, zum Teil oder nicht korrekt eingestuft wurden. In Abbildung 6.18 ist die entsprechende graphische Darstellung der Ergebnisse einzusehen. Bemerkenswert ist, dass hier ein doch deutlicher Unterschied bei den Ergebnissen zwischen den einzelnen Fragen zu erkennen ist. Das Erklären der Prozesse während der Nukleosynthese und die sich daraus ergebenden Abschätzungen zur Elementhäufigkeit gelang bei knapp 90% der befragten Schülerinnen und Schülern vollständig oder größtenteils korrekt. Da hier sehr detaillierte Kenntnisse nötig waren und der eben beschriebene Zusammenhang zur Häufigkeit der Elemente hergestellt werden sollte, ist die erste Frage damit Anforderungsbereich II zuzuordnen (vgl. Tabelle 5.3). Es ist auffällig, dass die Anzahl der vollständig kor-

rekten Antworten vergleichsweise niedrig ist. Mit nur 15 vollständig korrekten Lösungen zeichnet sich hier bereits ab, dass die Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie für die Schülerinnen und Schüler möglicherweise abstrakter und komplizierter wahrgenommen wurden als eben jene aus der Gravitationsphysik. Ein Grund hierfür könnte in der fehlenden Verbindung zu bereits bekannten Inhalten sein. Die Kosmologie stellt für die Lernenden immerhin ein völlig neues Teilgebiet der Physik dar, wohingegen die Gravitationsphysik mit den entsprechenden Gesetzmäßigkeiten bekannt sein dürfte. Der Eindruck, dass es sich hier um ein anspruchsvolles Modul handelt, setzt sich in der weiteren Analyse der gestellten Fragen fort. Die zweite Frage, die den Zusammenhang zwischen den Elementhäufigkeiten und der Dunklen Materie behandelt, wurde zwar auch noch von vielen Schülerinnen und Schülern mindestens größtenteils korrekt beantwortet, jedoch ist hier nun auch fast jede vierte Antwort fehlerhaft oder nicht korrekt. Die letzte Aufgabe, in welcher nach einem Zahlenwert für den Massenanteil der Dunklen Materie gefragt wurde, ist aufgrund der zuvor durchgeführten Simulation eine reine Reproduktionsaufgabe und damit Anforderungsbereich I zuzuordnen (vgl. Tabelle 5.3). Hier haben fast alle Schülerinnen und Schüler ein korrektes Ergebnis angegeben, lediglich eine Person hat die Aufgabe falsch beantwortet. Dies spricht in jedem Fall für einen klaren Erfolg bei der Vermittlung des Anteils Dunkler Materie mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit angefertigten Excel-Simulation.

Für den zweiten Teil des Moduls, nämlich die Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung und die sich daraus ergebenden Indizien für die Dunkle Materie, wurden ebenfalls drei Fragen formuliert, wobei nachfolgend mit der einfachsten Fragestellung begonnen wird. Das Zustandekommen und die Bedeutung der kosmischen Hintergrundstrahlung konnten über 95% der Schülerinnen und Schüler vollständig oder größtenteils korrekt erklären. Da es sich hier um eine reine Reproduktionsaufgabe handelte, ist diese Frage dem Anforderungsbereich I zuzuordnen. Durch das im Rahmen der Erprobung durchgeführte Analogieexperiment und die anschauliche Darstellung der Entkopplungsphase ist das äußerst positive Ergebnis auch nicht sonderlich überraschend und kann als pädagogische Rechtfertigung für den Einsatz des Analogieexperiments im Unterricht gelten.

	vollständig korrekt	größtenteils korrekt	zum Teil korrekt	nicht korrekt
Prozesse während der Nukleosynthese und die sich daraus ergebenden Abschätzungen zur Elementhäufigkeit (AFB II)	15	22	3	1
Zusammenhang zwischen Elementhäufigkeiten und dem Massenanteil der Dunklen Materie (AFB III)	11	20	9	1
Angabe eines Zahlenwertes / Intervalls für den Massenanteil der Dunklen Materie (AFB I)	33	7	0	1

Tabelle 6.4: Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur Nukleosynthese und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

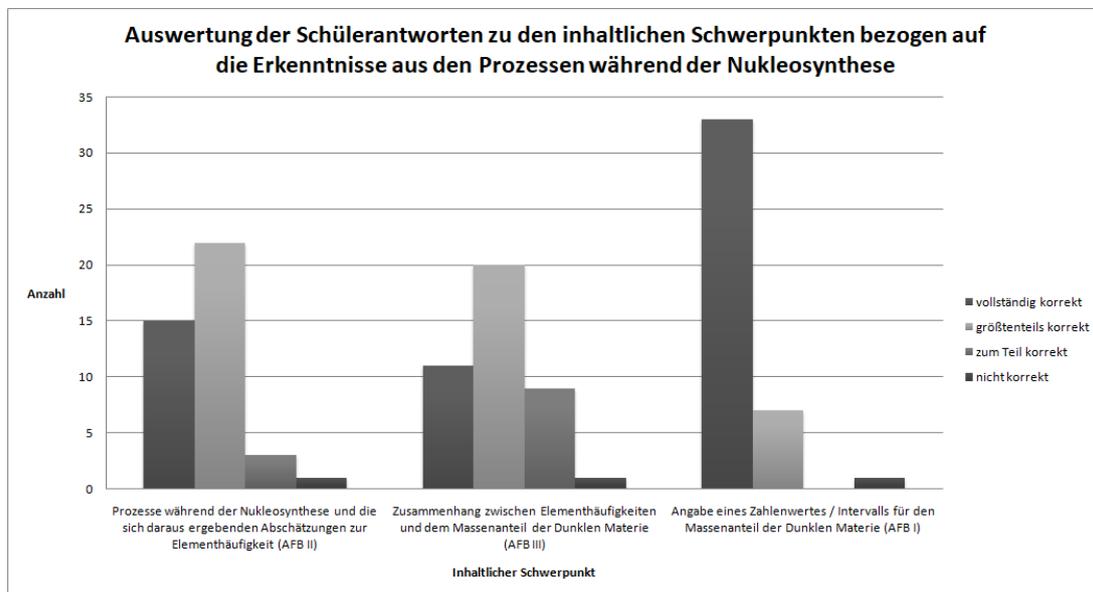


Abbildung 6.18: Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur Nukleosynthese und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

Eine klare Abnahme der vollständig korrekten Antworten erfolgte dann bei der zweiten Aufgabe, in welcher die Temperaturverteilung analysiert und der Wellenlängenbereich angegeben werden sollte. Die Anzahl sank von zuvor 28 vollständig korrekten Antworten auf exakt die Hälfte. Mit 15 weiteren Antworten, die aber immerhin größtenteils korrekt waren, ist die Aufgabe insgesamt zwar noch zufriedenstellend bearbeitet worden, dennoch wird hier deutlich, dass die Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung auf sehr abstraktem und für Schülerinnen und Schüler anspruchsvollem Niveau einzuordnen ist. Hier kommen sicherlich die für die Lernenden fehlenden Anknüpfungspunkte der kosmologischen Inhalte und der thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten an bereits bekannte Inhalte zum Tragen. Umso erstaunlicher ist dann jedoch, dass bei der Erläuterung des Zusammenhangs zwischen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der Dunklen Materie die Anzahl der vollständig korrekten Lösungen wieder nach oben geht. Insgesamt konnten die letzte Frage immerhin knapp 90% der Befragten mindestens größtenteils korrekt beantworten. Der Zusammenhang zur Dunklen Materie und damit die Bedeutung und die Stellung der kosmischen Hintergrundstrahlung innerhalb des Moduls ist somit von den Schülerinnen und Schülern erkannt worden.

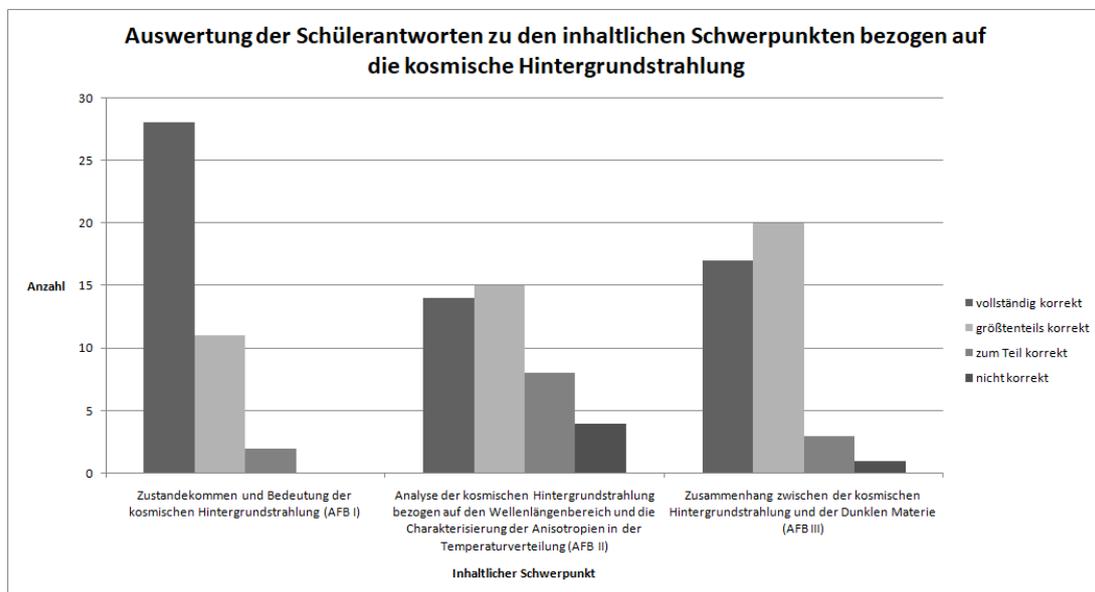


Abbildung 6.19: Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur kosmischen Hintergrundstrahlung und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

	vollständig korrekt	größtenteils korrekt	zum Teil korrekt	nicht korrekt
Zustandekommen und Bedeutung der kosmischen Hintergrundstrahlung (AFB I)	28	11	2	0
Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung bezogen auf den Wellenlängenbereich und die Charakterisierung der Anisotropien in der Temperaturverteilung (AFB II)	14	15	8	4
Zusammenhang zwischen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der Dunklen Materie (AFB III)	17	20	3	1

Tabelle 6.5: Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur kosmischen Hintergrundstrahlung und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse gerade im Vergleich zu Modul 1 schlechter ausgefallen sind. Dies war aufgrund der zunehmend vollständig unbekanntem physikalischen Inhalte mit fehlenden Anknüpfungspunkten an bereits bekannte Inhalte sowie der im Vergleich doch zunehmend theoretischeren Auseinandersetzung mit den kosmologischen Beobachtungen und Befunden zu erwarten. Es ist jedoch erfreulich, dass die Schülerinnen und Schüler dennoch das Modul einordnen konnten und den Zusammenhang zur Dunklen Materie erkannt und erklärt haben. Interessant wird dementsprechend die motivationale Auswertung. Ähnlich wie bei Modul 1 wurden die Schülerinnen und Schüler mit einer LIKERT-Skala danach befragt, ob sie das Modul verstanden haben, es interessant war und zu neuen Erkenntnissen geführt hat sowie ob die Wahl der Simulationen, der Experimente und Aufgaben ersichtlich war. Ebenfalls wurde am Ende gefragt, ob die Lernenden noch mehr über die Dunkle Materie wissen möchten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 sowie in Abbildung 6.20 dargestellt. Es zeigt sich, dass nach wie vor die meisten Schülerinnen und Schüler positive Bewertungen abgeben, jedoch ist augenfällig, dass die Beurteilung des zweiten Moduls insgesamt schlechter ausfällt als die des

ersten. Man erkennt im Vergleich deutlich, dass die positiven Bewertungen bei der Antwortmöglichkeit „stimme voll zu“ bei allen Aussagen zurückgegangen sind, jedoch sind auch nahezu keine zu kritischen Bewertungen abgegeben worden. Dass drei Lernende der Aussage, dass das zweite Modul zu neuen Erkenntnissen geführt hat, nicht zustimmen konnten, deutet auf Verständnisprobleme hin, die hier etwas deutlicher zutage treten als im Modul zur Gravitationsphysik. Es zeigt sich jedoch auch, dass das Interesse am Thema der Dunklen Materie nach wie vor sehr groß ist. Mit 28 Schülerinnen und Schülern, die der Aussage, dass sie noch mehr über die Dunkle Materie erfahren möchten, vollständig zustimmen und 12, die der Aussage teilweise zustimmen, legitimiert dies auch aus motivationaler Sicht der Lernenden die Entwicklung eines abschließenden dritten Moduls.

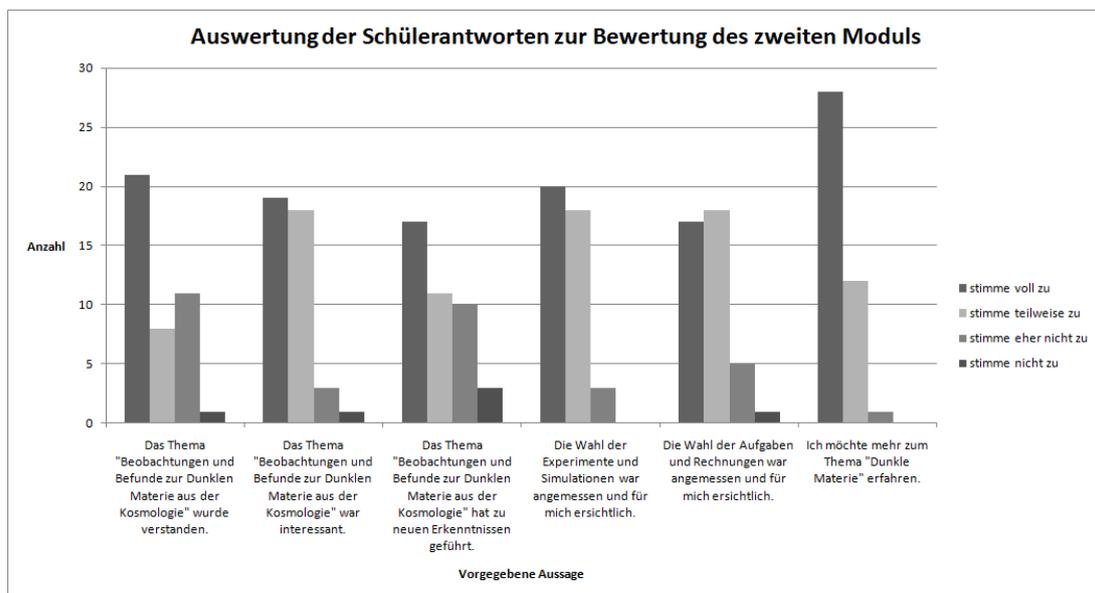


Abbildung 6.20: Graphische Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie“ der Schülerinnen und Schüler.

	stimme voll zu	stimme teil- weise zu	stimme eher nicht zu	stimme nicht zu
Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Kosmologie“ wurde verstanden.	21	8	11	1
Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Kosmologie“ war interessant.	19	18	3	1
Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Kosmologie“ hat zu neuen Erkenntnissen geführt.	17	11	10	3
Die Wahl der Experimente und Simulationen war angemessen und für mich ersichtlich.	20	18	3	0
Die Wahl der Aufgaben und Rechnungen war angemessen und für mich ersichtlich.	17	18	5	1
Ich möchte mehr zum Thema „Dunkle Materie“ erfahren.	28	12	1	0

Tabelle 6.6: Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie“ der Schülerinnen und Schüler.

Auch bei der Erprobung dieses Lernmoduls wurde die Kritik zweier Lehrkräfte mit berücksichtigt, die das Material zur Verfügung gestellt bekommen haben und in einem persönlichen Gespräch um eine Einschätzung gebeten wurden. Die nachfolgende Auflistung zeigt die genannten positiven (mit einem + gekennzeichnet) und verbesserungswürdigen Punkte (mit einem – gekennzeichnet).

- + Die Kosmologie ist ein ganz neues Teilgebiet für die Schülerinnen und Schüler und enorm wichtig für das Verständnis der Entstehung unseres Universums. Dadurch kann nachhaltig Wissen den Schülerinnen und Schülern vermittelt werden.
- + Das Modul stellt eine sinnvolle Erweiterung / Ergänzung zu Modul 1 dar. Für Schülerinnen und Schüler wird ersichtlich, dass neben der Gravitationsphysik auch die Kosmologie eine wichtige Stütze bei der Legitimation der Dunklen Materie ist.
- + Die fachlichen Grundlagen sind detailliert und strukturiert dargestellt, was hier besonders wichtig ist, da auch Lehrkräfte zum Teil keine oder nur wenige Vorkenntnisse auf diesem Bereich der Physik haben. Mit diesen Materialien gelingt in jedem Fall eine adäquate Vorbereitung, um dieses Modul unterrichten zu können.
- + Die Simulation ist einfach zu bedienen und zeigt klare Ergebnisse, die den Lernenden im Kopf bleiben.
- + Das erste Experiment ist gut gewählt und veranschaulicht auf sehr simple und dadurch einprägsame Weise die Vorgänge während der Entkopplungsphase.
- + Die Aufgaben sind sehr gut auf die fachlichen Grundlagen abgestimmt und bieten auch weiteres Anknüpfungspotential, zum Beispiel an die Thermodynamik oder auch an die Mathematik (speziell an die Differentialrechnung beim Bestimmen des Maximums der Energiedichteverteilung).
- Beim zweiten Experiment kann es vorkommen, dass die Materialien (Photoelement, empfindliches Strommessgerät) nicht an den Schulen vorhanden sind. Es könnte also sein, dass dieses Experiment nur nachgestellt wird und den Schülerinnen und Schülern Messdaten aus Protokollen vorgelegt werden müssen.

- Einige Aufgaben sind nur als Differenzierungsmaterial einzusetzen und damit nicht für alle Schülerinnen und Schüler geeignet.
- Es könnte etwas mehr Schülerbezug hergestellt werden, zum Beispiel in Form eines zusätzlichen Experiments. Die Lehrkräfte formulierten weiterhin, dass dies bei dem Thema naturgemäß schwierig zu bewerkstelligen und daher eine von ihnen leicht formulierte Kritik sei. Eventuell müsste man dieses Modul nur für die Schülerinnen und Schüler anbieten, die sehr großes Interesse an der Dunklen Materie haben, um die anderen nicht abzuschrecken.

Es bleibt insgesamt festzuhalten, dass Modul 2 eine sinnvolle Fortsetzung zu Modul 1 darstellt. Die Erprobung hat gezeigt, dass die Schülerinnen und Schüler dieses Modul etwas schlechter bewerten als das erste, insgesamt aber immer noch sehr positiv den thematischen Inhalten gegenüberstehen. Die Sicht der Lehrkräfte deckt sich hiermit. Es ist erneut positiv hervorgehoben worden, dass die zur Verfügung gestellten Materialien eine wertvolle Hilfestellung zur Vorbereitung der Lehrenden sind. Gerade dieser Aspekt war für die Entwicklung des Moduls für den Verfasser dieser Arbeit von besonderer Wichtigkeit, da in den vorherigen Erhebungen (siehe Kapitel 3.2.2) klar herausgestellt wurde, dass die Lehrkräfte ausführliches Material zur eigenen Vorbereitung benötigen. Die Entwicklung entsprechender Hilfestellungen, der fachlichen Einführungen und des Begleitmaterials für den Unterricht war für den Verfasser dieser Arbeit ein zentraler Auftrag.

6.5 Fazit

Im Rahmen des zweiten Moduls wurden verschiedene Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie thematisiert und elementarisiert, um weitere Anhaltspunkte für die Begründung der Dunklen Materie vermitteln zu können. Dabei wurden im ersten Teil die Entwicklungen im frühen Universum, speziell die Nukleosynthese und die Elemententstehung, behandelt und anhand einer Simulation die sich aus diesen Überlegungen ergebenden Massenanteile der Dunklen Materie an der Gesamtmasse des Universums numerisch und graphisch dargestellt. Somit kann Schülerinnen und Schülern im Unterricht die Größenordnung des Anteils der Dunklen Materie im Universum bewusst gemacht werden. Im zweiten Teil wurde die kosmische Hintergrundstrahlung, welche nach der Entkopplung von Photonen und Materie entstand, analysiert, und die Temperaturfluktuationen auf kleinen Skalen wurden als neuer Befund für die Existenz nicht-baryonischer Materie erkannt. Für die Darstellung im Unterricht wurde ein anschauliches Analogieexperiment zur Demonstration des Entkopplungsvorgangs entwickelt sowie die Messung eines Temperaturspektrums als zusätzliche Möglichkeit einer praktischen Einheit im Unterricht vorgestellt.

Die Erprobung hat gezeigt, dass die fachlichen Inhalte von den Schülerinnen und Schülern gut verstanden wurden. Die Auswertung ergab jedoch insgesamt etwas schlechtere Ergebnisse als bei Modul 1. Dies liegt nach Einschätzung des Autors vor allem an der gänzlich neuen Thematik. Sowohl die Kosmologie als solche als auch die Analyse thermodynamischer Prozesse sind im Unterricht zuvor in keinem anderen Zusammenhang behandelt worden. Vor diesem Hintergrund ist es umso erstaunlicher, dass durch die Elementarisierungen und praktischen Ansätze in Form von entwickelten Simulationen und Experimenten dennoch die grundlegenden Befunde aus der Kosmologie, die im Zusammenhang mit der Dunklen Materie stehen, vermittelt werden konnten. Aus motivationaler Sicht zeigt sich nach wie vor ein großes Interesse bei den Lernenden am Themengebiet der Dunklen Materie, was das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte abschließende Modul 3 legitimiert, auf welches in Kapitel 7 eingegangen wird. Neben den Schülereinschätzun-

gen ist in diesem Fall auch besonders die Sichtweise der Lehrkräfte von Bedeutung, da auch für diese das Themengebiet der Kosmologie in den meisten Fällen gänzlich neu ist. Befragungen ergaben, dass die im Rahmen dieses Moduls dargestellten fachlichen Grundlagen, historischen Entwicklungen, Anregungen zur Elementarisierung und Übertragung auf den Unterricht sowie das Begleitmaterial in Form von vertiefenden Aufgaben positiv beurteilt wurden. Die befragten Lehrkräfte äußerten sich positiv zur Strukturierung und Auswahl der Inhalte. Damit auch für die Lehrkräfte die Thematik der Dunklen Materie abgerundet wird, soll mit Modul 3 ein Abschluss gefunden werden, der nun neben den Befunden und Beobachtungen aus Gravitationsphysik und Kosmologie auch die noch offenen Fragen und die Kritik an der Dunklen Materie in Augenschein nimmt.

KAPITEL 7

Modul 3: Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie

Nachdem nun in den ersten beiden Modulen in hinreichendem Maße Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik und der Kosmologie als Belege für die Existenz Dunkler Materie angeführt wurden, sollen in diesem Modul die offenen Fragen und die Kritik an ihr thematisiert werden. Nach den bereits behandelten Inhalten ist klar, dass unsere heutige Physik womöglich nicht ausreicht, um das Wesen der Dunklen Materie zu deuten. Eine zwar nicht sehr häufig, aber dennoch von einigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern vertretene Meinung lautet, dass die Beobachtungsdaten etwa zu den Rotationskurven schlichtweg falsch interpretiert sind und Dunkle Materie dementsprechend gar nicht zwingend existieren muss [vgl. z. B. 128]. Diese Ansicht wird jedoch von der breiten Mehrheit nicht getragen, sodass mit den bislang vorgestellten Befunden eine Erklärung der Dunklen Materie gesucht wird. Hierbei können zwei mögliche Schlussfolgerungen in Betracht kommen. Entweder sucht man nach den elementaren Bestandteilen, aus welchen die Dunkle Materie besteht und kann damit sehr genau angeben, worum es sich bei dieser handelt, oder man hinterfragt die zugrundeliegende physikalische Theorie. Die elementaren Konstituenten könnten sowohl bekannte Teilchen sein, aber auch neue Elementarteilchen, welche im Standardmodell der Teilchenphysik so noch nicht vorkommen. Es wäre aber auch möglich, dass unser heutiges Verständnis von den Gegebenheiten in unserem Universum nicht ausreicht, um die Beobachtungen und Befunde zu erklären. Dies würde ein neues Verständnis der Physik, speziell von der Gravitation, bedingen. Beide Möglichkeiten sollen in diesem Modul thematisiert werden, sodass sich

die folgende Aufteilung ergibt:

- Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit Dunkler Materie,
- Kritik am Postulat der Dunklen Materie und alternative Erklärungsansätze.

Dazu werden, wie gehabt, zunächst die fachlichen Grundlagen sowie die historische Entwicklung beleuchtet, bevor dann auf die Übertragung zum Schulunterricht eingegangen wird und Materialien für den Unterricht bereitgestellt werden.

7.1 Lernziel dieses Moduls

Das zentrale Ziel dieses Moduls ist es, Vorstellungen davon zu vermitteln, welche grundlegenden Fragen bezüglich der vorgestellten Beobachtungen und Befunde aus Gravitationsphysik und Kosmologie noch nicht geklärt sind. Die Schülerinnen und Schüler sollen zunächst grundlegendes Wissen vermittelt bekommen, woraus Dunkle Materie bestehen könnte. Dies gelingt mit einem anschaulichen Analogieexperiment und einem vorbereiteten Strukturdiagramm. Des Weiteren sollen sie aber auch die Modifikation der zugrundeliegenden Gravitationstheorie kennen lernen, welche die Befunde ohne die Existenz der Dunklen Materie zu erklären versucht. Die wesentlichen Teillernziele sind die folgenden:

- Die Lernenden sind in der Lage, die einzelnen Komponenten der Dunklen Materie zu benennen und die möglichen Kandidaten an Objekten und Teilchen anzugeben, indem sie das Schema des vorbereiteten Strukturdiagramms nutzen.
- Die Lernenden können die Begründungszusammenhänge für Neutrinos als ursprünglich angenommenen Kandidat für heiße Dunkle Materie nachvollziehen und letztlich ausschließen, indem sie ein anschauliches Analogieexperiment durchführen.
- Die Lernenden werden in die Lage versetzt, die Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit der Dunklen Materie kritisch zu reflektieren, indem sie die Pro- und Contra-Argumente für die einzelnen Kandidaten gegenüberstellen.

- Die Lernenden können den Verlauf der gemessenen Rotationskurven (Modul 1) ohne die Existenz Dunkler Materie erklären, indem sie die Grundlagen der MOND-Theorie angeben und einen Bezug zur gemessenen Geschwindigkeit herstellen.
- Die Lernenden sind in der Lage, die MOND-Theorie kritisch zu hinterfragen, indem sie weitere Beobachtungen und Befunde, die sie im Laufe der bereits behandelten Module kennen gelernt haben, heranziehen und mit den Erklärungsmöglichkeiten durch die MOND-Theorie in Verbindung bringen.
- Die Lernenden können das neu Gelernte üben und vertiefen, indem sie Aufgaben lösen.

7.2 Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit Dunkler Materie

7.2.1 Fachliche Grundlagen

Um die Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit der Dunklen Materie nachvollziehen zu können, muss zunächst auf das heute gültige Modell eingegangen werden, in welchem die elementaren Teilchen ihren Eigenschaften nach geordnet werden. Dieses Modell, auch Standardmodell der Elementarteilchenphysik genannt, wird im folgenden Unterkapitel in den Blick genommen, bevor dann auf die zwei grundlegenden Bestandteile, die baryonische und die nicht-baryonische Dunkle Materie eingegangen wird.

Im Folgenden werden die fachlichen Grundlagen nicht vollumfänglich dargestellt, da eine zu tiefgehende Einführung in die Teilchenphysik den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde und auch aus didaktischen Gründen nicht sinnvoll erscheint. Der Bezug zu den astronomischen Befunden zur Dunklen Materie legitimiert an vielen Stellen eine verkürzte Darstellung der teilchenphysikalischen Grundlagen.

7.2.1.1 Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik

Nach der aktuellen Auffassung der Teilchenphysik unterscheidet man zwischen Fermionen, welche sich zu Materiebausteinen zusammensetzen können und Bosonen, durch welche die Wechselwirkungen initiiert werden. Die Fermionen lassen sich wiederum in Hadronen und Leptonen unterteilen, wobei die Leptonen bereits elementar sind. Hadronen wiederum bestehen aus Quarks. Je nach Zusammenschluss unterscheidet man hier zwischen Baryonen (drei Quarks) und Mesonen (Quark-Antiquark-Paar). Graphisch ist diese Untergliederung in Abbildung 7.1 dargestellt.

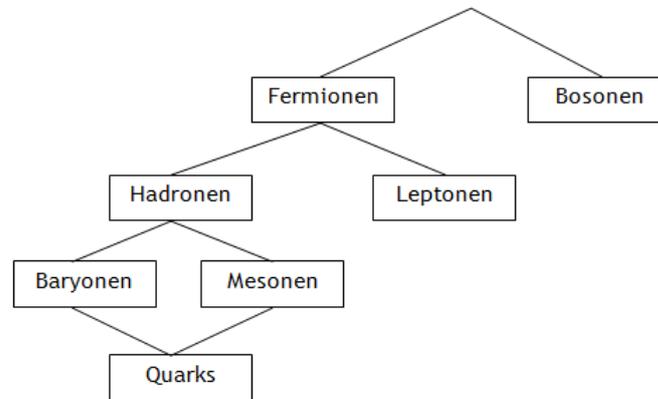


Abbildung 7.1: Diagramm zur Klassifikation der elementaren Teilchenstrukturen.

Insgesamt ergeben sich somit im Standardmodell der Elementarteilchenphysik drei Kategorien von Teilchen, die Quarks, die Leptonen sowie die Bosonen, wobei letztgenannte immer mit einer fundamentalen Wechselwirkung verknüpft sind. Tabelle 7.1 zeigt die grundlegende Struktur des Standardmodells der Elementarteilchenphysik.

In der Kosmologie wird das Elektron als Teil der Baryonen gesehen, auch wenn es nach den Vorstellungen der Teilchenphysik zu den Leptonen zählt. Hintergrund ist, dass bei der Unterscheidung zwischen Materie und Strahlung alle Bausteine der Materie einfachheitshalber als baryonisch angenommen werden. Da Protonen und Neutronen aufgrund ihrer Quark-Struktur (up-up-down beim Proton und up-down-down beim Neutron) ohnehin baryonischer Art sind, wird das Elektron dann dementsprechend mit hinzugezählt. Auch im Folgenden wird das Elektron als Baryon angesehen, wohlwissentlich, dass nach

	1. Familie	2. Familie	3. Familie
Quarks	up	charm	top
	down	strange	bottom
Leptonen	Elektron	Muon	Tau
	Elektron-Neutrino	Muon-Neutrino	Tau-Neutrino
	starke Wechselwirkung	schwache Wechselwirkung	elektromagn. Wechselwirkung
Bosonen	Gluonen	W^\pm, Z^0	Photon
			Gravitation
			Graviton (?)

Tabelle 7.1: Auflistung der elementaren Teilchen nach dem Standardmodell der Teilchenphysik. Oben sind die Quarks und Leptonen dargestellt. Sie gliedern sich in drei Familien auf. Unten sind die vier bekannten Wechselwirkungen mit den entsprechenden Eichbosonen dargestellt. Das Graviton ist jedoch nicht experimentell nachgewiesen worden.

dem Standardmodell der Teilchenphysik das Elektron eigentlich zu den Leptonen zählt. Wenn also im Folgenden von baryonischer Materie die Rede ist, so ist hiermit eine Materie gemeint, die sich aus Atomen zusammensetzt, also aus Protonen, Neutronen und Elektronen besteht.

7.2.1.2 Baryonische Dunkle Materie

Vorweg sei an dieser Stelle angemerkt, dass die baryonische Dunkle Materie nur einen kleinen Teil der Materie und der Gesamtdichte in unserem Universum ausmacht. An dieser Stelle sei noch einmal auf Modul 2 verwiesen, in welchem durch die Abschätzungen von Elementhäufigkeiten nach der primordialen Nukleosynthese die Anteile der einzelnen Materiearten abgeschätzt werden. Mit einer Simulation wurde gezeigt, dass die baryonische Materie nur etwa 5% der Gesamtdichte des Universums ausmacht. Der viel größere Anteil ist nicht-baryonischer Art. Von beiden Materiearten sind wiederum Anteile der Dunklen Materie zuzurechnen, sodass durch die vorgestellte Simulation das Verhältnis von baryonischer zu nicht-baryonischer Dunkler Materie mit 1 zu 7 berechnet

werden kann, vgl. Abbildung 6.9. Es muss also von vornherein klar sein, dass die Kandidaten für die baryonische Dunkle Materie nur einen Bruchteil der gesamten Dunklen Materie ausmachen können. Als Kandidaten kommen nur solche infrage, die atomare Strukturen aufweisen, also aus „gewöhnlicher“ Materie bestehen. Hierbei sind sowohl ausgedehnte Objekte, wie Gas und Staubwolken, als auch kompakte Objekte möglich. Eben solche werden in der Astronomie gerne mit dem Akronym Macho (MAssive Compact Halo Objects) bezeichnet.

Gas und Staubwolken

Dunkle Materie in Form von Gas oder Staubwolken müsste niedrige Temperaturen aufweisen, da sie sonst Strahlung emittieren würde. Da Dunkle Materie jedoch keine detektierbare Strahlung abzugeben scheint, müssen Gas und Staubwolken in kalter Form vorliegen und dürfen sich nicht aufheizen und auch kein Licht anderer Objekte reemittieren. Die Tatsache, dass allerdings knapp viermal so viel baryonische Dunkle Materie wie sichtbare Materie vorliegt, lässt darauf schließen, dass erhebliche Mengen an Gas und Staubwolken vorhanden sein müssen, sofern die baryonische Dunkle Materie ausschließlich aus Gas und Staubwolken bestünde. Die Tatsache, dass die Entstehung und die Entwicklung der Sterne sowie die der Galaxien eine Obergrenze setzt, lässt damit weitere Erklärungsansätze nötig werden.

Machos

Dunkle Materie in Form von schweren und gebundenen Objekten im galaktischen Halo kann nur in Form von nicht im sichtbaren Bereich leuchtenden Objekten existieren. Kandidaten wie Neutronensterne oder schwarze Löcher erscheinen hier wenig geeignet, da sie nach gängiger Vorstellung in der Astrophysik am Ende der stellaren Entwicklungsprozesse stehen. Auf die Theorie der primordialen schwarzen Löcher sei hier der Vollständigkeit halber hingewiesen. Diese gelten aber nach wie vor als sehr hypothetisch, wohingegen andere Kandidaten wie Braune Zwerge über Gravitationslinseneffekte bereits nachgewiesen worden sind [129]. Dennoch kann mit den bislang als Macho detektierten Braunen Zwergen keineswegs die gesamte Menge an baryonischer Dunkler Materie im galaktischen

Halo erklärt werden [130].

7.2.1.3 Nicht-Baryonische Dunkle Materie

Der weitaus größte Teil der Dunklen Materie scheint in nicht-baryonischer Form vorzuliegen. Hierbei muss es sich um freie Elementarteilchen handeln, die so gut wie ausschließlich gravitativ wechselwirken und eine Lebensdauer haben, die vom Betrag her deutlich größer sein muss als das bisherige Alter des Universums. Kandidaten für solche Elementarteilchen gibt es viele, wobei nahezu alle hypothetisch sind, also bislang nicht experimentell nachgewiesen wurden. Generell unterscheidet man zwischen heißer Dunkler Materie (HDM) und Kalter Dunkler Materie (CDM), was sich durch die hochrelativistische beziehungsweise nicht-relativistische Geschwindigkeiten der zugehörigen Teilchen begründet.

Heiße Dunkle Materie

Heiße Dunkle Materie kann nur einen geringen Teil der Dunklen Materie ausmachen. Würde nämlich die Dunkle Materie aus schnellen relativistischen Teilchen bestehen, würde dies bedeuten, dass aufgrund der in Modul 2 dargestellten Entwicklungen im frühen Universum die Fluktuationen in der Massendichte im Universum zunächst auf großen Skalen kollabiert wären. Durch die hohe Geschwindigkeit wären also zunächst große Strukturen entstanden, woraus sich dann im Laufe der Zeit kleinere Strukturen entwickelt hätten. Konkret bedeutet dies, dass in einem solchen Top-Down-Szenario erst Galaxienhaufen, dann Galaxien und Sterne entstanden wären. Dies ist jedoch durch die Altersbestimmung von Galaxien und Galaxienhaufen widerlegt. Dadurch, dass Galaxien größtenteils sehr alt sind und der Entstehungsprozess von Galaxienhaufen noch andauert, gilt das Bottom-Up-Szenario als das wahrscheinlichste. Dementsprechend haben sich zunächst Sterne gebildet, die dann für die Entstehung von Galaxien und diese wiederum für die Entstehung von Galaxienhaufen verantwortlich waren. Ein solches Szenario setzt aber in den frühen Entwicklungen des Universums nicht-relativistische Teilchen voraus, die die vorhandenen Materiedichteschwankungen lokal kollabieren lassen. Dementsprechend

muss die Dunkle Materie hauptsächlich aus nicht-relativistischen Teilchen bestehen, also kalte Dunkle Materie sein.

Ein weiterer Grund für den Ausschluss der Heißen Dunklen Materie ist die Tatsache, dass die nach dem Standardmodell der Teilchenphysik einzigen Teilchen, welche in Frage kommen, Neutrinos sind und diese zu wenig Masse aufweisen, um den Anteil nicht-baryonischer Dunkler Materie erklären zu können.

Da also, wenn überhaupt, nur ein kleiner Teil der nicht-baryonischen Dunklen Materie in heißer Form vorliegen kann, Neutrinos aber aufgrund ihrer zu geringen Masse nicht infrage kommen, sind schwerere Teilchen mit den gleichen Eigenschaften postuliert worden, die sogenannten sterilen Neutrinos [vgl. z. B. 131]. Diese wiederum sind rein hypothetisch, also nicht experimentell nachgewiesen.

Kalte Dunkle Materie

Ein wesentlicher Bestandteil wird somit kalte Dunkle Materie ausmachen, also Teilchen, welche sich nicht-relativistisch bewegen. Diese Teilchen sind mit dem Bottom-Up-Szenario zur Entwicklung des Universums vereinbar und dürfen nur gravitativ oder schwach wechselwirken. Des Weiteren müssen sie schwer und auch stabil sein, müssen also eine Lebenszeit haben, welche älter das Universum ist. Da sich im Standardmodell kein Teilchen finden lässt, was diese Eigenschaften erfüllt, postuliert man an dieser Stelle die sogenannten WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), hypothetische Elementarteilchen, welche die geforderten Eigenschaften aufweisen. Welcher Art diese WIMP-Teilchen sein könnten, ist unklar. Eine gängige Meinung ist jedoch, dass ein solches WIMP-Teilchen das leichteste supersymmetrische Neutralino sein könnte [132]. Die Theorie der Supersymmetrie ist jedoch auch noch nicht experimentell nachgewiesen, da bislang keine supersymmetrischen Teilchen gefunden wurden. Dennoch bietet diese Theorie viele Vorteile, gerade bei der Vereinigung der Wechselwirkungen zu einer grundlegenden Kraft. Als neue Symmetriegröße wird die R-Parität eingeführt, welche bei jedem Teilchen des Standardmodells den Wert $+1$ und bei den supersymmetrischen Partnerteilchen den Wert -1 annimmt. Ist diese Symmetriegröße erhalten, so weiß man, dass das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil ist. Das leichteste stabile Teilchen

unter den Neutralinos, auch LSP genannt (Lightest Supersymmetric Particle), gilt als wahrscheinlicher Kandidat für WIMPs [132].

Es wäre zudem möglich, dass die kalte Dunkle Materie aus Axionen, ebenfalls noch nicht experimentell nachgewiesenen Teilchen, besteht. Ursprünglich sind Axionen gar nicht im Zusammenhang mit Dunkler Materie postuliert worden, sondern zur Erklärung der CP-Verletzung in Prozessen der starken Wechselwirkung. Im Experiment ist in solchen Prozessen der starken Wechselwirkung die Symmetrieoperation CP erhalten, das heißt Teilchen und Antiteilchen können ineinander überführt werden und gleichzeitig die räumlichen Koordinaten gespiegelt werden. In der mathematischen Beschreibung der Quantenchromodynamik tauchen jedoch Terme auf, die diese Symmetrieoperation brechen. Die Existenz des Axions würde diesen Widerspruch zwischen Experiment und Theorie zunächst beheben. Das Axion gilt als exotischer Kandidat, hätte aber die geforderten Eigenschaften für eine Erklärung der Kalten Dunklen Materie [133].

7.2.2 Historische Entwicklung

Mögliche Erklärungsmodelle für Dunkle Materie gehen zurück bis zu den 60er Jahren. Es erscheint jedoch aufgrund der nach wie vor hohen Publikationsrate an Veröffentlichungen zu möglichen Teilchen und der damit einhergehenden Erklärung bestimmter Anteile der Dunklen Materie wenig sinnvoll, die einzelnen Entwicklungen im Detail zu betrachten. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die historische Entwicklung der Naturwissenschaften im Allgemeinen sehr kompliziert verläuft. Viele Vermutungen und entwickelten Ansätze stellen sich später als Fehler oder Irrtum heraus. Gerade solche Entwicklungen werden hier nicht alle im Detail berücksichtigt, sondern lediglich die aus heutiger Sicht wesentlichen Entwicklungsschritte vorgestellt.

Zu den bereits früh vermuteten Teilchen, die als Bestandteil der Dunklen Materie infrage kommen, zählen die Neutrinos. Bereits 1966 gingen Yakov Borisovich ZEL'DOVICH und Semen Solomonovich GERSHTEIN davon aus, dass massive Neutrinos einen größeren Beitrag zur Massendichte des Universums leisten könnten [134]. Genauere Untersuchun-

gen und Überlegungen hierzu wurden in den folgenden Jahren immer wieder diskutiert. Jedoch war häufiger Kritikpunkt und damit gleichermaßen Ausgangspunkt für neue theoretische Ansätze die bis dahin unbekannte, aber nahezu verschwindend geringe Masse der Neutrinos. Martin John REES schrieb hierzu 1977:

„There are other possibilities of more exotic character – for instance the idea of neutrinos with small (few eV) rest mass has been taken surprisingly seriously by some authors.“ [135]

Mit ersten Abschätzungen zur Neutrinomasse im Rahmen des Standardmodells der Kosmologie befassten sich 1977 Benjamin Whisoh LEE und Steven WEINBERG [136]. Das zuvor bereits von ZEL'DOVICH und GERSHTEIN angegebene obere Limit der Neutrinomasse von 10^{-34} kg [134], konnte von LEE und WEINBERG um etwa eine Zehnerpotenz nach unten korrigiert werden. Diese kleine Masse erwies sich als zu klein, um die gesamte Masse der Dunklen Materie erklären zu können. Da jedoch die Neutrinos mit ihren Wechselwirkungseigenschaften die Anforderungen an Teilchen der Dunklen Materie erfüllen, ließ dies die zunehmend ernster genommene Hypothese zu, dass Dunkle Materie aus schweren Neutrinos bestehen könnte. Scott TREMAINE und James GUNN schrieben hierzu 1979:

„[...] we conclude that the „missing mass“ in clusters does not consist of leptons of mass ≤ 1 MeV (e.g., muon or electron neutrinos). LEE and WEINBERG's hypothetical heavy leptons (mass ≤ 1 GeV) are not ruled out by this argument.“ [137, S. 407]

Mit den ersten kosmologischen Beobachtungen und den sich daraus ergebenden Annahmen über die Entwicklung des Universums kam jedoch auch Kritik an den Neutrinos als mögliche Kandidaten für die Dunkle Materie auf. Durch die Erkenntnisse zur Entstehung und Entwicklung der Galaxien und zu dem damit verbundenen Bottom-Up-Szenario war klar, dass Neutrinos und auch die hypothetischen schweren Neutrinos nur einen kleinen Teil der Dunklen Materie ausmachen können, da der weitaus größte Teil aus Teilchen

mit deutlich niedrigerer Geschwindigkeit bestehen muss. 1984 übten bereits Marc DAVIS, Carlos FRENK und Simon WHITE scharfe Kritik an der Neutrino-Hypothese.

„We have simulated the nonlinear growth of structure in a universe dominated by massive neutrinos using initial conditions derived from detailed linear calculations of earlier evolution. [...] The conventional neutrino-dominated picture appears to be ruled out.“ [138, S. L1]

Einigkeit herrschte jedoch in der Annahme von schweren Teilchen, die nur der Gravitation und der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Da sich die Teilchen nach Betrachtung der kosmologischen Prozesse des frühen Universums mit nicht-relativistischer Geschwindigkeit bewegen müssen, nahm man schwach-wechselwirkende massive Teilchen an, auch WIMPs genannt [vgl. z. B. 139]. Diese müssen nach den Vorstellungen der Elementarteilchenphysik instabil sein, wobei am Ende der Zerfallskette das leichteste supersymmetrische Teilchen (LSP), das stabile Neutralino, stehen sollte. Für den Nachweis der zerfallenden WIMPs stehen sowohl direkte Messmethoden durch Stöße mit anderen Materieteilchen als auch indirekte Messmethoden über Annihilation oder Zerfall der Teilchen zur Verfügung. Der Nachweis der WIMPs ist derzeit von großem Interesse. Aktuell existieren unter anderem mit der XENON-Kollaboration im Laboratori Nazionale del Gran Sasso (LNGS) mehrere Detektoren, mit denen WIMPs nachgewiesen werden sollen [140]. 2017 wurden die ersten Ergebnisse des Detektors XENON1T vorgestellt [141]. Ein direkter Nachweis der WIMPs steht aber bis heute noch aus.

Parallel zu den Theorien um WIMP-Teilchen verfestigten sich ab Ende der 70er Jahre auch Hinweise darauf, dass die eigentlich zur Lösung des CP-Problems in der starken Wechselwirkung postulierten Axionen Teilchen der Dunklen Materie sein könnten. Zunächst als Pseudoteilchen wurden die später als Axionen bezeichneten Teilchen 1977 von Roberto Daniele PECCEI und Helen Rhoda QUINN in die wissenschaftlichen Vorstellungen aufgenommen [142]. Aufbauend auf den 1983 von Pierre SIKIVIE vorgestellten Überlegungen zu experimentellen Nachweisen der Axionen, wurde 1995 das Axion Dark Matter Experiment (ADMX) entwickelt. Bis heute wird durch die Erweiterung um immer empfindlichere Detektoren [143] versucht, Axionen im galaktischen Halo nachzuweisen

[144, 145].

Mehr oder weniger parallel zu den Teilchenhypothesen und der Entwicklung von Experimenten zum Nachweis von WIMPs wurden auch baryonische Kandidaten für die Dunkle Materie in Form von Machos in Betracht gezogen. 1986 regte Bohdan PACZYŃSKI an, eben solche Machos im Halo der Milchstraße über den Mikrolinseneffekt nachzuweisen [146]. Anfang der 90er Jahre starteten mehrere internationale Forscherteams, welche nach Mikrolinseneffekten in der LMC und später auch in der Milchstraße über mehrere Jahre hinweg suchten [147]. Es wurde jedoch schnell klar, dass durch die geringe Anzahl an den über mehrere Jahre hinweg beobachtbaren Mikrolinseneffekten die Machos in zu geringer Zahl vorkommen als dass sie den Anteil der Dunklen Materie an der Materiedichte des Universums erklären könnten [148].

7.2.3 Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion

Die unterrichtliche Umsetzung dieses Moduls bietet sich ausschließlich für die letzten Jahre der gymnasialen Oberstufe an, da die Schülerinnen und Schüler Kenntnisse zur Elementarteilchenphysik vorweisen müssen. Von besonderem Interesse kann das Neutrino als möglicher Kandidat für die Dunkle Materie sein, da es historisch das erste Teilchen war, welches konkret in Verbindung mit der Dunklen Materie gebracht wurde. Da die Dunkle Materie weitläufig verteilt ist und damit ein großes Volumen einnimmt, kann dies durch kleine und damit schnelle Teilchen gut simuliert werden. In der hier vorliegenden Arbeit wird dies zum Anlass genommen, um mit einer Schüttelmaschine, wie sie in den Physik-Sammlungen von Schulen häufig zu finden sein wird (vgl. Abbildung 7.2), die Verteilung von kleinen und schnellen Teilchen im Vergleich zu großen und langsamen Teilchen in einem abgeschlossenen Raumbereich nachzustellen. Die Schüttelmaschine wird im Physikunterricht hauptsächlich im Bereich der Thermodynamik für die Messung der MAXWELL'schen Geschwindigkeitsverteilung eingesetzt. Das Experiment hier besteht darin, die Verteilung von Kugeln in Abhängigkeit von der jeweils eingefüllten Kugelart zu analysieren. Dabei kann die erreichte Höhe der Teilchen ebenso mit der aus der Thermodynamik bekannten barometrischen Höhenformel verknüpft werden. Die Kugeln

in der Schüttelmaschine befinden sich zwar nicht im thermodynamischen Gleichgewicht, näherungsweise wird die Verteilung der Kugeln auf den entsprechenden Höhenlinien aber der BOLTZMANN-Verteilung entsprechen.

Konkret im Anwendungskontext der Dunklen Materie soll das Experiment aber vielmehr ein anschaulicher Zugang für ein Verständnis der historischen Entwicklung und der notwendig werdenden Forderung nach massereichen Neutrinos sein. Dabei wird die Verteilung unterschiedlich schneller und schwerer Teilchen mit unterschiedlich großen Plastikugeln simuliert. Im Folgenden wird das Experiment mit sehr kleinen und im Vergleich recht großen Kugeln durchgeführt. Die Wahl der verwendeten Kugelgrößen muss von der jeweiligen Sammlung und auch dem Volumen der verwendeten Schüttelmaschine abhängig gemacht werden.

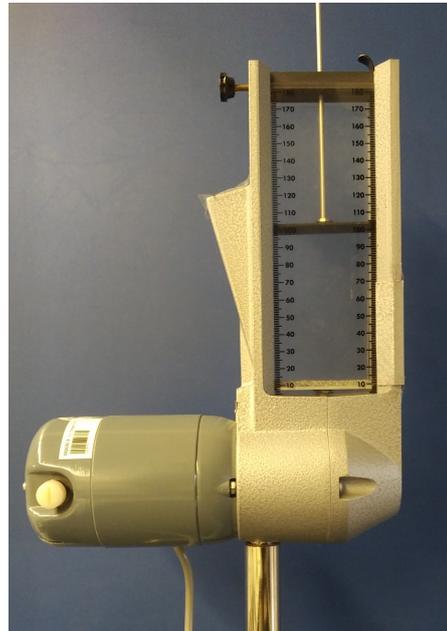


Abbildung 7.2: Schüttelmaschine der Firma Leybold Didactic.

Die eingefüllten Kugeln liegen dabei zunächst innerhalb des Füllraumes unten auf dem Boden. Die Bodenplatte kann durch einen Motor auf- und abbewegt werden, sodass die Kugeln selbst auch in Bewegung versetzt werden. Die Stärke dieser Rüttelbewegung der Bodenplatte wird über die Spannung des Motors reguliert, der die Rüttelbewegung verursacht. Während die großen und damit langsamen Kugeln bei einer fest eingestellten Spannung an der Schüttelmaschine nur einen geringen Raumbereich ausfüllen, füllen kleine Kugeln, die eine deutlich höhere Geschwindigkeit aufweisen, bei der gleichen Spannung einen erkennbar größeren Raumbereich aus. Dies würde also darauf hindeuten, dass die Dunkle Materie aus kleinen und damit schnellen Teilchen bestehen müsste. Allerdings wird beim Nachmessen der Masse deutlich, dass die kleinen Kugeln eine insgesamt zu geringe Masse aufweisen. Bei einer im Vergleich zu den großen Kugeln etwa doppelt so

großen Verteilung im Raum liegt dennoch bei den hier verwendeten Kugeln nur in etwa die Hälfte der Masse vor. Damit das Massenproblem gelöst werden kann, benötigt man zwar kleine und schnelle, aber eben auch massereiche Teilchen.

Die Lernenden können damit leicht nachvollziehen, dass die Forderung nach massiven Neutrinos, die sich bis heute hält, eine gute Erklärung für die heiße Dunkle Materie sein kann.

Die Tatsache, dass die Geschwindigkeit der Kugeln ein Analogon zur Temperatur der Dunklen Materie darstellt, ist für die Vermittlung im Schulunterricht ebenfalls ein sinnvoller Bezugspunkt.

Des Weiteren sollte im Unterricht aber auch ein genereller Blick auf die möglichen Kandidaten für Dunkle Materie geworfen werden. Konkret sollte im Unterricht die Kategorisierung der Dunklen Materie in einen baryonischen und einen nicht-baryonischen Anteil Grundlage für eine weitere Strukturierung und eine Auflistung der möglichen Kandidaten sein. Dabei sollte auch eine Pro- und Contra-Diskussion stattfinden, sodass die bislang noch offenen Fragen deutlich werden und den Schülerinnen und Schülern auch die Legitimation für die weitere Forschung erkennen. Durch eine tabellarische Darstellung erreicht man eine übersichtliche und gleichermaßen umfangreiche Auflistung aller wesentlichen Aspekte. Aufgabe wird es für die Lernenden sein, die fachlichen Grundlagen in einer gegebenen Struktur zu ordnen und anschließend eine Bewertung vorzunehmen. Für die Lehrkraft gilt, dass vorrangiges Ziel neben der Vermittlung des fachlichen Wissens auch das weitere Initiieren von Interesse sein muss. Die Schülerinnen und Schüler werden mit diesem Modul nachhaltig motiviert werden, aktuelle Forschungsergebnisse wahrzunehmen und in die Lage versetzt, diese einordnen zu können und somit das Thema der Dunklen Materie als nicht abgeschlossen zu betrachten, sondern vielmehr als nach wie vor hochaktuelles Gebiet der modernen Physik zu begreifen.

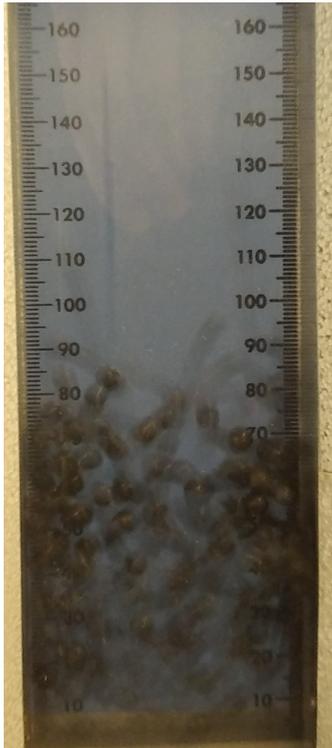
7.2.4 Anschauungsexperiment und Strukturdiagramm

7.2.4.1 Analogieexperiment zur Veranschaulichung der weitläufigen Verteilung heißer Dunkler Materie

In eine Schüttelmaschine werden zunächst größere Kugeln eingefüllt und die Verteilung der Kugeln im Sichtfenster bei einer fest eingestellten Spannung beobachtet. Es ist darauf zu achten, dass nicht zu viele Kugeln eingefüllt werden, da sonst die Schüttelplatte durch den Motor nicht mehr in Bewegung versetzt werden kann, ohne dass die Maschine insgesamt zu rütteln anfängt. Anhand der Verteilung der Kugeln stellt man schnell fest, dass die Kugeln keinen besonders großen Raumbereich abdecken. Sie erreichen nur eine geringe Höhe und verteilen sich innerhalb dieser Querschnittsfläche nicht gleichmäßig. Die Kugeln werden anschließend gewogen und das Experiment mit kleineren Kugeln wiederholt. Es wurden in etwa so viele kleine Kugeln eingefüllt, dass die Schüttelmaschine noch ohne starke Eigenvibration läuft und bei gleicher Rüttelspannung im Mittel etwa die doppelte Höhe erreicht wird. Die Kugeln verteilen sich innerhalb dieses Raumbereichs deutlich gleichmäßiger, was mit dem bloßen Auge gut erkennbar ist. Das erneute Nachwiegen ergibt jedoch eine Masse, welche ungefähr die Hälfte des zuvor gemessenen Wertes beträgt. In Abbildung 7.3 sind zwei exemplarische Aufnahmen der Schüttelmaschine dargestellt, welche die Verteilung der großen und kleinen Kugeln zeigen. Tabelle 7.2 sind die entsprechenden Kenndaten zu entnehmen bezüglich der erreichten Höhe, der Verteilung sowie der eingefüllten Masse an Kugeln.

	Große Kugeln		Kleine Kugeln
Erreichte Höhe	~ 8 cm	↗	~ 15 cm
Verteilung	ungleichmäßig	↗	i.V. gleichmäßiger
Masse der eingefüllten Kugeln	~ 34 g	↘	~ 18 g

Tabelle 7.2: Auflistung der einzelnen Parameter im Vergleich zwischen den großen und den kleinen Kugeln in der Schüttelmaschine.



(a) Verteilung der großen Kugeln.



(b) Verteilung der kleinen Kugeln.

Abbildung 7.3: Durchführung des Analogieexperiments mit der Schüttelmaschine zur Verdeutlichung der Gründe für die Postulation massiver Neutrinos. Beide Bilder sind exemplarisch und dienen nicht zur Auswertung, sondern nur zur Veranschaulichung der Durchführung.

Man erkennt anhand der anschaulich ermittelten Werte in Tabelle 7.2, dass bei etwa der doppelten Höhe nur die Hälfte der Masse an Kugeln in der Schüttelmaschine vorhanden ist. Da die Verteilung aber deutlich gleichmäßiger erfolgt, liegt der Schluss nahe, dass im realen Kontext die heiße Dunkle Materie zwar einerseits aus kleinen und damit schnellen Teilchen bestehen muss, die Masse jedoch nicht ausreichend ist. Diese Erkenntnis führt dazu, dass massive Teilchen in Betracht kommen, die aber die gleichen Eigenschaften wie die leichten, schnellen Teilchen haben müssen. Schülerinnen und Schülern kann so anschaulich verständlich gemacht werden, wie die Forderung nach massiven Neutrinos zustande gekommen ist.

7.2.4.2 Strukturdiagramm zur Einordnung der verschiedenen Kandidaten für Dunkle Materie

Die Aufgabe im Schulunterricht sollte sein, die Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit der Dunklen Materie systematisch und übersichtlich darzustellen. Diese Aufgabe kann in Form eines Arbeitsauftrags an die Schülerinnen und Schüler ausgegeben werden. Es ist jedoch auch möglich, die Systematik und Ordnung im Plenum schrittweise gemeinsam zu erarbeiten. Eine denkbare Systematik wird nachfolgend dargestellt und kann als Vergleich oder Orientierung für die Lehrkraft dienen. Es wird dabei zunächst zwischen baryonischer und nicht-baryonischer Dunkler Materie unterschieden. Anschließend erfolgt in tabellarischer Anordnung eine erneute Aufspaltung der baryonischen Dunklen Materie in Gas und Staubwolken sowie Machos. Bei der nicht-baryonischen Materie wird zwischen heißer und kalter Dunkler Materie unterschieden. In den sich so ergebenden Rubriken erfolgen dann Ausführungen zu den jeweiligen Kandidaten mit den entsprechenden Schlussfolgerungen zum Massenanteil an der Gesamtmasse der Dunklen Materie.

Baryonische DM		Nicht-baryonische DM	
\leftarrow	\rightarrow	\leftarrow	\rightarrow
Gas, Staubwolken	Machos	HDM	CDM
↓	↓	↓	↓
Es wäre eine große Menge nötig, um den Massenanteil baryonischer DM zu erklären.	Bereits nachgewiesen durch Gravitationslinseneffekte sind Braune Zwerge.	Es müssten relativistische Teilchen sein. Einzige Kandidaten nach dem SMTP: Neutrinos.	Es müssten schwere und stabile Teilchen sein, die nur gravitativ und schwach wechselwirken.
↓	↓	↓	↓
Widerspruch zu den Erkenntnissen zur Sternentstehung und -entwicklung.	Anzahl der Machos zu gering, um Masse an baryonischer DM zu erklären.	Widerspruch zur Erklärung der Strukturentstehung (Bottom-Up-Szenario).	Problem: Es gibt (bislang) kein passendes Teilchen im SMTP.
↓	↓	↓	↓
Damit ist nur ein kleiner Teil der BDM erklärbar.	Damit ist nur ein kleiner Teil der BDM erklärbar.	Außerdem: Neutrinos haben eine viel zu geringe Masse.	Ausweg: Postulation neuer Teilchen: WIMPs, Axionen.
		↓	↓
		Neutrinos bilden nur einen kleinen Teil der nicht-baryonischen DM.	Ein Kandidat für ein WIMP wäre das leichteste und damit stabile Neutralino (LSP). \rightarrow stützt die SUSY-Theorie. Axionen würden die CP-Verletzung der starken WW erklären.
		↓	↓
		Mögliche Lösung: sterile Neutrinos (?)	WIMPs und Axionen sind rein hypothetisch und (noch?) nicht nachgewiesen.

Tabelle 7.3: Vorlage einer möglichen systematischen Darstellung der Kandidaten für baryonische und nicht-baryonische Dunkle Materie.

7.2.5 Vertiefende Aufgaben für den Unterricht

1. *Erläutern Sie, warum Neutrinos nach wie vor als Kandidat für die Heiße Dunkle Materie gelten, aber dennoch keines der im Standardmodell der Teilchenphysik aufgeführten Neutrinos infrage kommt.*

Lösung: Heiße Dunkle Materie besteht aus schnellen Teilchen. Im Standardmodell der Teilchenphysik sind Neutrinos die schnellsten Teilchen, da sie sich aufgrund ihrer geringen Masse mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen. Sie erfüllen damit die Anforderung an die Geschwindigkeit, sind aber viel zu leicht. Für Neutrinos gelten nach aktuellen Messungen Massen von unter $2 \cdot 10^{-36}$ kg [149]. Dies ist zu wenig, um selbst mit riesigen Mengen an den bislang bekannten Neutrinos den Anteil der Dunklen Materie erklären zu können. Man bräuchte also Neutrinos, die eine höhere Masse aufweisen. Da diese jedoch bislang nicht detektiert wurden, bleibt zum jetzigen Zeitpunkt nur festzustellen, dass keines der im Standardmodell aufgeführten Neutrinos für die Dunkle Materie infrage kommt.

2. *Fassen Sie zusammen, welche Kandidaten für die Kalte Dunkle Materie diskutiert werden. Welche davon sind bereits nachgewiesen?*

Lösung: Für die Kalte Dunkle Materie gibt es im Wesentlichen zwei mögliche Kandidaten, die WIMPs, ein Sammelbegriff für schwach wechselwirkende und massereiche Teilchen, oder die Axionen. Hierbei handelt es sich um Teilchen, die eigentlich für die Erklärung der CP-Verletzung der starken Wechselwirkung angenommen wurden, deren Eigenschaften aber durchaus auch zu denen eines möglichen Teilchens passen, mit welchen die Kalte Dunkle Materie erklärt werden kann. Axionen sind bislang nicht nachgewiesen worden. Bei den WIMPs stellt sich zunächst die Frage, was für Teilchen dies sein könnten.

Gängige Meinung ist hier das leichteste stabile Neutralino, welches nach der Supersymmetrie-Theorie existieren müsste. Auch dies ist bislang nicht nachgewiesen.

3. *Erklären Sie, warum die Kalte Dunkle Materie eine so große Rolle bei der Frage nach der Struktur der Dunklen Materie insgesamt spielt.*

Lösung: Die Kalte Dunkle Materie ist allein deswegen von so großer Bedeutung, da sie zur nicht-baryonischen Materie gehört und diese einen deutlich größeren Anteil ausmacht als die baryonische Dunkle Materie. An dieser Stelle sei auf die Simulation in Modul 2 verwiesen. Der relative Anteil der nicht-baryonischen Dunklen Materie im Vergleich zur baryonischen Dunklen Materie beträgt in etwa sieben Mal so viel.

4. Dass in der Physik etwas vorhergesagt oder postuliert wird, obwohl es noch nicht nachgewiesen wurde, ist keineswegs ungewöhnlich.

Finden Sie analoge Beispiele und stellen Sie die Analogie zur Postulation von WIMPs oder Axionen dar.

Lösung: Gerade in der Teilchenphysik ist es häufig so, dass ein Teilchen vorhergesagt oder postuliert wird, bevor man es real nachgewiesen hat. Beispielhaft sei hier auf das Graviton verwiesen, welches im Standardmodell der Teilchenphysik häufig mit aufgeführt wird, aber bis heute nicht nachgewiesen wurde. Dass es dennoch existieren muss, ist recht sicher, da die Gravitation eine der Grundkräfte in der Physik darstellt und bislang jede Grundkraft ein Eichboson als Austauschteilchen vorweisen kann. Ein anderes bekanntes Beispiel ist das Higgs-Boson, welches als Erklärung für die Masse von Teilchen im Jahr 1964 von drei Forscherteams theoretisch vorhergesagt wurde [150, 151, 152]. Der eigentliche Nachweis erfolgte dann erst 2012 bzw. 2013 [153, 154].

Historisch noch weiter zurückliegend, kann an dieser Stelle auch die Postulation des Neutrinos durch Wolfgang PAULI im Jahr 1930 angeführt werden [155], welches er zunächst als Neutron bezeichnete. Der tatsächliche Nachweis gelang erst im Jahr 1956 [156].

Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch der Verweis auf die zugrundeliegende Erkenntnismethode der Physik. In Kapitel 4.3.1 wurde auf die Experimentelle Methode als die Methode der Erkenntnisgewinnung eingegangen. Demnach erfolgt der experimentelle Nachweis grundsätzlich nach der theoretischen Vorhersage. Zunächst wird also etwas hypothetisch angenommen und anschließend wird durch das Experiment die Theorie entweder widerlegt oder als wahrscheinlich geltend angenommen. Dass also im Bereich der Dunklen Materie Axionen und WIMPs postuliert werden, ist keineswegs unüblich, sondern vielmehr der „normale“ Gang in der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung.

5. *Begründen Sie, warum sich mit „normalen“ lichtschwachen Objekten, die für uns nicht sichtbar sind, das Phänomen der Dunklen Materie nicht erklären lässt.*

Lösung: Unter „normalen“ lichtschwachen Objekten sind solche zu verstehen, die baryonischer Art sind und somit zu den Machos zählen. Die Anzahl der hier detektierbaren Kandidaten, zum Beispiel in Form von Braunen Zwergen, ist zu gering, als dass der Anteil der gesamten Dunklen Materie erklärt werden könnte. Zudem sprechen kosmologische Befunde klar für einen deutlich höheren Anteil nicht-baryonischer Dunkler Materie (siehe Modul 2).

7.3 Kritik an der Dunklen Materie und alternative Erklärungsansätze

7.3.1 Fachliche Grundlagen

Dadurch, dass sich die Suche nach Teilchen, die als Kandidaten für die Dunkle Materie infrage kommen, als äußerst schwierig herausstellt und bislang noch kein Nachweis von Teilchen, die zur heißen oder kalten Dunklen Materie zählen, erbracht werden konnte, ist die Kritik am Konzept der Dunklen Materie als Lösung der Befunde und Beobachtungen aus Gravitationsphysik und Kosmologie durchaus verständlich. An dieser Stelle sollen die alternativen Erklärungsansätze hinsichtlich ihrer Tragweite und Stichhaltigkeit in den Blick genommen werden. Die Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik könnten einerseits mit dem Vorhandensein einer zusätzlichen unsichtbaren Materie (siehe Modul 1) erklärt werden, jedoch auch mit einer modifizierten Theorie der zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten, auf die nachfolgend eingegangen wird. Es folgt dabei zunächst die Vorstellung dieser Theorie und im Anschluss eine kritische Analyse.

7.3.1.1 Modifizierte Newton'sche Dynamik

Eine bekannte Variante der Veränderung der zugrundeliegenden physikalischen Theorie im Rahmen der Deutung der Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik ist die modifizierte NEWTON'sche Dynamik (MOND). Nach den Grundgesetzen der klassischen Mechanik ist für die Veränderung des Bewegungszustandes eines Körpers eine Kraft verantwortlich. Deutlich wird dies im zweiten NEWTON'schen Axiom, nach welchem gilt:

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = \frac{d}{dt} \vec{p} = \frac{d}{dt} (m\vec{v}) \quad . \quad (7.1)$$

Für konstante Massen folgt dann das bekannte Resultat

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d}{dt} \vec{v} = m \vec{a} \quad . \quad (7.2)$$

Der grundlegende Ausgangspunkt der MOND-Theorie besteht in der Annahme, dass eben diese Gesetzmäßigkeiten nur für Beschleunigungen oberhalb einer Grenzbeschleunigung a_0 gelten. Für sehr kleine Beschleunigungen, also solche unterhalb von a_0 , wird eine Modifikation eingeführt, die für große Beschleunigungen wiederum vernachlässigbar ist, sodass die Grundgesetze der klassischen Mechanik in Kraft bleiben können. Diese Modifikation soll folgendermaßen aussehen [157]:

$$\vec{F} = m \cdot \mu(z) \cdot \vec{a} \quad . \quad (7.3)$$

Dabei ist die Modifikationsfaktor μ eine Funktion der Beschleunigung und der Grenzbeschleunigung. Ist das Argument z von μ größer als 1, so soll $\mu(z) \approx 1$ gelten. Erst wenn das Argument von μ kleiner als 1 wird, soll sich die Modifikation bemerkbar machen. Es soll dann $\mu(z) \approx z$ gelten. Dies lässt die Vermutung zu, dass das Argument z der Quotient von Beschleunigung zu Grenzbeschleunigung sein kann [157], da so die Modifikation erst unterhalb der Grenzbeschleunigung bemerkbar wird.

$$\vec{F} = m \cdot \mu\left(\frac{|\vec{a}|}{a_0}\right) \cdot \vec{a} \quad . \quad (7.4)$$

Welche Funktion allerdings durch μ beschrieben wird, ist unklar. In der Literatur diskutiert werden Funktionen wie

$$\mu\left(\frac{|\vec{a}|}{a_0}\right) = \frac{\frac{|\vec{a}|}{a_0}}{1 + \frac{|\vec{a}|}{a_0}} \quad \text{oder} \quad \mu\left(\frac{|\vec{a}|}{a_0}\right) = \frac{\frac{|\vec{a}|}{a_0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{|\vec{a}|}{a_0}\right)^2}} \quad [158]. \quad (7.5)$$

Unabhängig davon, wie die Funktion von μ tatsächlich aussieht, lässt sich aus diesen Annahmen schlussfolgern, dass die Geschwindigkeit von Objekten mit großem Abstand vom Galaxiezentrum konstant sein muss. Damit hätte man den flachen Verlauf der Ro-

tationskurven erklärt, der ja dem klassischen KEPLER-Abfall widersprechen würde.

Setzt man die Gravitationskraft mit der Kraft aus dem modifizierten Grundgesetz gleich und berücksichtigt, dass Objekte bei großen Abständen vom Galaxiezentrum nur kleine Beschleunigungen erfahren, also $\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \approx \frac{a}{a_0}$ gilt, so folgt:

$$G \cdot \frac{mM}{r^2} = m \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \cdot a \quad (7.6)$$

$$\Leftrightarrow G \cdot \frac{M}{r^2} = \frac{a^2}{a_0} \quad (7.7)$$

Dabei sei an dieser Stelle bereits angemerkt, dass das Kürzen der Masse m , um Gleichung 7.7 zu erhalten, nur dann möglich ist, wenn die im Gravitationsgesetz stehende schwere Masse m gleich der im modifizierten zweiten NEWTON'schen Axiom stehenden trägen Masse m ist. Hierauf wird später noch einmal eingegangen.

Durch Gleichsetzen von Zentripetalkraft und $F = Ma$ erhält man wiederum $a = \frac{v^2}{r}$ als Beziehung zwischen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Radius eines kreisförmig bewegten Objektes. Unter der Annahme, dass sich ein Stern um die Galaxienmitte kreisförmig bewegt, lässt sich Gleichung 7.7 umformulieren zu:

$$G \cdot \frac{M}{r^2} = \frac{v^4}{r^2 a_0} \quad (7.8)$$

Umgestellt nach der Geschwindigkeit v folgt dann:

$$v = \sqrt[4]{GMa_0} \quad (7.9)$$

Die Geschwindigkeit scheint also nur von der Gravitationskonstanten G , der Masse M der Galaxie sowie der Grenzbeschleunigung a_0 abzuhängen. Da alle diese Parameter als konstant betrachtet werden können, gilt folglich, dass die Geschwindigkeit unter den Voraussetzungen für diese Modifikation ebenfalls einen konstanten Wert annimmt. Dies würde das in Modul 1 beschriebene Problem der gemessenen flachen Rotationskurven lösen. Eine Erweiterung der MOND-Theorie unter Einbeziehung relativistischer Effekte ist die Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie (TeVeS). Diese definiert die Gravitation

in einem bestimmten Abstand mittels eines Tensors, eines Vektors und eines Skalars und nicht wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie angenommen nur mit einem Tensor. Die infolgedessen modifizierte Metrik der Relativitätstheorie bewirkt zusätzliche Terme für die Gravitationswirkung. Für eine detaillierte Lektüre sei hier auf [159] verwiesen.

7.3.1.2 Weitere Modifikationsmöglichkeiten

Neben der Modifikation des zweiten NEWTON'schen Axioms sind auch andere Modifikationen denkbar, um die Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik zu erklären. So kann etwa eine Unterscheidung von träger und schwerer Masse bei der Herleitung der Geschwindigkeits-Radius-Beziehung zur Erklärung des flachen Verlaufs der Rotationskurven führen. Aus dem bekannten Ansatz des Gleichsetzens von Gravitationskraft und der Kraft, die aus dem zweiten NEWTON'schen Axiom folgt, ergibt sich:

$$G \cdot \frac{m_s M}{r^2} = m_t \cdot a = m_t \cdot \frac{v^2}{r} \quad . \quad (7.10)$$

Dabei ist m_s im Gravitationsgesetz als schwere Masse und m_t im zweiten NEWTON'schen Axiom als träge Masse zu verstehen. Die unterschiedliche Interpretation des Massenbegriffs bewirkt an dieser Stelle, dass hier nicht direkt gekürzt werden kann. Umgestellt nach v folgt

$$v = \sqrt{GM \cdot \frac{m_s}{m_t} \cdot \frac{1}{r}} \quad . \quad (7.11)$$

Wenn nun der Quotient aus schwerer und träger Masse ungleich Eins ist, muss diese Formel neu interpretiert werden. Wird das Verhältnis von träger zu schwerer Masse als sehr klein angenommen, so wird dem $\sqrt{\frac{1}{r}}$ -Abfall entgegengewirkt, sodass bei großen Abständen r für die Geschwindigkeit $v = \text{const.}$ gilt. Damit kann der flache Verlauf der Rotationskurven erklärt werden.

Des Weiteren wäre auch denkbar, das Gravitationsgesetz selbst zu modifizieren, sodass hier bereits ein vom Abstand oder von der Geschwindigkeit abhängiger Faktor $\eta(r, v)$

mit bedacht wird. Hieraus ergäbe sich dann der Ansatz

$$G \cdot \frac{mM}{r^2} \cdot \eta(r, v) = m \cdot a = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad . \quad (7.12)$$

Umgestellt nach v folgt diesmal

$$v = \sqrt{G \cdot \frac{M}{r} \cdot \eta(r, v)} \quad . \quad (7.13)$$

Wirkt auch hier der Modifikationsfaktor dem $\sqrt{\frac{1}{r}}$ -Abfall entgegen, kann über diesen Ansatz der flache Rotationskurvenverlauf ohne die Existenz Dunkler Materie begründet werden.

Insgesamt ergeben sich somit drei grundlegende Modifikationsansätze.

1. Modifikation des 2. NEWTON'schen Axioms: $\vec{F} = m \cdot \mu \left(\frac{|\vec{a}|}{a_0} \right) \cdot \vec{a}$.

Wählt man für den Modifikationsfaktor μ etwa die Funktion $\mu \approx \frac{a}{a_0}$, folgt daraus, dass die Geschwindigkeit v nur von Konstanten, darunter auch der Grenzbeschleunigung a_0 , abhängt, vgl. Formel 7.9. Damit ließe sich der flache Verlauf der Rotationskurven begründen.

2. Modifikation des Verhältnisses von schwerer zu träger Masse: $\frac{m_t}{m_s} \neq 1$.

Ist das Verhältnis von träger zu schwerer Masse klein, so kann dem aus dem Gravitationsgesetz abgeleiteten $\sqrt{\frac{1}{r}}$ -Abfall entgegengewirkt und damit ein flacher Verlauf der Rotationskurven begründet werden. Aktuelle Messungen zeigen jedoch, dass schwere und träge Masse bis auf einen Faktor in der Größenordnung von 10^{-15} identisch sind [160]. Somit kann diese Möglichkeit praktisch ausgeschlossen werden.

3. Modifikation des Gravitationsgesetzes: $F = G \cdot \frac{mM}{r^2} \cdot \eta(r, v)$.

Mit einem zusätzlichen Modifikationsfaktor im Gravitationsgesetz kann auch hier dem $\sqrt{\frac{1}{r}}$ -Abfall entgegengewirkt und damit ein flacher Verlauf der Rotationskurven begründet werden.

Der erste Ansatz ist mit Kapitel 7.3.1.1 recht ausführlich thematisiert worden, da dies der in der Literatur am häufigsten diskutierte und meist beachtete ist. Generell sind aber alle drei Modifikationsansätze denkbar. Inwieweit sie jedoch tatsächlich zur Erklärung der verschiedensten Beobachtungen und Befunde taugen, ohne die Existenz Dunkler Materie zu fordern, soll im nachfolgenden Kapitel kurz erörtert werden.

7.3.1.3 Resultate und kritische Analyse

Mit unterschiedlichen Modifikationsansätzen kann die Problematik der Rotationskurvenmessung, welche in Modul 1 beschrieben wurde, gelöst werden, ohne Dunkle Materie zu postulieren. Der prognostizierte $\sqrt{\frac{1}{r}}$ -Abfall ist für die kleinen Beschleunigungen bei astronomischen Beobachtungen hinfällig, die MOND-Theorie sowie die beiden anderen hier vorgestellten Ansätze sagen eine konstante Geschwindigkeit für große Abstände vorher, was mit den Messungen vereinbar wäre. Ob jedoch diese Modifikationen tatsächlich so gelten, bleibt fraglich. Auch bei einer Erweiterung der MOND-Theorie etwa bleibt festzuhalten, dass die Erklärung der Beobachtungen und Befunde aus Gravitationsphysik und Kosmologie nicht vollständig gelingt. Es ergeben sich Probleme bei der Beschreibung der Gravitationswirkung auf galaktischen Skalen sowie bei der Beschreibung kosmologisch kleiner Strukturen [161]. Ebenso ergeben sich Widersprüche in den nach kosmologischen Vorstellungen gültigen Vorgängen zur Strukturbildung im frühen Universum [162]. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur, beispielsweise [163], verwiesen.

Ein übergreifender Blick auf diese Modifikationen zeigt, dass diese durchaus eine denkbare Lösung darstellen, jedoch fehlen einerseits die experimentellen Hinweise, die solche Annahmen legitimieren würden, andererseits gelingt keineswegs die Erklärung aller Befunde, die für die Dunkle Materie sprechen. Die Begründung der unterschiedlichen Befunde durch die Postulation neuer Teilchen gelingt deutlich einfacher. Ob also tatsächlich unser heutiges Verständnis der Gravitation modifiziert werden muss, würde demnach immer wahrscheinlicher, wenn die momentan in Betrieb genommenen Experimente auf der Suche nach den Dunkle-Materie-Teilchen keine Ergebnisse liefern sollten. Wenn aller-

dings Teilchen nachgewiesen werden sollten, die die Dunkle Materie ausmachen können, scheint die Modifikation der Gravitationstheorie hinfällig.

7.3.2 Historische Entwicklung

Die erste Idee einer Modifikation des zweiten NEWTON'schen Axioms zur Erklärung der scheinbar fehlenden Masse in Galaxien anhand ihrer Rotationskurven, entwickelte Mordehai MILGROM im Jahr 1983.

„If a certain modified version of the Newtonian dynamics is used to describe the motion of bodies in a gravitational field (of a galaxy, say), the observational results are reproduced with no need to assume hidden mass in appreciable quantities.“ [157]

Die Theorie wurde dann nach und nach erweitert. Eine der bekanntesten Erweiterungen, ist die TeVeS-Gravitationstheorie, welche von Jacob David BEKENSTEIN 2004 vorgestellt wurde [159] und eine Beschreibung der Gravitation alternativ zur allgemeinen Relativitätstheorie darstellt. Aufgrund der sich ergebenden Widersprüche und Kritiken, die im vorherigen Kapitel benannt wurden, stellten Benoit FAMAËY und Stacy MCGAUGH 2012 eine umfassende Übersicht zu den Erfolgen und Problemen der MOND-Theorie und ihren relativistischen Erweiterungen vor [163], auf welche bereits oben verwiesen wurde. Ausgehend davon wurden weitere Möglichkeiten der Erklärung der kosmologischen und gravitationsphysikalischen Beobachtungen in Betracht gezogen, wie zum Beispiel der Einfluss von Doppelsternsystemen auf die gemessenen Geschwindigkeiten [164]. Die eigentliche Modifikation der Gravitationstheorie ist jedenfalls aus Sicht einiger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die beste Möglichkeit, um die bekannten Indizien für Dunkle Materie ohne diese erklären zu können. Die aktuellen Publikationslisten hierzu sind lang, bringen aber keine grundlegend neuen Erkenntnisse bezüglich der eigentlichen Modifizierung mit sich.

7.3.3 Übertragung auf den Schulunterricht und didaktische Reduktion

Dieser Teil des abschließenden dritten Moduls stellt gewissermaßen eine Art kritische Reflexion beziehungsweise einen Ausblick auf alternative Erklärungsansätze dar. Bei einer Übertragung auf den Schulunterricht sollte klar der Bezug zum Beginn der Lehreinheit aufgeführt werden. Die Schülerinnen und Schüler haben zu Beginn des Moduls 1 die Rotationskurven als ersten Befund kennen gelernt, welcher für die Existenz Dunkler Materie spricht. In diesem Modul sollen sie nun die Erklärung mit der Dunklen Materie kritisch hinterfragen, gleichzeitig aber auch alle weiteren Resultate in Betracht ziehen. Dadurch gelingt eine Wiederholung des gelernten Wissens und Vertiefung des Verständnisses hinsichtlich der umfassenden und weitreichenden Beobachtungen, welche für die Dunkle Materie sprechen. Konkret sollten die nachfolgend aufgelisteten Beobachtungen und Befunde benannt werden, von denen etwa nur der erste Aspekt mit der MOND-Theorie ohne die Dunkle Materie erklärbar ist.

- Rotationskurven von Galaxien und Galaxienhaufen,
- Gravitationslinseneffekte,
- Bestimmung kosmologischer Parameter nach Analyse der Vorgänge in der primordialen Nukleosynthese,
- Analyse der Temperaturfluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Es bietet sich an, diesen Teil als abschließende Diskussion mit den Schülerinnen und Schülern im Plenum durchzuführen und bewusst auf Simulationen oder Experimente zu verzichten, damit die Reflexion des bisher Gelernten klar im Vordergrund steht. Auch sollte hier der Bezug zur grundlegenden Erkenntnismethode der Physik hergestellt werden. Das Bilden von Hypothesen, die Untersuchung eben jener mit Experimenten sowie das Aufstellen alternativer Hypothesen bei entsprechender Falsifikation der Ausgangshypothese sind zentrale Bausteine bei der Entwicklung neuer Modellvorstellungen und dem Aufkommen neuer Erkenntnisse. Dies wurde in Kapitel 4.3.1 bereits ausführlich

thematisiert und kann an dieser Stelle aufgegriffen werden, um die Erklärungsansätze für verschiedene Beobachtungen und Befunde und Alternativen hierzu einzuordnen.

7.3.4 Vertiefende Aufgaben für den Unterricht

Aufgabe im Unterricht sollte es sein, die Modifikation der bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten in ihrer Bedeutung und Anschlussfähigkeit an die bekannten Gesetze zu analysieren und gleichermaßen die mathematische Erweiterung zu untersuchen.

Hierbei muss - gerade bezüglich der folgenden ersten Aufgabe - bedacht werden, dass Schülerinnen und Schüler die Tragweite bekannter physikalischer Gesetzmäßigkeiten noch nicht so verinnerlicht haben können, dass sie eine Modifikation der Gesetzmäßigkeiten reflektieren können. Es ist daher darauf zu achten, dass die Lernenden bei Bearbeitung der Aufgabe 1, in welcher ein Bezug zur klassischen Mechanik hergestellt wird, diese bereits verinnerlicht haben sollten.

1. Die Erweiterung einer gängigen Theorie (hier: Gravitationstheorie) um eine zusätzliche Beschreibung von Grenzfällen (hier: kleine Beschleunigungen) kennen Sie bereits von der Relativitätstheorie. In gewisser Weise ließe sich an dieser Stelle eine Analogie zur MOND-Theorie als Ergänzung der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten zur klassischen Mechanik herstellen, allerdings bestehen hier grundlegende Unterschiede.

Versuchen Sie diese Unterschiede herauszustellen.

Lösung: Die Gravitationsphysik geht davon aus, dass die Gravitationskraft für konstante Massen proportional zur Gravitationsfeldstärke, also zur Beschleunigung, ist. Die MOND-Theorie fügt nun einen zusätzlichen Faktor μ ein, der von der Beschleunigung abhängt, aber erst für kleine Beschleunigungen relevant wird. Dementsprechend widerspricht die MOND-Theorie nicht den Gesetzen der Gravitationsphysik im Allgemeinen, sondern prinzipiell nur denen im Grenzfall für kleine Werte von a . Durch das Hinzufügen des Faktors μ wird deutlich, dass es sich also

keineswegs um eine gänzlich neue Gesetzmäßigkeit handelt, sondern die bestehende ergänzt wird. Der Faktor wird erst „spürbar“ für kleine Werte von a . Das grundlegende Prinzip einer Erweiterung ist - zumindest in Ansätzen - von der Speziellen Relativitätstheorie und der klassischen Mechanik bekannt. Während für kleine Geschwindigkeiten die klassischen Rechnungen vollkommen genügen, werden für große Geschwindigkeiten Effekte eintreten, für die ein neues Physikverständnis vonnöten wird.

Man erweitert die Gesetzmäßigkeiten der klassischen Mechanik um Faktoren, die eben solche relativistischen Effekte beschreiben. So werden zum Beispiel Längen und Zeiten mit dem LORENTZ-Faktor $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ skaliert, welcher bewirkt, dass bei einer Geschwindigkeit v nahe der Lichtgeschwindigkeit die Zeiten und Längen gedehnt beziehungsweise kontrahiert werden. Für niedrige Geschwindigkeiten machen sich diese Effekte hingegen nicht bemerkbar. Man erkennt also die Analogie zwischen der MOND-Theorie und der Speziellen Relativitätstheorie. Beide erweitern gängige Theorien um einen Faktor, der aber erst in den bestimmten Grenzfällen Auswirkungen auf die jeweiligen physikalischen Größen hat.

Allerdings muss an dieser Stelle auch beachtet werden, dass diese Analogie nur oberflächlich gilt. Die Spezielle Relativitätstheorie ist axiomatisch aufgebaut. Der LORENTZ-Faktor resultiert aus mathematischen Überlegungen, sodass die durch die Relativitätstheorie vorgenommene Erweiterung und die sich daraus ergebenden Gesetzmäßigkeiten logische und zwingende Folgerungen aus mathematischen Ansätzen und grundlegenden Axiomen sind. Die Modifikation der NEWTON'schen Dynamik (MOND-Theorie) hingegen ist eine künstliche Erweiterung, die gesetzt wird, um einen flachen Rotationskurvenverlauf zu erklären, jedoch keine mathematische Grundlage hat.

Der Bedeutungsunterschied der beiden Erweiterungen lässt sich auch strukturell veranschaulichen. Während die Spezielle Relativitätstheorie auf Grundlage von theoretischen (mathematischen) Überlegungen bestimmte Schlussfolgerungen zieht und damit verschiedenste Effekte erklären kann, erweitert die MOND-Theorie auf Grundlage der beobachteten Effekte die bereits bestehenden Grundlagen, um die Theorie den Beobachtungen anzupassen.

2. *In den fachlichen Grundlagen wurde dargelegt, dass der Modifikationsfaktor μ erst für kleine Beschleunigungen eine Auswirkung haben soll. Zeigen Sie rechnerisch, dass für $a \ll a_0$ der Faktor eine Rolle spielt, für $a \gg a_0$ jedoch vernachlässigt werden kann. Nutzen Sie dabei die unter Gleichung 7.5 angegebenen gängigen Annahmen für die Funktionsgleichung von μ .*

Lösung: Es bieten sich der Einfachheit halber an, den Quotienten $\frac{a}{a_0}$ zu substituieren, also $\frac{a}{a_0} = z$ zu setzen. Es müssen anschließend für beide Funktionsgleichungen von μ je zwei Fälle unterschieden werden. Für $a \ll a_0$ folgt $z \ll 1$, für $a \gg a_0$ folgt $z \gg 1$.

Erste Annahme für die Funktionsgleichung von μ :

$$\mu(z) = \frac{z}{1+z} \quad . \quad (7.14)$$

Fall 1: $z \ll 1$.

Die TAYLOR-Entwicklung der μ -Funktion liefert $\mu(z) \simeq z - z^2 + z^3 \mp \dots$. Da für $z \ll 1$ höhere Potenzen vernachlässigbar klein werden, kann die TAYLOR-Entwicklung nach dem ersten Glied abgebrochen werden und man erhält die Näherung $\mu(z) \simeq z$.

Fall 2: $z \gg 1$.

In diesem Fall kann der Nenner $1+z$ durch z angenähert werden, da die

Addition mit 1 für sehr große z vernachlässigbar ist. Damit erhält man für μ den Quotienten $\frac{z}{z}$, also $\mu(z) \simeq 1$.

Zweite Annahme für die Funktionsgleichung von μ :

$$\mu(z) = \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} \quad . \quad (7.15)$$

Fall 1: $z \ll 1$.

Auch in diesem Fall hilft die TAYLOR-Entwicklung weiter, die hier folgendes Ergebnis liefert: $\mu(z) \simeq z - \frac{z^3}{2} + \frac{3z^5}{8} \mp \dots$. Da für $z \ll 1$ höhere Potenzen vernachlässigbar klein werden, kann auch hier nach dem ersten Glied abgebrochen werden und man erhält als Näherung $\mu(z) \simeq z$.

Fall 2: $z \gg 1$.

In diesem Fall wird die Summation mit 1 im Nenner noch vernachlässigbarer, da z^2 noch höhere Werte erreicht als in obigem zweiten Fall. Für μ ergibt sich demnach der Quotient $\frac{z}{\sqrt{z^2}}$, welcher nach Kürzen $\mu(z) \simeq 1$ liefert.

7.4 Erprobung

7.4.1 Vorgehensweise

Das abschließende dritte Modul ist ebenfalls an einem Gymnasium in Nordrhein-Westfalen erprobt worden. Die Inhalte wurden wie bei den Modulen 1 und 2 zuvor in zwei Kursen mit 41 Schülerinnen und Schülern unterrichtet. Im Anschluss erfolgte eine Auswertung über beide Teile des Moduls. Eine Aufsplittung in zwei getrennte Auswertungen, einmal für die Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit Dunkler Materie und einmal für die Kritik und die alternativen Erklärungsansätze erscheint in diesem Fall nicht sinnvoll, da es bei der unterrichtlichen Umsetzung zu vermehrt digitalen Unterrichtssequenzen kam, in welchen beide Teilgebiete des Moduls fließend ineinander übergingen und somit keine strikte Trennung erfolgte. Die zur Auswertung gestellten Fragen sind Anhang D.3 zu entnehmen.

7.4.2 Ergebnisse und Auswertung

Es wurden insgesamt drei Fragen gestellt, wovon sich die erste auf das gezeigte anschauliche Experiment und die daraus gezogenen Erkenntnisse bezieht. Die Schülerinnen und Schüler sollten hier das Neutrino als möglichen Kandidaten für die heiße Dunkle Materie beurteilen. Aufgrund der anschaulichen Überlegungen mit Hilfe des Experiments mit der Schüttelmaschine ist es nicht verwunderlich, dass in etwa die Hälfte der Schülerinnen und Schüler die Aufgabe vollständig korrekt beantwortet hat und knapp 83% der Antworten zu dieser Aufgabe größtenteils korrekt oder besser waren. Da es sich allerdings auch nur um die Reproduktion der aus dem Unterricht bekannten Inhalte handelt, ist die Aufgabe nach Tabelle 5.3 Anforderungsbereich I zuzuordnen. Im Anforderungsbereich II sollten die Schülerinnen und Schüler dann gemäß des Strukturdiagrammes (vgl. Tabelle 7.3), welches zentraler Inhalt innerhalb des Moduls war, die einzelnen Kandidaten für die Dunkle Materie in strukturierter Weise darstellen und kritisch analysieren. Hier ist der Anteil der größtenteils oder vollständig korrekten Antworten noch größer, auch wenn mit 16 Schülerinnen und Schülern die Anzahl der Personen im vollständig korrekten Bereich

etwas geringer ausfiel.

	vollständig korrekt	größtenteils korrekt	zum Teil korrekt	nicht korrekt
Beurteilung des Neutrinos als möglicher Kandidat für HDM (AFB I)	22	12	7	0
Darstellung und Analyse der einzelnen Kandidaten für DM (AFB II)	16	21	4	0
Erläuterung und kritische Beurteilung der MOND-Theorie (AFB III)	19	15	6	1

Tabelle 7.4: Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu den Hypothesen zur Struktur der Dunklen Materie sowie der alternativen Erklärungsansätze.

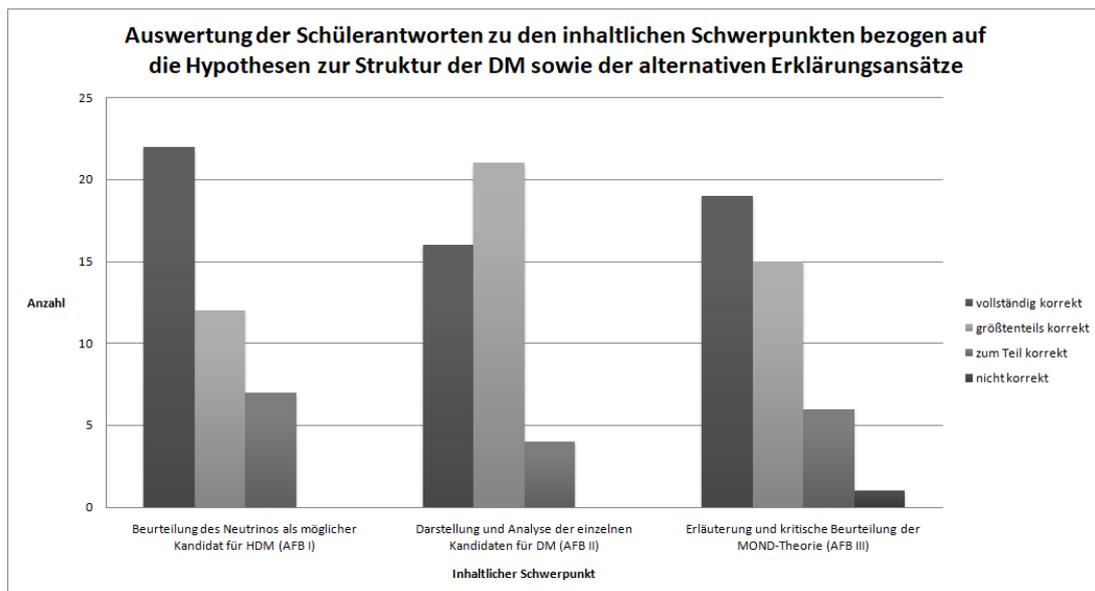


Abbildung 7.4: Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu den Hypothesen zur Struktur der Dunklen Materie sowie der alternativen Erklärungsansätze.

Die dritte Aufgabe lässt sich dann nach Tabelle 5.3 Anforderungsbereich III zuordnen, da die Lernenden hier die MOND-Theorie erläutern, aber auch kritisch reflektieren sollten, inwieweit sie eine tragfähige Theorie zur Erklärung aller bekannten Beobachtungen

und Befunde darstellt. Dadurch gelang eine Wiederholung des bisherigen Unterrichtsstoffs, da die Schülerinnen und Schüler auf die Befunde der Gravitationsphysik und der Kosmologie, welche in den ersten beiden Modulen behandelt wurden, eingehen mussten. Besonders erfreulich ist hier, dass mit 19 vollständig korrekten Antworten die Anzahl der besonders gelungenen Schülerlösungen recht hoch ausfällt. Mit 15 größtenteils korrekten Antworten, liegt der prozentuale Anteil der guten oder sehr guten Antworten bei 83%, was als Erfolg für die drei unterrichteten Module gewertet werden kann.

Neben den fachlichen Inhalten wurden die Lernenden auch hier zu ihrer persönlichen Einschätzung gefragt. Neben den bekannten Fragen, ob das Thema verstanden wurde, interessant war und zu neuen Erkenntnissen geführt hat, wurde diesmal auch auf die drei Module insgesamt eingegangen. In den letzten beiden Fragen, sollten die Schülerinnen und Schüler einschätzen, ob sie aus ihrer Sicht insgesamt neues Wissen zur Dunklen Materie erlangt haben und ob die Unterrichtsinhalte für sie insgesamt interessant waren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.5 eingetragen und graphisch in Abbildung 7.5 dargestellt.

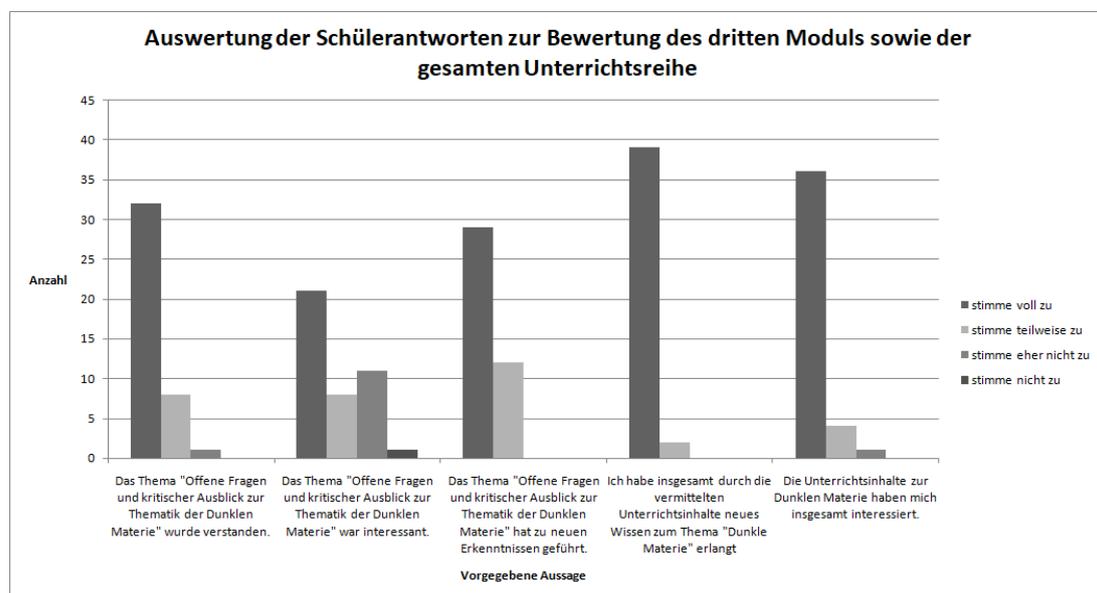


Abbildung 7.5: Graphische Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des dritten Moduls sowie der Unterrichtseinheit insgesamt durch die Schülerinnen und Schüler.

Kapitel 7. Modul 3: Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie

	stimme voll zu	stimme teilweise zu	stimme eher nicht zu	stimme nicht zu
Das Thema „Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie“ wurde verstanden.	32	8	1	0
Das Thema „Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie“ war interessant.	21	8	11	1
Das Thema „Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie“ hat zu neuen Erkenntnissen geführt.	29	12	0	0
Ich habe insgesamt durch die vermittelten Unterrichtsinhalte neues Wissen zum Thema „Dunkle Materie“ erlangt.	39	2	0	0
Die Unterrichtsinhalte zur Dunklen Materie haben mich insgesamt interessiert.	36	4	1	0

Tabelle 7.5: Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des dritten Moduls sowie der Unterrichtseinheit insgesamt durch die Schülerinnen und Schüler.

Es ist festzuhalten, dass die persönliche Einschätzung durch die Schülerinnen und Schüler sehr positiv ausfällt. Die ersten drei Fragen beziehen sich konkret auf Modul 3. Man erkennt recht deutlich, dass die meisten Schülerinnen und Schüler ihrer Einschätzung nach das Modul verstanden haben und es auch zu neuen Erkenntnissen geführt hat. Mit 32 beziehungsweise 29 Kreuzen bei der Antwortmöglichkeit „stimme voll zu“ kann man an dieser Stelle ein positives Fazit ziehen. Die Aussagen korrespondieren mit den zuvor ausgewerteten Fragen zu den fachlichen Inhalten. Das persönliche Interesse an Modul 3 ist nicht ganz so stark ausgeprägt. Mit 21 von 41 Schülerinnen und Schülern liegt der Anteil derjenigen, die der Aussage voll zustimmen nur bei knapp der Hälfte. Im Ge-

genzug ist die Antwortmöglichkeit „stimme eher nicht zu“ von 11 Personen angekreuzt und damit vergleichsweise häufig angewählt worden. Dennoch lässt sich gerade, was den Erkenntnisgewinn angeht, Modul 3 auch aus Schülersicht positiv bewerten.

Die letzten beiden Fragen beziehen sich dann auf die gesamte Unterrichtseinheit zur Dunklen Materie, also auf alle drei Module. Hier bleibt festzustellen, dass mit mindestens 36 Schülerinnen und Schülern, die durch die Unterrichtsinhalte ihrer Meinung nach neues Wissen erlangt haben und sich dafür interessiert haben, die Beurteilung der drei Module sehr gut ausfällt. Zwar haben die Erprobungen durchaus auch Lücken im Fachwissen aufgezeigt, aber insgesamt kann ein Erkenntnisgewinn der Lernenden durch die Auswertung der fachlichen Fragen bestätigt werden.

Auch bei der Erprobung des letzten Moduls wurden zwei Lehrkräfte in einem persönlichen Gespräch um ihre Einschätzung und Kritik gebeten. Die nachfolgende Auflistung zeigt die genannten positiven (mit einem + gekennzeichnet) und verbesserungswürdigen Punkte (mit einem – gekennzeichnet).

- + Das Modul stellt einen sinnvollen und gelungenen Abschluss der Thematik „Dunkle Materie“ dar.
- + Das Experiment zeigt gut und einfach, wieso Neutrinos zwar als Kandidat infrage kommen, aber dennoch nicht die Dunkle Materie insgesamt erklären können.
- + Das Strukturdiagramm ist gerade für Lehrkräfte eine sehr wertvolle Hilfe, um selbst den Überblick zu behalten. Da davon auszugehen ist, dass die Lehrkräfte sich gerade in diesem Themengebiet unsicher sind, kommt dem Strukturdiagramm eine besondere Bedeutung zu.
- + Die Darstellung der fachlichen Inhalte und auch die Aufgaben sind gut gewählt.
- + Das Modul bezieht die anderen beiden Module fachlich mit ein, sodass eine Wiederholung und Vernetzung möglich ist.
- Das Modul ist aufgrund des Standardmodells und der Teilchen, die hier angesprochen werden, nur für den letzten Jahrgang in der Oberstufe gedacht. Das schränkt

die Einsatzmöglichkeiten etwas ein. Man müsste also die Module unterrichten, wenn man im Unterricht bereits das Standardmodell behandelt hat, da dieses hier vorausgesetzt wird.

Die hier formulierte Kritik ist jedoch nach Meinung der befragten Lehrkräfte vor dem Hintergrund der geltenden Lehrpläne nicht zu ändern und muss so hingenommen werden.

7.5 Fazit

Das dritte Modul stellt mit den noch offenen Fragen, bezogen auf die Struktur und Beschaffenheit der Dunklen Materie und die alternativen Erklärungsmöglichkeiten, einen Abschluss der Unterrichtsreihe dar. Die Schülerinnen und Schüler sollen nach diesem Modul gewissermaßen ihr Bild von der Dunklen Materie vervollständigen, indem sie nicht nur die Befunde für ihre Existenz, sondern auch gängige Hypothesen zur Frage, was Dunkle Materie eigentlich ist, kennen lernen. Dass diese Frage letztlich nicht direkt beantwortet wird, sondern vielmehr diverse Antwortmöglichkeiten aufgezeigt werden, ist vor dem Hintergrund der aktuellen Forschung zu begründen. Die Lernenden können mit diesem Modul einen Einblick in die aktuellen Forschungsinteressen der modernen Astrophysik erhalten, erfahren etwas zum Wesen der Physik und werden außerdem in die Lage versetzt, alternative Erklärungsansätze für einzelne Befunde anzugeben und zu reflektieren.

Die Erprobung hat gezeigt, dass die fachlichen Inhalte von den Schülerinnen und Schülern durchweg gut verstanden wurden und auch das Interesse an der Thematik nach wie vor groß ist.

Eine Befragung bezüglich der Unterrichtsreihe insgesamt lieferte ebenfalls ein sehr gutes Feedback seitens der Lernenden. Somit bleibt festzuhalten, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module eine praktikable Möglichkeit bieten, das Thema der Dunklen Materie für Schülerinnen und Schüler begreifbar zu machen.

KAPITEL 8

Schlussbetrachtung und Ausblick

8.1 Ergebnisse dieser Arbeit unter Rückgriff auf die Fragestellungen

Zu Beginn der Arbeit wurden fünf Forschungsfragen formuliert, die im Rahmen dieses Kapitels beantwortet werden sollen. Es wird an den jeweiligen Stellen auf die entsprechenden Kapitel dieser Arbeit verwiesen, sodass hier keine ausufernde Beantwortung der Fragen erfolgt, sondern vielmehr ein Überblick über die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit gegeben wird.

Forschungsfrage 1:

Inwieweit wird die Dunkle Materie in modernen Schulbüchern und Lehrplänen behandelt?

Das Kapitel 3.1 befasst sich mit der Beantwortung dieser Frage. Durch die strukturierte Vorgehensweise nach den Vorgaben der qualitativen Inhaltsanalyse von Philipp MAYRING wurden gängige Schulbücher und ausgewählte Lehrpläne daraufhin analysiert, inwieweit die Thematik der Dunklen Materie behandelt werden soll. Es hat sich gezeigt, dass die meisten Lehrbücher die Dunkle Materie nur am Rande erwähnen, sodass Schülerinnen und Schüler, wenn überhaupt, nur ein sehr oberflächliches Wissen hierzu erlangen können. In Lehrplänen wird die Dunkle Materie nirgendwo verbindlich vorgeschrieben. Sie taucht aber durchaus als Teil von Wahlpflichtthemen auf, wobei dies von Bundesland zu Bundesland verschieden ist. Insgesamt zeigt sich deutlich, dass die Inhalte zur Dunklen Materie sowohl in Lehrplänen als auch in Schulbüchern nur unzureichend dargestellt werden.

Forschungsfrage 2:

Zählt das Themenfeld der Dunklen Materie zu den Bereichen, für welches sich Lernende interessieren?

In Kapitel 3.2.1 wurden die Ergebnisse von Befragungen von Schülerinnen und Schülern vorgestellt. Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass das Interesse an astronomischen Themen sowohl bei Jungen als auch bei Mädchen durchweg hoch ist. Dies korrespondiert mit bereits durchgeführten und bekannten Studien, wie beispielsweise der ROSE-Studie. Daraufhin wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Thematik der Dunklen Materie eingegangen und es hat sich abgezeichnet, dass dieses Themenfeld eine große Faszination auf die befragten Lernenden ausübt und somit klar zu den gewünschten Inhalten des Physikunterrichts zählt.

Forschungsfrage 3:

Wie würde ein modulares Lehr-Lern-Programm zur Dunklen Materie aussehen und welche fachlichen Inhalte sollte es enthalten?

Ein modulares Lehr-Lern-Programm, so wie es in dieser Arbeit entwickelt wurde, ist in erster Linie für die Lehrkräfte zur persönlichen Einarbeitung und unterrichtlichen Vorbereitung gedacht. Befragungen der Lehrkräfte (siehe Kapitel 3.2.2) ergaben, dass eine Konzeption detailliert ausgearbeiteter Unterrichtsstunden aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen an den Schulen nicht sinnvoll erscheint. Die Module mussten daher so entwickelt werden, dass sie die fachlichen Inhalte, die historisch relevanten Bezüge sowie Möglichkeiten zur Übertragung auf den Schulunterricht darstellen und ebenso Begleitmaterial in Form von Aufgaben bereitstellen. Alle hier vorgestellten Module haben einen einheitlichen Aufbau, nach welchem zunächst die Lernziele, dann die fachlichen Grundlagen, die historischen Entwicklungen, didaktische Hinweise sowie die Ergebnisse entwickelter Experimente und Simulationen vorgestellt werden. Abschließend folgen die vertiefenden Aufgaben für den Unterricht und die Ergebnisse einer ersten Erprobung. Durch die Module selbst müssen die Inhalte zur Dunklen Materie in adäquater Weise strukturiert werden. Es wurden in dieser Arbeit drei Module vorgestellt, die jeweils

aus zwei inhaltlichen Teilen bestehen. Durch die Anzahl von drei Modulen gelingt eine übersichtliche Darstellung aller wesentlichen Aspekte zur Dunklen Materie. Außerdem sind die Module so ausgelegt, dass sie zum Teil aufeinander aufbauen und damit eine Vernetzung des Wissens der Schülerinnen und Schüler fördern. Die Unterrichtsreihe zur Dunklen Materie lässt sich auch nach jedem Modul beenden, sodass die Lehrkräfte im Unterricht flexibel agieren können.

Inhaltlich werden sowohl die Beobachtungen und Befunde, die für die Existenz Dunkler Materie sprechen, thematisiert als auch die offenen Fragen bezüglich der Struktur und Beschaffenheit sowie mögliche alternative Erklärungsansätze für einzelne Befunde. Abbildung 8.1 zeigt als Übersichtsschema die entsprechende Strukturierung, nach welcher diese Arbeit aufgebaut wurde.

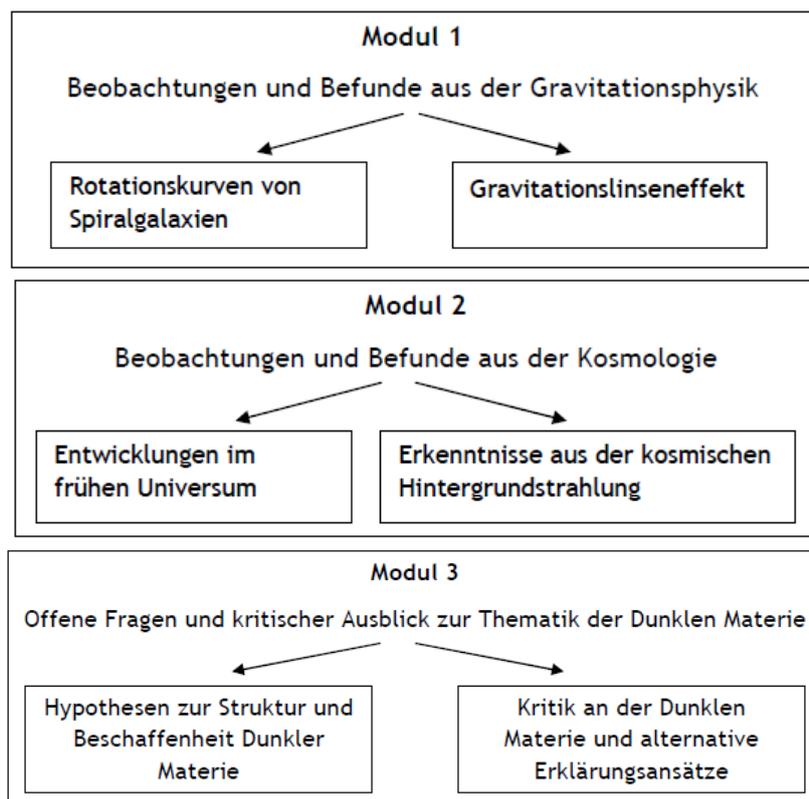


Abbildung 8.1: Darstellung der inhaltlichen Schwerpunkte der drei Module.

Es ist ebenfalls festzuhalten, dass in allen Modulen auf eine variantenreiche methodi-

sche Umsetzung geachtet wurde. Neben historischen Einführungen wurden Experimente, theoretische Elementarisierungen und Computer-Simulationen entwickelt. Genauerer hierzu folgt mit der Beantwortung von Forschungsfrage 4.

Forschungsfrage 4:

Gibt es Möglichkeiten, etwa durch Analogieversuche oder einfache Simulationsprogramme, Lernenden Verständniswege bei der Erkundung der Eigenschaften der Dunklen Materie zu eröffnen?

In dieser Arbeit sind verschiedene Analogieversuche und Simulationsprogramme ausgearbeitet worden, die eine Hilfestellung für eine Erkundung der Eigenschaften der Dunklen Materie darstellen. Dabei wurden einerseits experimentell-reale Analogieversuche entwickelt, die ein bestimmtes Messprinzip vor analogem Kontext abbilden können, andererseits wurden auch anschauliche Analogieversuche vorgestellt, die bestimmte Prinzipien und Vorgänge verdeutlichen können. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Arbeit eine Analysesoftware, durch welche eine automatisierte Auswertung von Messdaten gelingt, sowie verschiedene Simulationen geschrieben, mit welchen Abschätzungen auf interaktive Weise vorgenommen werden können. Die nachfolgende Auflistung zeigt noch einmal nach der zugrundeliegenden Modulstruktur, welche Analogieversuche und Simulationen vorgestellt wurden.

1. Modul: Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik

- Analogieexperiment zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie anhand der akustischen Dopplerverschiebung.
- Auswertungssoftware zur automatisierten Analyse der Messdaten und Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit.
- Analogieexperiment zur Veranschaulichung der durch den Gravitationslinseffekt hervorgerufenen Verzerrungen aufgrund einer inhomogenen Massendichte.
- Simulation zur Oberflächenquerschnittslinie einer Glaslinse, die als Gravitationslinse wirken soll.

- Analogieexperiment mit einer Glaslinse zur Demonstration von EINSTEIN-Ringen und Mehrfachbildern.

2. Modul: Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie

- Simulation zur Abschätzung der einzelnen Materieanteile an der Gesamtdichte des Universums durch Festlegung kosmologischer Parameter innerhalb der gültigen Intervallgrenzen.
- Analogieexperiment zur Veranschaulichung des Entkopplungsvorgangs von Strahlung und Materie.
- Analogieexperiment zur Messung des Temperaturspektrums der kosmischen Hintergrundstrahlung mit Hilfe einer Halogenlampe.

3. Modul: Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie

- Analogieexperiment zur Veranschaulichung der weitläufigen Verteilung heißer Dunkler Materie und der Forderung nach massiven Neutrinos.
- Strukturdiagramm zur Einordnung verschiedener Kandidaten für Dunkle Materie.

Es bleibt festzuhalten, dass im Rahmen dieser Arbeit einige Möglichkeiten aufgezeigt wurden, wie durch Analogieversuche und Simulationen für Lernende Verständniswege zur Erkundung der Eigenschaften Dunkler Materie eröffnet werden können.

Forschungsfrage 5:

In welchem Umfang konnten im Rahmen dieser Promotion bisher noch nicht bekannte Elementarisierungen, Analogieversuche und Simulationen aufgezeigt und realisiert werden?

Die vorliegende Arbeit basiert natürlich zum Teil auf bereits bekannten und ausgearbeiteten Elementarisierungen. So ist das anschauliche Experiment zur Erzeugung von EINSTEIN-Ringen mit Hilfe einer Glaslinse durchaus schon in einigen Publikationen vorgestellt worden (vergleiche Kapitel 5.3.4.3 und die dort genannten Referenzen). Dennoch

sind mit dem Experiment zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit, der entsprechenden Analysesoftware, sämtlichen Simulationen, dem Anschauungsexperiment zur Entkopplung von Strahlung und Materie sowie dem Strukturdiagramm zur Einordnung der Kandidaten für Dunkle Materie neue und noch nicht bekannte Möglichkeiten der Elementarisierung und Übertragung auf den Schulunterricht geschaffen worden.

8.2 Ausblick

Auf Grundlage der vorliegenden Arbeit haben Lehrkräfte die Möglichkeit, sich selbst in die Thematik der Dunklen Materie einzuarbeiten und gleichermaßen hier vorgestellte Elementarisierungen, Analogieversuche, Simulationen und Aufgaben für ihren Unterricht zu nutzen. Innerhalb verschiedener Module konnten wesentliche Inhalte zur Vermittlung der Thematik der Dunklen Materie strukturiert und elementarisiert werden. Die bisherige Erprobung der Arbeit hat gezeigt, dass alle unterrichtlichen Konzepte und Ideen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, für die gymnasiale Oberstufe einsetzbar sind. Selbstverständlich fehlt an dieser Stelle noch eine tiefergehende Erprobung mit entsprechender Analyse. Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit war es dem Autor möglich, an zwei Schulen Teile der Arbeit auszuprobieren und weiter zu entwickeln. Die Erprobung mit 41 Schülerinnen und Schülern lässt an dieser Stelle natürlich keine allgemeinen Rückschlüsse auf den Erfolg in der Wissensvermittlung und der motivationalen Einschätzung seitens der Schülerinnen und Schüler zu. Hier bedarf es weiterer Erprobungen und Analysen. Dennoch kann an den bereits hier vorgestellten Rückmeldungen von Schülerinnen, Schülern und Lehrkräften eine positive Bilanz gezogen werden. Das Ziel dieser Arbeit, nämlich die Entwicklung umfassender Lehr-Lern-Module zur Thematik der Dunklen Materie, wurde erreicht. Alle im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Experimente, Simulationen, Programme und Aufgaben sind im Unterricht einsetzbar.

Verwendete Abkürzungen und Symbole

Formelzeichen und Konstanten

a_0	Grenzbeschleunigung, unter welcher sich die MOND-Erweiterung bemerkbar macht
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, $c \simeq 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
γ	LORENTZ-Faktor, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$
ε	Spektrale Energiedichte
ε_{ges}	Gesamte Energiedichte
G	Gravitationskonstante, $G \simeq 6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}\cdot\text{s}^2}$
h_{Pl}	PLANCK'sches Wirkungsquantum, $h_{\text{Pl}} \simeq 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
h	HUBBLE-Faktor, $H_0 = h \cdot 100 \frac{\text{km}}{\text{s}\cdot\text{Mpc}}$
H_0	HUBBLE-Konstante
k_{B}	BOLTZMANN-Konstante, $k_{\text{B}} \simeq 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$
m_e	Masse eines Elektrons, $m_e \simeq 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \simeq 510,999 \text{ keV}$
m_n	Masse eines Neutrons, $m_n \simeq 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \simeq 939,565 \text{ MeV}$
m_p	Masse eines Protons, $m_p \simeq 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \simeq 938,272 \text{ MeV}$
μ	Modifikationsfaktor der MOND-Theorie
n	Besetzungszahl
$\langle n \rangle$	Mittlere Besetzungszahl
n_p	Teilchendichte an Protonen
n_n	Teilchendichte an Neutronen

π	Kreiszahl, $\pi \simeq 3,141593$
\mathfrak{R}_s	SCHWARZSCHILD-Radius, $\mathfrak{R}_s = \frac{2GM}{c^2}$
Σ	Oberflächen-Massendichte
t_h	Halbwertszeit
χ	Verhältnis von Protonen zu Neutronen
χ_{He}	Heliumanteil
ψ	Oberflächenlinienfunktion einer Linse
Ω_B	Baryonendichte
Ω_M	(Gesamt-)Materiedichte
Ω_ν	Neutrindichte
Ω_{vis}	Dichte der sichtbaren Materie

Abkürzungen

ADMX	Axion Dark Matter eXperiment
AFB	Anforderungsbereich
ART	Allgemeine Relativitätstheorie
BDM	Baryonische Dunkle Materie
bzw.	beziehungsweise
CCD	Charge Coupled Device
CDM	Cold Dark Matter
CERN	Conseil Européen Pour La Recherche Nucléaire
CMB	Cosmic Microwave Background
COBE	Cosmic Background Explorer
CP	Charge conjugation Parity
DM	Dark Matter
EHT	Event Horizon Telescope
EROS	Expérience de Recherches d'Objets Sombres

Verwendete Abkürzungen und Symbole

ESA	European Space Agency
etc.	et cetera
FFT	Fast Fourier Transform
HDM	Hot Dark Matter
LMC	Large Magellanic Cloud
LNGS	Laboratori Nazionali del Gran Sasso
LSP	Lightest Supersymmetric Particle
MACHO	MAssive Compact Halo Object
MOND	MOdified Newtonian Dynamics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OGLE	Optical Gravitational Lensing Experiment
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SMTP	Standardmodell der Elementarteilchenphysik
SRT	Spezielle Relativitätstheorie
SUSY	Supersymmetrie
TeV	Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie
vgl.	vergleiche
WIMP	Weakly Interacting Massive Particle
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
WW	Wechselwirkung

Verzeichnis historisch relevanter Persönlichkeiten

Es werden die im Rahmen dieser Arbeit erwähnten historisch relevanten Persönlichkeiten mit ihren Lebensdaten, sofern bekannt, aufgeführt.

Alpher , Ralph Asher	<i>(1921 - 2007)</i>	US-amerikanischer Physiker
Babcock , Horace Welcome	<i>(1912 - 2003)</i>	US-amerikanischer Astronom
Bekenstein , Jacob David	<i>(1947 - 2015)</i>	US-amerikanischer Physiker
Bethe , Hans Albrecht	<i>(1906 - 2005)</i>	US-amerikanischer Physiker
Boltzmann , Ludwig Eduard	<i>(1844 - 1906)</i>	Österreichischer Physiker
Brandt , John C.	<i>(1934 - heute)</i>	US-amerikanischer Astronom
Burbidge , Geoffrey Ronald	<i>(1925 - 2010)</i>	US-amerikanischer Physiker
Burbidge , Margaret	<i>(1919 - 2020)</i>	US-amerikanische Physikerin
Carignan , Claude		Kanadischer Physiker
Carswell , Robert	<i>(1943 - 2018)</i>	Britischer Physiker
Cavendish , Henry	<i>(1731 - 1810)</i>	Britischer Naturforscher
Darwin , Charles Galton	<i>(1887 - 1962)</i>	Britischer Physiker
Davidson , Charles Rundle	<i>(1875 - 1970)</i>	Britischer Astronom
Davis , Marc	<i>(1947 - heute)</i>	US-amerikanischer Astronom
de Coulomb , Charles Augustin	<i>(1736 - 1806)</i>	Französischer Physiker
Dicke , Robert Henry	<i>(1916 - 1997)</i>	US-amerikanischer Physiker
Diesterweg , Friedrich Adolph Wilhelm	<i>(1790 - 1866)</i>	Deutscher Pädagoge
Dürrenmatt , Friedrich	<i>(1921 - 1990)</i>	Schweizer Schriftsteller
Dyson , Frank Watson	<i>(1868 - 1939)</i>	Britischer Astronom

Verzeichnis historisch relevanter Persönlichkeiten

Eddington , Arthur Stanley	(1882 - 1944)	Britischer Astronom
Einasto , Jaan	(1929 - heute)	Estnischer Astrophysiker
Einstein , Albert	(1879 - 1955)	Deutscher Physiker
Flammarion , Nicolas Camille	(1842 - 1925)	Französischer Astronom
Follin , James	(1920 - 2007)	US-amerikanischer Physiker
Ford Jr. , William Kent	(1931 - heute)	US-amerikanischer Astronom
Foucault , Jean Bernard Léon	(1819 - 1868)	Französischer Physiker
Fowler , William Alfred	(1911 - 1995)	US-amerikanischer Physiker
Frenk , Carlos Silvestre	(1951 - heute)	Britisch-mexikanischer Physiker
Gamow , George Anthony	(1904 - 1968)	Russischer Physiker
Gauß , Johann Carl Friedrich	(1777 - 1855)	Deutscher Mathematiker
Gershtein , Semen Solomonovich	(1929 - heute)	Russischer Physiker
Gunn , James Edward	(1938 - heute)	US-amerikanischer Physiker
Haud , Urmas	(1953 - heute)	Estnischer Astrophysiker
Herman , Robert	(1914 - 1997)	US-amerikanischer Physiker
Higgs , Peter Ware	(1929 - heute)	Britischer Physiker
Hoyle , Fred	(1915 - 2001)	Britischer Astronom
Hubble , Edwin Powell	(1889 - 1953)	US-amerikanischer Astronom
Huygens , Christian	(1629 - 1695)	Niederländischer Physiker
Jeans , James Hopwood	(1877 - 1946)	Britischer Physiker
Kahn , Franz Daniel	(1926 - 1998)	Deutscher Astronom
Kepler , Johannes	(1571 - 1630)	Deutscher Astronom
Klafki , Wolfgang	(1927 - 2016)	Deutscher Pädagoge
Lee , Benjamin Whisoh	(1935 - 1977)	Südkoreanischer Physiker
Legendre , Adrien-Marie	(1752 - 1833)	Französischer Mathematiker
Liebes Jr. , Sidney		US-amerikanischer Physiker
Link , František	(1906 - 1984)	Tschechischer Astronom

Verzeichnis historisch relevanter Persönlichkeiten

Lorentz , Hendrik Antoon	<i>(1853 - 1923)</i>	Niederländischer Physiker
Lynds , Clarence Roger	<i>(1928 - heute)</i>	US-amerikanischer Astronom
Mandl , Rudi Welt	<i>(1895 - ?)</i>	Deutscher Physiker
Maxwell , James Clerk	<i>(1831 - 1879)</i>	Schottischer Physiker
McGaugh , Stacy	<i>(1964 - heute)</i>	US-amerikanischer Astronom
McKellar , Andrew	<i>(1910 - 1960)</i>	Kanadischer Physiker
Metzner , Kenneth		US-amerikanischer Physiker
Milgrom , Mordehai	<i>(1946 - heute)</i>	Israelischer Physiker
Newton , Isaac	<i>(1642 - 1726)</i>	Britischer Naturforscher
Oort , Jan Hendrik	<i>(1900 - 1992)</i>	Niederländischer Astronom
Paczyński , Bohdan	<i>(1940 - 2007)</i>	Polnischer Astronom
Peccei , Roberto Daniele	<i>(1942 - heute)</i>	Italienischer Physiker
Peebles , Philipp James Edwin	<i>(1935 - heute)</i>	US-amerikanischer Physiker
Penzias , Arno Allan	<i>(1933 - heute)</i>	US-amerikanischer Physiker
Petrosian , Vahé	<i>(1938 - heute)</i>	Iranischer Physiker
Planck , Max Karl Ernst Ludwig	<i>(1858 - 1947)</i>	Deutscher Physiker
Quinn , Helen Rhoda	<i>(1943 - heute)</i>	Australische Physikerin
Rayleigh , John William Strutt, 3. Baron	<i>(1842 - 1919)</i>	Britischer Physiker
Rees , Martin John	<i>(1942 - heute)</i>	Britischer Physiker
Refsdal , Sjur	<i>(1935 - 2009)</i>	Norwegischer Physiker
Regener , Erich Rudolph Alexander	<i>(1881 - 1955)</i>	Deutscher Physiker
Roberts , Morton S.	<i>(1945 - 2011)</i>	US-amerikanischer Astronom
Roll , Peter		US-amerikanischer Physiker
Rubin , Vera Cooper	<i>(1928 - 2016)</i>	US-amerikanische Astronomin
Sachs , Rainer Kurt	<i>(1932 - heute)</i>	US-amerikanischer Physiker
Schwarzschild , Karl	<i>(1873 - 1916)</i>	Deutscher Astronom

Verzeichnis historisch relevanter Persönlichkeiten

Silk , Joseph Ivor	<i>(1942 - heute)</i>	Britischer Physiker
Sikivie , Pierre	<i>(1949 - heute)</i>	Belgischer Physiker
Smith , Sinclair	<i>(1899 - 1938)</i>	US-amerikanischer Astronom
Soucail , Geneviève		Französische Astronomin
Stefan , Josef	<i>(1835 - 1893)</i>	Österreichischer Physiker
Surdej , Jean	<i>(1951 - heute)</i>	Belgischer Physiker
Taylor , Brook	<i>(1685 - 1731)</i>	Britischer Mathematiker
Tremaine , Scott Duncan	<i>(1950 - heute)</i>	Kanadischer Physiker
Turkevich , Anthony Leonid	<i>(1916 - 2002)</i>	US-amerikanischer Chemiker
van Albada , Tjeerd Sicco	<i>(1936 - heute)</i>	Niederländischer Astronom
van Roijen Snell , Willebrord	<i>(1580 - 1626)</i>	Niederländischer Astronom
von Soldner , Johann Georg	<i>(1776 - 1833)</i>	Deutscher Physiker
von Weizsäcker , Carl Friedrich	<i>(1912 - 2007)</i>	Deutscher Physiker
Walsh , Dennis	<i>(1933 - 2005)</i>	Britischer Astronom
Weinberg , Steven	<i>(1933 - heute)</i>	US-amerikanischer Physiker
Weymann , Ray	<i>(1935 - heute)</i>	US-amerikanischer Astronom
White , Simon David Manton	<i>(1951 - heute)</i>	Britischer Physiker
Whitehurst , Robert Neal	<i>(1922 - 2000)</i>	US-amerikanischer Astronom
Wien , Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz	<i>(1864 - 1928)</i>	Deutscher Physiker
Wilkinson , David Todd	<i>(1935 - 2002)</i>	US-amerikanischer Physiker
Wilson , Robert Woodrow	<i>(1936 - heute)</i>	US-amerikanischer Physiker
Wolfe , Arthur Michael	<i>(1939 - 2014)</i>	US-amerikanischer Physiker
Woltjer , Lodewijk	<i>(1930 - heute)</i>	Niederländischer Astronom
Zangger , Heinrich	<i>(1874 - 1957)</i>	Schweizer Toxikologe
Zel'dovich , Yakov Borisovich	<i>(1914 - 1987)</i>	Sowjetischer Physiker
Zwicky , Fritz	<i>(1898 - 1974)</i>	Schweizer Astronom

Literaturverzeichnis

- [1] Goethe, Johann Wolfgang von: *Faust. Eine Tragödie. Kapitel 4*. Deutscher Taschenbuch-Verlag. 1. Auflage 1997.
- [2] Holzstich eines unbekanntes Künstlers: *Ein Wanderer am Weltenrand*. Entnommen aus: Flammarion, Camille: *L'atmosphère: météorologie populaire*. Hachette-Livre-Verlag, 1888, Druck: 2018.
- [3] Bersinger, Walter: *James Cook und die Vermessung des Sonnensystems*. 3. Auflage (online), 2004.
- [4] Elster, Doris: *In welchen Kontexten sind naturwissenschaftliche Inhalte für Jugendliche interessant? Ergebnisse der ROSE-Erhebung in Österreich und Deutschland*. In: PLUS LUCIS 3, 2007, S. 2 - 8.
- [5] Sjøberg, Svein; Schreiner, Camilla: *The ROSE project. Overview and key findings*. University of Oslo, 2010. Online abrufbar unter: <https://roseproject.no/network/countries/norway/eng/nor-Sjoberg-Schreiner-overview-2010.pdf>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [6] Ackermann, Böhlemann, et al.: *Fokus Physik. Einführungsphase SII*. Cornelsen-Verlag, 1. Auflage 2014.
- [7] Ackermann, Breuer, et al.: *Fokus Physik. Qualifikationsphase SII*. Cornelsen-Verlag, 1. Auflage 2014.
- [8] Oberholz: *Dorn Bader. Physik Einführungsphase*. Schroedel-Verlag, 1. Auflage 2014.

- [9] Kilian, Oberholz: *Dorn Bader. Physik Qualifikationsphase Grundkurs*. Schroedel-Verlag, 1. Auflage 2015.
- [10] Meyer, Schmidt: *Physik. Gymnasiale Oberstufe*. Duden Schulbuchverlag, 1. Auflage 2016.
- [11] Blüggel, Hegemann: *Impulse Physik. Oberstufe Einführungsphase*. Klett-Verlag, 1. Auflage 2014.
- [12] Blüggel, Hegemann, et al.: *Impulse Physik. Qualifikationsphase Grundkurs*. Klett-Verlag, 1. Auflage 2015.
- [13] Grehn, Krause: *Metzler Physik*. Schroedel-Verlag, 2. Auflage 2008.
- [14] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg: *Bildungsplan des Gymnasiums. Physik*. Neckar-Verlag, 2016.
- [15] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus: *Jahrgangsstufenlehrplan*. Online-Fassung abrufbar unter: http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26172.html
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [16] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I. Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik*. Heft 4721, Ritterbach-Verlag, 2014.
- [17] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. Physik*. Heft 3411, Ritterbach-Verlag, 2019.
- [18] Mayring, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse*. In: Flick, Uwe (Hrsg.) et al.: *Handbuch qualitative Forschung: Grundlagen, Konzepte, Methoden und Anwendungen*. Beltz-Verlag. 2. Auflage 1995, S. 209 - 213.

- [19] Mayring, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Beltz-Verlag, 12. Auflage 2015.
- [20] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg: *Bildungspläne 2016. Physik. 3.5.7 Astrophysik*.
Online abrufbar unter: [http://www.bildungsplaene-bw.de/,Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/PH/IK/11-12-BF-ASTRO/07#bplink-infolayer\[5118483f\]/0/](http://www.bildungsplaene-bw.de/,Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/PH/IK/11-12-BF-ASTRO/07#bplink-infolayer[5118483f]/0/)
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [21] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus: *Lehrplan 11/12. Physik*.
Online abrufbar unter: http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_27147.html
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [22] Winnenburg, Wolfram: *Ziele, Inhalte und Aufgaben astronomischer Bildung*. In: Bernhard, Helmut: *Astronomie Heute. Anregungen und Hilfen für die Unterrichtspraxis*. Friedrich-Verlag, Velber 1995.
- [23] Diesterweg, Adolph: *Populäre Himmelskunde und astronomische Geographie*. Enslin-Verlag, 6. Auflage 1860.
- [24] Dürrenmatt, Friedrich: *Die Physiker*. Diogenes-Verlag. Neufassung 1980.
- [25] Clausnitzer, Lutz et al: *Offener Brief an Bund und Länder. Warum die Astronomie in drei Bundesländern seit 1959 Pflichtfach ist und warum sie es bundesweit werden sollte*. 2009. Online abrufbar unter: http://www.lutz-clausnitzer.de/as/ProAstro-Sachsen/Offener_Brief_an_Bund_und_Laender.pdf
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [26] Klafki, Wolfgang: *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik*. 6. Auflage, Beltz-Verlag, 2007.

- [27] Astronomische Gesellschaft: *Denkschrift 2017. Perspektiven der Astrophysik in Deutschland 2017 - 2030. Von den Anfängen des Kosmos bis zu den Lebensspuren auf extrasolaren Planeten.* Potsdam 2017.
- [28] Zimmermann, Helmut: *Warum Astronomieunterricht in den Schulen?* In: Lotze, Karl-Heinz et al.: *Wege in der Physikdidaktik. Band 5: Naturphänomene und Astronomie.* Deutsche Physikalische Gesellschaft, Jena 2002.
- [29] The Event Horizon Telescope Collaboration: *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole.* In: The Astrophysical Journal Letters, 875:L1 (17pp), April 2019. Online abrufbar unter: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1906/1906.11238.pdf>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [30] Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund; Häußler, Peter: *Physikdidaktik. Theorie und Praxis.* 2. Auflage, Springer Verlag, 2009.
- [31] Behrendt, Helga: *Physikalische Schulversuche. Didaktische Theorie, methodische Praxis und die Einstellung von Schülern zur Auswahl der Versuchsgeräte.* Dissertation, Pädagogische Hochschule Kiel 1990.
- [32] Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund; Häußler, Peter: *Physikdidaktik. Eine Einführung.* 2. Auflage, Springer Verlag, 2001.
- [33] Wiesner, Hartmut; Schecker, Horst; Hopf, Martin: *Physikdidaktik. kompakt.* 1. Auflage, Aulis-Verlag, 2010.
- [34] Homepage des Lehrmittelherstellers Phywe: <https://www.phywe.de/de/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [35] Homepage des Lehrmittelherstellers Leybold Didactic: <https://www.ld-didactic.de/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021

- [36] Homepage des Lehrmittelherstellers Conatex: <https://www.conatex.com/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [37] Homepage des Lehrmittelherstellers Fruhmann: <https://shop.ntl.de/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [38] Strategie der Kultusministerkonferenz *Bildung in der digitalen Welt*.
Online abrufbar unter: <https://www.kmk.org/themen/bildung-in-der-digitalen-welt/strategie-bildung-in-der-digitalen-welt.html>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [39] PHYWE Messwerterfassung mit Cobra. Bild online abrufbar unter: <https://www.phywe.de/de/top/links/cobra4/#XpertLinkInfo>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [40] Leybold Didactic Cassy. Bild online abrufbar unter: <https://www.leybold-shop.de/physik/geraete/systeme/cassy.html?limit=50&>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [41] FourierEdu: einstein Messwerterfassung. Bild online abrufbar unter: <http://www.fourieredu.de/fourier-einstein-labmate-plus-datenlogger-inkl-6-sensoren-intern-4x-sensor-port-bluetooth-akku.html>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [42] Siehe z. B.: Brun, Rene et al.: *ROOT, an object oriented data analysis framework*.
CERN, Genf. Linux-Journal 51, Article No. 6. 1998.
- [43] Download des Analyse-Softwarepakets ROOT: <https://root.cern.ch/downloading-root>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [44] Van Albada, Tjeerd S. et al.: *Distribution of Dark Matter in the spiral galaxy NGC 3198*. The Astrophysical Journal, vol. 295. 1985, S. 305 ff.
- [45] Liddle, Andrew: *Einführung in die moderne Kosmologie*. Wiley-VCH-Verlag, 2. Auflage, 2009.

- [46] Unsöld, Albrecht; Baschek, Bodo: *Der neue Kosmos*. 7. Auflage, korrigierter Nachdruck, Springer-Verlag, 2004, S. 415 ff.
- [47] Bild von Fritz ZWICKY: Fritz-Zwicky-Stiftung.
Bildquelle: <http://www.zwicky-stiftung.ch/BioLang.htm>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [48] Cotterell, Brian: *Physics And Culture*. World Scientific Europe, 2017.
- [49] Smith, Sinclair: *The Mass of the Virgo Cluster*. The Astrophysical Journal, vol. 83. 1936, S. 23 ff.
- [50] Babcock, Horace Welcome: *The rotation of the Andromeda Nebula*. University of California Publications Astronomy. Lick Observatory Bulletin. Number 498. 1939, S. 41 ff.
- [51] Oort, Jan Hendrik: *Some Problems Concerning the Structure and Dynamics of the Galactic System and the Elliptical Nebulae NGC 3115 and 4494*. Astrophysical Journal, vol. 91. 1940, S. 273 ff.
- [52] Bild von Jan Hendrik OORT: Universiteit Leiden.
Bildquelle: <https://www.strw.leidenuniv.nl/outreach/images/Oort05.jpg>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [53] Kahn, Franz Daniel; Woltjer, Lodewijk: *Intergalactic Matter and the Galaxy*. The Astrophysical Journal, vol. 130. 1959, S. 705 ff.
- [54] Rubin, Vera Cooper; Ford, William Kent Jr.: *Rotation of the Andromeda Nebula from a spectroscopic survey of emission regions*. The Astrophysical Journal, Volume 159. 1970, S. 379 ff.
- [55] Brandt, John C.: *On the Distribution of Mass in Galaxies. I. The Large-Scale Structure of ordinary spirals with applications to M31*. The Astrophysical Journal, vol. 131, 1960, S. 293 ff.

- [56] Bild von Vera Cooper RUBIN. Bildquelle:
<https://astronomy.fm/2016/12/26/sad-to-hear-that-vera-rubin-has-passed-away/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [57] Roberts, Morton S.; Whitehurst Robert Neal: *The Rotation Curve and Geometry of M31 at large galactocentric distances*. The Astrophysical Journal, vol. 201. 1975, S. 327 ff.
- [58] Carignan, Claude et al.: *Extended H1 Rotation Curve and Mass Distribution of M31*. The Astrophysical Journal, vol. 641. 2006, S. 109 ff.
- [59] Saba, Marcelo Magalhães Fares; da Silva Rosa, Rafael Antônio: *The Doppler Effect of a Sound Source Moving in a Circle*. In: The Physics Teacher, vol. 41. 2003, S. 89 ff.
- [60] Bilder von Beobachtungen zu Gravitationslinsen, aufgenommen vom HUBBLE - Weltraumteleskop, Bilder veröffentlicht am 8. Januar 2020.
Online abrufbar unter: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2020/04/4606-Image?itemsPerPage=100&keyword=Gravitational%20lens>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [61] Gebhardt, Wolfgang: *Gravitational Lensing*. Onlinepublikation abrufbar unter: http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/Lect11gravitlens.pdf
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021.
- [62] Surdej, Jean; Refsdal, Sjur; Pospieszalska-Surdej Anna: *Didactical Experiments on Gravitational Lensing*. Onlinepublikation abrufbar unter <http://vela.astro.uilg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/engl/DE/didac.html>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [63] Lotze, Karl-Heinz: *Eine gläserne „Gravitations“-Linse*. In: Astronomie und Raumfahrt. 41. Friedrich-Verlag, Nr 5, 2004, S. 10 - 13.

- [64] Simionato, Silvia: *The Glass „Gravitational“ Lens Experiment*. In: PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 2020.
Online abrufbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1039/1133>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [65] Newton, Isaac: *Opticks: Or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. 4. Auflage London 1730. Jetzt: Bibliothek der University California, Los Angeles.
- [66] Michell, John: *VII. On the means of discovering the distance, magnitude, & c. of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose. By the Rev. John Michell, B.D. F.R.S. In a letter to Henry Cavendish, Esq. F.R.S. and A.S.* In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 74, 1784, S. 35 - 57.
Online abrufbar unter: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1784.0008>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [67] von Soldner, Johann Georg: *Ueber die Ablenkung eines Lichtstrals von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbei geht*. In: Bode, Johann Elert: *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1804*. Berlin, S. 169 ff.
- [68] Einstein, Albert: *Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*. In: Annalen der Physik, vol. 35. 1911, S. 898 ff.
- [69] Bild von Albert EINSTEIN: Library of Congress, cph 3b46036.
Bildquelle: <http://loc.gov/pictures/resource/cph.3b46036/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021

- [70] Sauer, Tilmann: *Nova Geminorum 1912 and the origin of the idea of gravitational lensing*. In: *Archive for History of Exact Sciences*. vol. 62. 2008, S. 1 - 22.
- [71] Brief von Albert EINSTEIN an Heinrich ZANGGER, Berlin 15. Oktober 1915. Abgedruckt in: Schulman, Robert; Kox, Anne Jacob et al.: *The Collected Papers of Albert Einstein*. vol. 8: *The Berlin Years: Correspondence, 1914-1918*. Princeton University Press, S. 137.
- [72] Einstein, Albert: *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. In: Königliche Preußische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte, Berlin 1915, S. 831–839. Online abrufbar unter: http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get_file?pdfs/SPAW./1915/1915PAW.....831E.pdf
 Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [73] Dyson, Frank Watson; Eddington, Arthur Stanley; Davidson, Charles Rundle: *A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919*. In: *Philosophical Transactions Of The Royal Society of London*, vol. 220, 1920, S. 291 – 333.
 Online abrufbar unter: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.1920.0009>
 Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [74] Einstein, Albert: *Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field*. In: *Science*, vol. 84, Issue 2188, 1936, S. 506 f.
- [75] Eddington, Arthur Stanley: *Space Time and Gravitation: An outline of the general relativity theory*. Cambridge University Press, 1920.
- [76] Link, František: *Sur les conséquences photométriques de la déviation d'Einstein*. In: *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences (T202)*, Paris 1936.
- [77] Zwicky, Fritz: *Nebulae as Gravitational Lenses*. In: *Physical Review*, vol. 51, Issue 4, 1936.

- [78] Zwicky, Fritz: *On the Probability of Detecting Nebulae Which Act as Gravitational Lenses*. In: Physical Review, vol. 51, Issue 8, 1937.
- [79] Darwin, Charles: *The Gravity Field of a Particle*. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 249, Number 1257, 1959, S. 180 - 194.
- [80] Metzner, A. W. Kenneth: *Observable Properties of Large Relativistic Masses*. In: Journal of Mathematical Physics, vol. 4, Issue 1194, 1963, S. 1194 – 1205.
- [81] Klimov, Yu. G.: *The Deflection of Light Rays in the Gravitational Fields of Galaxies as turned to account in extragalactic astronomy*. In: Akadademii Nauk SSSR, vol. 150, Number 1, 1963, S. 64 – 67. Online abrufbar unter: <http://www.mathnet.ru/links/6e32152c846821107310d1eaa3b66dc0/dan27912.pdf>
 Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [82] Liebes, Sidney: *Gravitational Lenses*. In: Physical Review, vol. 133, Issue 3B, 1964, S. B835 - B844.
- [83] Refsdal, Sjur; Bondi, Hermann: *The Gravitational Lens Effect*. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 128, Issue 4, 1964, S. 295 - 306.
- [84] Walsh, David; Carswell, Robert F.; Weymann, Ray J.: *0957 + 561 A, B: twin quasistellar objects or gravitational lens?*. In: Nature, vol. 279, 1979, S. 381 – 384.
- [85] Lynds, Roger; Petrosian, Vahé: *Luminous arcs in clusters of galaxies*. In: Astrophysical Journal, Part 1, vol. 336, 1989, S. 1 - 8.
- [86] Soucail, Geneviève; Mellier, Yannick et al.: *The giant arc in A 370: spectroscopic evidence for gravitational lensing from a source at $Z=0.724$* . In: Astronomy and Astrophysics, vol. 191, 1988, S. L19 - L21.
- [87] Falbo-Kenkel, Maria; Lohre, Joe: *Simple gravitational lens demonstrations*. In: The Physics Teacher, vol. 34, 1996, S. 555 - 557.

- [88] Einasto, Jaan; Haud, Urmas: *Galactic models with massive corona*. In: Astronomy and Astrophysics, vol. 223, 1989, S. 89 - 94.
- [89] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: *Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht an allgemeinbildenden Schulen in Nordrhein-Westfalen (RISU-NRW)*. Ritterbach-Verlag, Heft 1031/1, Ausgabe 2017.
- [90] Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 4. Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer-Verlag. 3. Auflage 2009, S. 408.
- [91] Particle Data Group: *Particle Physics Booklet. Extracted from the Review of Particle Physics*. Chinese Physics C, 40, 100001. 2016, S. 161.
- [92] Bild entnommen aus: Ender, Manfred: *Die Nukleosynthese der Elemente*. Online-Publikation, 2020, S. 28.
Online abrufbar unter: <http://manfred-ender.serpedon.de/pdf/Nukleosynthese.pdf>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [93] Gaßner, Josef Martin: *Berechnungen zur primordialen Nukleosynthese*. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2008.
- [94] Peimbert, Manuel; Luridiana, Valentina; Peimbert, Antonio: *Revised Primordial Helium Abundance based on new atomic data*. In: The Astrophysical Journal, vol. 666, 2007, S. 645.
- [95] Fukugita, Masataka; Kawasaki, Masahiro: *Primordial Helium Abundance: A re-analysis of the Izotov-Thuan Spectroscopic Sample*. In: The Astrophysical Journal, vol. 646, 2006, S. 694.
- [96] Bild entnommen aus: Gaßner, Josef Martin: *Berechnungen zur primordialen Nukleosynthese*. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2008, S. 7 in Anlehnung an: Burles, Scott; Nollett, Kenneth; Turner, Michael: *Big-Bang Nucleo-*

- synthesis: Linking Inner Space and outer Space*. Poster, University of Chicago, 1999.
- [97] Offizielle Seite der NASA über die WMAP-Raumsonde: <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [98] Schramm, David; Turner, Michael Stephen: *Big-Bang Nucleosynthesis. Enters the Precision Era*. In Reviews of Modern Physics, vol. 70, 1998, S. 310 ff.
- [99] Tegmark, Max; et al.: *Cosmological parameters from SDSS and WMAP*. In: Physical Review Journals, D69:103501, 2004.
- [100] Planck Collaboration: *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*. In: Astronomy & Astrophysics, vol. 594, A13, 2016.
- [101] Offizielle Seite der NASA zum Planck Weltraumteleskop: <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/planck/curr/>
letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [102] Freedman, Wendy; et al.: *The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*. In: The Astrophysical Journal, vol. 882, 2019.
- [103] Burles, Scott; Nollett, Kenneth; Turner, Michael: *Big-Bang Nucleosynthesis: Linking Inner Space and outer Space*. Poster, University of Chicago, 1999.
- [104] Bild von Hans Albrecht Bethe: Nobel Prize Organisation. Bildquelle: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1967/bethe/facts/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [105] Bethe, Hans Albrecht: *Energy Production in Stars*. In: Physical Review, vol. 55, 1939, S. 434.

- [106] Gamow, George Anthony: *Concerning the origin of chemical elements*. In: Journal of the Washington Academy of Sciences, vol. 32, 1932, S. 353 f.
- [107] Alpher, Ralph Asher; Bethe, Hans Albrecht; Gamow, George Anthony: *The Origin of Chemical Elements*. In: Physical Review, vol. 73, 1948, S. 803 f.
- [108] Alpher, Ralph Asher; Herman, Robert: *Theory of the Origin and Relative Abundance Distribution of the Elements*. In: Reviews of Modern Physics, vol. 22, 1950, S. 153 ff..
- [109] Alpher, Ralph Asher; Follin, James; Herman, Robert: *Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe*. In: Physical Review, vol. 92, 1953, S. 1347 - 1361.
- [110] Burbidge, Margaret; Burbidge, Geoffrey; Fowler, William; Hoyle, Fred: *Synthesis of the Elements in Stars*. In: Reviews of Modern Physics, vol. 29, 1957, S. 548 ff.
- [111] Monsterín, Jesús: *Observation, Construction and Speculation in Cosmology*. In: Agazzi, Evandro; Pauri, Massimo: *The Reality of the Unobservable: Observability, Unobservability and Their Impact on the Issue of Scientific Realism*. Springer-Verlag, 2000, S. 219 - 229.
- [112] Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*. Springer-Verlag. 5. Auflage 2009, S. 209.
- [113] Fixson, Dale; Mather, John Cromwell et al.: *The Cosmic Microwave Background Spectrum from the full COBE FIRAS Data Set*. In: The Astrophysical Journal, vol. 473, 1996, S. 584.
- [114] Bild der Temperaturintensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung aus den 9-Jahres-WMAP-Daten.
Bildquelle: <https://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021

- [115] Hinshaw, Gary; Nolta, Michael et al.: *Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature Analysis*. In: *Astrophysical Journal*, Supplement Series, vol. 170, 2007, S. 335 - 376.
- [116] Sachs, Rainer Kurt; Wolfe, Arthur Michael: *Perturbations of a Cosmological Model and Angular Variations of the Microwave Background*. In: *Astrophysical Journal*, vol. 147, 1967, S. 73 ff.
- [117] Silk, Joseph: *Cosmic Black-Body Radiation and Galaxy Formation*. In: *Astrophysical Journal*, vol. 151, 1968, S. 459 ff.
- [118] Regener, Erich: *Der Energiestrom der Ultrastrahlung*. In: *Zeitschrift für Physik*, vol. 80, 1933, S. 666 - 669.
- [119] McKellar, Andrew: *Molecular Lines from the Lowest States of Diatomic Molecules Composed of Atoms Probably Present in Interstellar Space*. In: *Publications of the Dominion Astrophysical Observatory*, vol. 7, 1941.
- [120] Alpher, Victor: *Ralph A Alpher, George Antonovich Gamow, and the Prediction of the Cosmic Microwave Background Radiation*. In: *Asian Journal of Physics*, vol. 23, 2014, S. 17 - 26.
- [121] Herzberg, Gerhard: *Spectra of diatomic molecules*. Van Nostrand-Verlag. 2. Ausgabe 1950.
- [122] Bild von Arno Allan PENZIAS und Robert Woodrow WILSON aufgenommen von Roger Ressmeyer. Veröffentlicht von Cosmos Magazin - The Science of everything. Bildquelle: cosmosmagazine.com/physics/birth-big-bang-theory
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [123] Penzias, Arno Allan; Wilson, Robert Woodrow: *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*. In: *Astrophysical Journal Letters*, vol. 142, 1965, S. 419 - 421.

- [124] Dicke, Robert Henry; Peebles, Philipp James; Roll, Peter; Wilkinson, David Todd: *Cosmic Black-Body Radiation*. In: *Astrophysical Journal Letters*, vol. 142, 1965, S. 414 - 419.
- [125] Offizielle Seite der NASA über den COBE-Satelliten: <https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [126] Bild des Versuchsaufbaus zur Messung der Schwarzkörperstrahlung entnommen aus den Experimentierunterlagen für Schülerinnen und Schüler der Fakultät für Physik der TU Dortmund. Online abrufbar unter:
<https://www.physik.tu-dortmund.de/cms/de/0effentlichkeit-und-Schueler/Treffpunkt-Quantenmechanik/Versuche/Schwarzkoerperstrahlung.pdf>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [127] Darstellung des gemessenen Temperaturspektrums einer Halogenlampe: Bild entnommen aus Präsentationsfolien zur Vorlesung *Inkohärente Lichtquellen* von Thomas Jütsel (FH Münster): *Kapitel 4. Glüh- und Halogenlampen*.
Online abrufbar unter: https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/4-InkohaerenteLichtquellen-Glueh-_und_Halogenlampen.pdf
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [128] Haghi, Hosein; Khodadadi, Aziz; Ghari, Amir; Zonoozi, Akram Hasani; Kroupa, Pavel: *Rotation curves of galaxies and the stellar mass-to-light ratio*. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 477, 2018, S. 4187 – 4199.
- [129] Alcock, Charles et al.: *The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations*. In: *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 542, 2000, S. 281 - 307.
- [130] Alcock, Charles et al.: *EROS and MACHO Combined Limits on Planetary-Mass Dark Matter in the Galactic Halo*. In: *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 499,

- 1998, S. L1 - L9.
- [131] Boyarski, Alexey; Drewes, Marco; Lasserre, Thierry; Mertens, Susanne; Ruchayskiy, Oleg: *Sterile Neutrino Dark Matter*. Online-Publikation, Rezension zur Entwicklung in der Teilchen- und Nuklearphysik. Journal-Version.
Online abrufbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1807.07938.pdf>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [132] Allanach, Ben; Haber, Howard: *Supersymmetry, Part I (Theory)*. In: Particle Data Group: *Review of Particle Physics*. vol. 98, 2018, S. 790 - 820.
- [133] Ringwald, Andreas; Rosenberg, Leslie; Rybka, Gray: *Axions and Other Similar Particles*. In: Particle Data Group: *Review of Particle Physics*. vol. 98, 2018, S. 821 - 830.
- [134] Gershtein, Semen; Zel'dovich Yakov: *Pis'ma ZhETF*, vol. 4, 1966, S. 174.
Englische Übersetzung: JETP Letters, vol. 4, 1966, S. 120.
- [135] Zitat von Martin Rees in: Tinsley Beatrice M.; Larson, Richard B. (Hrsg.): *The Evolution of Galaxies and Stellar Populations*. Yale University Observatory. 1977, S. 339.
- [136] Lee, Benjamin W.; Weinberg, Steven: *Cosmological Lower Bound on Heavy-Neutrino Masses*. Physical Review Letters, vol. 39. 1977, S. 165 - 168.
- [137] Tremaine, Scott; Gunn, James: *Dynamical role of light neutral leptons in cosmology*. Physical Review Letters, vol. 42. 1979, S. 407 - 409.
- [138] Davis, Marc; Frenk, Carlos S.; White, Simon D. M.: *Clustering in a neutrino-dominated universe*. The Astrophysical Journal, vol. 274. 1983, S. L1 - L5.
- [139] Steigman, Gray; Turner, Michael: *Cosmological constraints on the properties of weakly interacting massive particles*. In: Nuclear Physics B, vol. 253, 1985, S. 375 - 386.

- [140] Undagoitia, Teresa Marrodán; Oberlack, Uwe; Schumann, Marc: *Abgeschirmt im Untergrund*. In: Physik Journal, vol. 18, 2019, S. 42 ff.
- [141] Aprile, Elena; Aalbers, Jasper et al.: *First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment*. In: Physical Review Letters, vol. 119, 2017, S. 181301-1 - 181301-6.
- [142] Peccei, Roberto Daniele; Quinn, Helen Rhoda: *CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles*. In: Physical Review Letters, vol. 38, 1977, S. 1440 - 1443.
- [143] Majorovits, Béla; Desch, Klaus; Ringwald, Andreas: *Neuer Schwung für Axionen*. In: Physik Journal, vol. 17, 2018, S. 33 ff.
- [144] Du, Nick et al.: *Search for Invisible Axion Dark Matter with the Axion Dark Matter Experiment*. In: Physical Review Letters, vol. 120, 2018, S. 15301-1 - 151301-5.
- [145] Braine, Thomas et al.: *Extended Search for the Invisible Axion with the Axion Dark Matter Experiment*. In: Physical Review Letters, vol. 124, 2020, S. 101303-1 - 101303-6.
- [146] Paczyński, Bohdan: *Gravitational Microlensing by the Galactic Halo*. In: Astrophysical Journal, vol. 304, 1986, S. 1 - 5.
- [147] Glanz, James: *EROS, MACHO, And OGLE Net A Haul of Data*. In: Science, vol. 268, 1995, S. 642 - 643.
- [148] Aubourg, Éric: *EROS Microlensing Results: Not Enough Machos in the Galactic Halo*. In: Cline, David: *Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe*. Springer-Verlag, 2001, S. 168 - 176.
- [149] Aker, Max; Altenmüller, Konrad et al.: *An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN*. In: Physical Review Letters, vol. 123, 2019, S. 221802-1 - 221802-10.

- [150] Higgs, Peter: *Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons*. In: Physical Review Letters, vol. 13, 1964, S. 508.
- [151] Englert, François; Brout, Robert: *Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons*. In: Physical Review Letters, vol. 13, 1964, S. 321 - 323.
- [152] Guralnik, Gerald; Hagen, Carl Richard; Kibble, Thomas Walter Bannerman: *Global Conservation Laws and Massless Particles*. In: Physical Review Letters, vol. 13, 1964, S. 585 - 587.
- [153] Pressemitteilung des CERN vom 4. Juli 2012: *CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson*. Online abrufbar unter: <https://home.cern/news/press-release/cern/cern-experiments-observe-particle-consistent-long-sought-higgs-boson>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [154] Pressemitteilung des CERN vom 14. März 2013: *New results indicate that particle discovered at CERN is a Higgs boson*. Online abrufbar unter: <https://home.cern/news/press-release/cern/new-results-indicate-particle-discovered-cern-higgs-boson>
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [155] Mößbauer, Rudolf Ludwig: *History of Neutrino Physics Pauli's Letters*. Abendvorlesung Geschichte der Neutrino-Physik, gehalten von Rudolf Mößbauer an der Technischen Universität München. Online abrufbar unter: https://web.archive.org/web/20140520221117/http://www.neutrino.uni-hamburg.de/sites/site_neutrino/content/e45939/e48540/e48541/e48544/infoboxContent48545/material-vorlesung1-moessbauer-pauli.pdf
Letzter Aufruf: 28. Mai 2021
- [156] Cowan Jr., Clyde Lorrain; Reines, Frederick et al.: *Detection of the Free Neutrino: A Confirmation*. In: Science, vol. 124, 1956, S. 103 f.

- [157] Milgrom, Mordehai: *A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis*. In: *Astrophysical Journal*, vol. 270, 1983, S. 365 - 370.
- [158] Bekenstein, Jacob David: *The modified Newtonian dynamics – MOND – and its implications for new physics*. In: *Contemporary Physics*, vol. 47, 2006, S. 387 - 403.
- [159] Bekenstein, Jacob David: *Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm*. In: *Physical Review D*, vol. 70, 2004 S. 069901.
- [160] Touboul, Pierre; Métris, Gilles et al.: *MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle*. In: *Physical Review Letters*, vol. 119, 2017, S. 231101.
- [161] Lindner, Manfred; Schultz-Coulon, Hans-Christian; Thielemann, Friedrich-Karl: *Suche nach der Dunklen Materie*. In: *Physik Jorunal*, vol. 18, 2019, S. 32 ff.
- [162] McGaugh, Stacy: *A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND*. In: *Canadian Journal of Physics*, vol. 93, 2015, S. 250 - 259.
- [163] Famaey, Benoit; McGaugh, Stacy: *Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions*. In: *Living Reviews in Relativity*, vol. 15, 2012, S. 1 ff.
- [164] Dabringhausen, Jörg; Kroupa, Pavel; Famaey, Benoit; Fellhauer, Michael: *Understanding the internal dynamics of elliptical galaxies without non-baryonic dark matter*. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 463, 2016, S. 1865 – 1880.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Holzstich: <i>Ein Wanderer am Weltenrand</i>	6
3.1	Zuordnung fünf ausgewählter Schulbücher in Hauptkategorien	29
3.2	Zuordnung drei ausgewählter Lehrpläne in Hauptkategorien	30
3.3	Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Interesse für astronomische Themen bei Schülerinnen und Schülern	36
3.4	Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Fachwissen von Schülerinnen und Schülern zu ausgewählten grundlegenden astronomischen Inhalten . .	38
4.1	Die experimentelle Methode	56
4.2	Cobra4 Xpert-Link der Firma PHYWE	63
4.3	Sensor-Cassy 2 der Firma Leybold	64
4.4	einstein LabMate der Firma FourierEdu	64
4.5	Start des Analysesoftwarepakets <code>Root</code> über die Konsole eines Linux-PCs .	66
4.6	Schematische Darstellung der methodischen Schritte zur Erkenntnisgewinnung von realem Experiment und der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Analogieexperimente im Vergleich	68
4.7	Strukturschema der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module	71
5.1	Rotationskurve unseres Sonnensystems	75
5.2	Rotationskurve der Spiralgalaxie NGC 3198	76
5.3	Schematische Darstellung der Bewegung eines Sterns um das Galaxiezentrum	78

5.4	Schematische Darstellung zur Blau- und Rotverschiebung bei der Doppleraufspaltung von Spektrallinien eines Sterns bei der Bewegung um das Galaxiezentrum	79
5.5	Fritz ZWICKY	81
5.6	Jan Hendrik OORT	82
5.7	Rotationskurve der Andromeda-Galaxie von RUBIN und FORD	83
5.8	Vera Cooper RUBIN	84
5.9	Rotationskurve der Andromeda-Galaxie von ROBERTS und WHITEHURST.	85
5.10	Rotationskurve der Andromeda-Galaxie von CARIGNAN et al.	86
5.11	Aufbau des Analogieexperiments zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit	90
5.12	Beispielmessung bei einer eingestellten Frequenz von $f = 400$ Hz	92
5.13	Frequenzmessung mit eingezeichnetem Gauß-Fit	93
5.14	Analyse- und Anpassungsoptionen von <code>Cassy Lab 2</code>	96
5.15	Auszug aus einer Textdatei mit den von <code>Cassy Lab</code> aufgenommenen Messwerten	99
5.16	Graphische Auswertung durch die Analysesoftware mit <code>Root</code>	101
5.17	Konsole nach Ausführen der Analysesoftware mit <code>Root</code> und Öffnen des <code>TBrowsers</code>	101
5.18	Auftragung von v gegen $\sqrt{\frac{1}{r}}$ für die Aufgaben 2 und 3.	106
5.19	Schematische Darstellung des Gravitationslinseneffekts.	109
5.20	Beispiele für Beobachtungen, denen der starke Gravitationslinseneffekt zugrunde liegt	110
5.21	Schematische Darstellung der Lichtablenkung durch den Gravitationslinseneffekt	112
5.22	Schematische Darstellung für die Herleitung einer Formel zum EINSTEIN-Radius	115
5.23	Albert EINSTEIN	122
5.24	Experimenteller Aufbau und Beobachtung zum Analogieexperiment zur Veranschaulichung von Verzerrungseffekten	128

5.25	Beispiele für Verzerrungen bei Einfüllen von Salz in die Mitte des Aquariums	128
5.26	Schematische Darstellung zur Simulation einer Gravitationslinse durch eine plane Glaslinse	129
5.27	Benutzeroberfläche der Excel-Simulation mit beispielhaft gewählten Werten für die Parameter	134
5.28	Graphik aus der Excel-Simulation für $\xi_0 = 100$, $i = 1$, $\psi(\xi_0) = 25$ und $x = 0,01$	135
5.29	Der Lichtstrahlenverlauf ähnelt dem einer Konvexlinse	136
5.30	Experimenteller Aufbau und Beobachtung zum Analogieexperiment zur Veranschaulichung der Entstehung eines EINSTEIN-Rings	137
5.31	Experimentelles Setup mit veränderter Ausrichtung zur Erzeugung von Mehrfachbildern und einer anderen Lichtquelle	137
5.32	Schematische Darstellung der Lichtablenkung durch den Gravitationslinseneffekt zur Verdeutlichung der Herleitung einer Formel für den Ablenkungswinkel δ nach Albert EINSTEIN	140
5.33	Skizze für die Herleitung einer Formel zum EINSTEIN-Radius	141
5.34	Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu Rotationskurven und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie	148
5.35	Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zum Gravitationslinseneffekt und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie	151
5.36	Graphische Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik“ der Schülerinnen und Schüler	155
6.1	Schematische Darstellung der möglichen Kernreaktionen während der Nucleosynthese	165
6.2	Graphische Darstellung der Situation beim Tunneleffekt	167
6.3	Entwicklung der Massenverteilung einzelner Kerne in der Frühphase des Universums in Abhängigkeit von der Temperatur	169

6.4	Graphische Darstellung der Häufigkeiten gegen die relative Baryonendichte $\Omega_B h^2$	174
6.5	Strukturdiagramm zu den Abhängigkeiten der einzelnen Dichteanteile im Universum	178
6.6	Hans Albrecht BETHE	179
6.7	Benutzeroberfläche der Excel -Simulation mit beispielhaft gewählten Werten für die Parameter	184
6.8	Graphische Darstellung der Ergebnisse der Excel -Simulation aus den zuvor beispielhaft gewählten Werten für die Parameter – Teil I	185
6.9	Graphische Darstellung der Ergebnisse der Excel -Simulation aus den zuvor beispielhaft gewählten Werten für die Parameter – Teil II	186
6.10	Schaubild zur Verdeutlichung des prozentualen Helium-Anteils	188
6.11	Graphische Darstellung des relativen Helium-Anteils χ_{He} gegen die Halbwertszeit t_h des Neutrons	191
6.12	Messung der spektralen Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem Satelliten COBE	196
6.13	Räumliche Intensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung	197
6.14	Temperaturfluktuationen in Abhängigkeit vom Winkel sowie von der Multipolordnung	198
6.15	Versuchsaufbau zum Analogieexperiment zur Veranschaulichung des Entkopplungsvorgangs	205
6.16	Versuchsaufbau zum Analogieexperiment zur Messung der Temperaturverteilung eines Schwarzen Körpers	206
6.17	Gemessenes Temperaturspektrum einer Halogenlampe	207
6.18	Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur Nukleosynthese und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie	217
6.19	Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur kosmischen Hintergrundstrahlung und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie	218

6.20	Graphische Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie“ der Schülerinnen und Schüler	220
7.1	Diagramm zur Klassifikation der elementaren Teilchenstrukturen	229
7.2	Schüttelmaschine der Firma Leybold Didactic	238
7.3	Durchführung des Analogieexperiments mit der Schüttelmaschine zur Verdeutlichung der Gründe für die Postulation massiver Neutrinos	241
7.4	Graphische Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu den Hypothesen zur Struktur der Dunklen Materie sowie der alternativen Erklärungsansätze	260
7.5	Graphische Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des dritten Moduls sowie der Unterrichtseinheit insgesamt durch die Schülerinnen und Schüler	261
8.1	Darstellung der inhaltlichen Schwerpunkte der drei Module	267
B.1	Cassy-Symbol für das Einstellungsmenü	321
B.2	Cassy-Einstellungen zur Messung und Darstellung	322
C.1	Excel-Einstellungen zur Anpassung der Simulationen	332
C.2	Excel-Einstellungen zur Anpassung der Bildlaufleiste	333

Tabellenverzeichnis

3.1	Ablaufplan der strukturierten Inhaltsanalyse nach MAYRING	18
3.2	Charakterisierung der Fundstellen in den einzelnen Schulbüchern	30
3.3	Darstellung der Ergebnisse zum Schülerinteresse für astronomische Themen	36
3.4	Darstellung der Ergebnisse zum Fachwissen der Schülerinnen und Schüler zu ausgewählten Schwerpunkten	38
4.1	Verfahren zur Elementarisierung und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie	53
4.2	Zielsetzungen von Schulexperimenten und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie – Teil 1	57
4.3	Zielsetzungen von Schulexperimenten und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie – Teil 2	58
4.4	Zielsetzungen von Schulexperimenten und ausgewählte Beispiele zu diesen aus der Astronomie – Teil 3	59
5.1	Auflistung der Analogien zwischen der Messung zur Dopplerverschiebung von Spektrallinien und dem entwickelten Experiment zur Dopplerverschie- bung von Tonfrequenzen	88
5.2	Auflistung der Analogien zwischen den Phänomenen des Gravitationslin- seneffekts und den entwickelten Experimenten und Simulationen	126
5.3	Definition der drei Anforderungsbereiche	146
5.4	Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu Rotationskur- ven und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie	146
5.5	Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zum Gravitati- onslinseneffekt und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie	149

5.6	Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik“ der Schülerinnen und Schüler	154
6.1	Entwicklung des frühen Universums bis zur Nukleosynthese	162
6.2	Tabellarische Auflistung der für dieses Kapitel wichtigen kosmologischen Parameter	176
6.3	Auflistung der Analogien zwischen den grundlegenden Entwicklungen der Entkopplungsphase und dem Anschauungsexperiment	203
6.4	Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur Nukleosynthese und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie	217
6.5	Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zur kosmischen Hintergrundstrahlung und des Zusammenhangs zur Dunklen Materie . . .	219
6.6	Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des Moduls „Beobachtungen und Befunde aus der Kosmologie“ der Schülerinnen und Schüler	221
7.1	Auflistung der elementaren Teilchen nach dem Standardmodell der Teilchenphysik	230
7.2	Auflistung der einzelnen Parameter im Vergleich zwischen den großen und den kleinen Kugeln in der Schüttelmaschine.	240
7.3	Vorlage einer möglichen systematischen Darstellung der Kandidaten für baryonische und nicht-baryonische Dunkle Materie	243
7.4	Darstellung der Ergebnisse zum Verständnis der Inhalte zu den Hypothesen zur Struktur der Dunklen Materie sowie der alternativen Erklärungsansätze	260
7.5	Darstellung der Ergebnisse zur persönlichen Bewertung des dritten Moduls sowie der Unterrichtseinheit insgesamt durch die Schülerinnen und Schüler	262

ANHANG A

Erhebungen zum Thema „Dunkle Materie“ für den Schulunterricht aus Sicht der Lernenden und Lehrenden

A.1 Fragebogen für Schülerinnen und Schüler

Nachfolgend ist der eingangs thematisierte Fragebogen für Schülerinnen und Schüler eingebunden. Die Vorstellung und Analyse der Ergebnisse ist in Kapitel 3.2 erfolgt.

Fragebogen zur Astronomie und Astrophysik

Liebe Schülerin / Lieber Schüler,

hiermit erhältst Du den Fragebogen zur Astronomie und Astrophysik. Ich möchte Dich bitten, alle Fragen wahrheitsgemäß zu beantworten. Die Auswertung erfolgt selbstverständlich anonym. Bitte schreibe also nicht deinen Namen auf diese Blätter.

Solltest Du Fragen haben, so kannst Du sie gerne während dem Ausfüllen stellen. Für sonstige Anmerkungen ist am Ende dieses Bogens Platz.

Vielen Dank für Deine Mitarbeit!

Ich bin männlich weiblich

1. Wie sehr interessierst Du dich für astronomische Themen?



2. Hast Du dich schon einmal mit astronomischen Themen oder Fragestellungen in deiner Freizeit beschäftigt?

- Nein
 Ja

Wenn „Ja“, womit genau hast Du dich beschäftigt?

3. Wie ist unser Sonnensystem aufgebaut?

4. Was ist eine Galaxie?

5. Was hast Du bereits von der Theorie des Urknalls gehört?

6. Was hast Du bereits von Dunkler Materie gehört?

7. Wie beurteilst Du die Wichtigkeit der Dunklen Materie für unser heutiges Weltbild?

Hier ist Platz für Deine Anmerkungen:

A.2 Interview mit Schülerinnen und Schülern

Das Interview ist mit drei Schülerinnen und Schülern eines Physik-Leistungskurses an einem Gymnasium in Nordrhein-Westfalen durchgeführt und mitgeschrieben worden. Nachfolgend ist die Mitschrift abgedruckt. Gänzlich aus dem Rahmen fallende Randgespräche werden im Folgenden nicht wiedergegeben. Der Interviewer wird folgend mit I abgekürzt, die Schüler mit S1, S2 und S3.

I Ihr habt bereits im Unterricht einen Fragebogen zur Astronomie und Astrophysik ausgefüllt. Ich möchte euch nun in einem persönlichen Gespräch noch ein paar tiefer gehende Fragen stellen. Ich danke euch, dass ihr gekommen seid und möchte euch bitten, dass ihr die Fragen ehrlich beantwortet. Bei der Auswertung werden eure Namen selbstverständlich nicht erwähnt. Es bleibt alles anonym.

S1 Okay.

S3 Ja, okay.

I Es geht nach wie vor um astronomische Themen im Schulunterricht. Meine erste Frage ist eine ganz persönliche: Seid ihr an astronomischen Themen interessiert?

S1 Also ich starte mal... Und ich würde für mich sagen: Ja. Ich bin definitiv interessiert an astronomischen Themen. Aber ich interessiere mich auch generell für fast alle Themen der Physik. Deswegen habe ich auch den Leistungskurs gewählt. An der Astronomie selbst interessiert mich das Universum. Ich weiß – so würde ich es aus meiner Sicht heraus sagen – recht wenig über das alles und das macht es für mich umso interessanter.

S2 Ich würde mich da anschließen. Es gibt zwar durchaus Themen, die ich nicht so interessant finde, die man einfach machen muss, aber die Astronomie hat irgendwie was. Ich weiß auch nicht, wie ich es beschreiben soll... Vielleicht etwas Geheimnisvolles? Es ist einfach ein Teil der Physik, den es schon lange gibt, von dem wir heute aber doch irgendwie nicht mehr so viel Ahnung haben.

S3 Auch ich schließe mich hier an. Ich interessiere mich auch für astronomische Themen und zwar schon seit ich Kind bin. Meine Eltern haben mir irgendwann mal zu Weihnachten ein kleines Teleskop geschenkt. Ich muss dazu sagen, dass ich von all den physikalischen Hintergründen leider keine Ahnung habe. Hier und da hab ich schon mal ein paar Sachen gehört, aber ich habe kein zusammenhängendes Wissen. Dennoch fand ich es immer schön, mit dem Teleskop zu beobachten.

S1 War klar, dass du ein Teleskop bei dir rumstehen hast... Nein, mal im Ernst, so etwas würde wahrscheinlich vielen Schülern auch Spaß machen und durchaus Interesse wecken, wenn man mal etwas mehr Wissen in dem Bereich hätte.

I Okay, also halten wir fest, dass ihr euch alle drei für astronomische Themen interessiert. Habt ihr euch denn in eurer Freizeit schon ausführlicher mit astronomischen Themen auseinandergesetzt?

S3 hat schon mit einem Teleskop Beobachtungen angestellt. Wie sieht es mit euch anderen aus?

S2 Zumindest nicht bewusst. Hier und da hört man vielleicht mal was in den Medien, wenn zum Beispiel eine Sonde ins All geschickt wird oder so. Sowas hört man sich dann mal interessiert an, aber in der heutigen Zeit hat man in den Medien so viele Themen und Sachen, die kursieren, dass keine wirklich tiefgehende Auseinandersetzung stattfindet.

I Warum nicht? Wenn so etwas in den Nachrichten kommt, könnte man doch mal selbst im Internet oder in Büchern nachschauen und selbst recherchieren.

S2 Ja, das stimmt... Mh... Es ist vielleicht auch so, dass man das nur zur Kenntnis nimmt, wenn mal was mit Astronomie irgendwo gepostet wird, aber man beschäftigt sich dann doch nicht weiter damit, weil im nächsten Moment wieder andere Sachen in den Vordergrund rücken. Dennoch interessiere ich mich aber persönlich für die astronomischen Themen.

I Okay, verstehe. Ich würde das mal unter einer oberflächlichen Berichterstattung und

Mediennutzung begreifen. Aber warum, wenn ihr euch doch für astronomische Themen interessiert, recherchiert ihr nicht in einer ruhigen Minute oder fragt auch mal im Unterricht nach?

S1 Weil man dafür erst mal eine konkrete Frage braucht. Die haben wir vielleicht in dem Moment gar nicht. In der heutigen Zeit ist die Astronomie irgendwie kein wirklicher Bestandteil des normalen Lebens mehr, wenn man so möchte. Früher haben die Menschen einen tieferen Sinn in der Beobachtung von Sternen für ihr eigenes Leben gesehen, heute rückt die Astronomie doch gewaltig in den Hintergrund.

S3 Das stimmt. Sie ist nicht mehr Teil des Alltags der Menschen.

I Könnt ihr das etwas genauer ausführen?

S3 Ja also, es ist doch so, dass man früher durch die Beobachtung von Sternen irgendwelche Sachen wie zum Beispiel Überflutungen oder sonstige Naturereignisse, die, sagen wir mal, mit einer gewissen Regelmäßigkeit auftreten, vorhersagen konnte. Oder man hat in die Sterne geschaut, um sich die Zukunft vorhersagen zu lassen. Bei Königen war das doch sehr beliebt.

S1 Ja und man hat doch generell auch, um Kalender zu entwickeln, die Sterne benötigt. Die Kalender, die es gab und ja auch heute noch gibt, richten sich doch nach den Sternen oder der Bahn von Planeten und so.

S3 Und heute schaut man aufs Handy und weiß, was wir für einen Tag, für ein Jahr haben. Man braucht nicht mehr aktiv in den Himmel zu schauen, irgendwelche Beobachtungen anzustellen.

S2 Selbst wenn man die Tageszeit bestimmt, ist das doch so eine Sache.

S3 Wir sind bei Kalendern.

S2 Ja, ich weiß. Aber das gehört auch mit dazu. Früher hat man sich am Verlauf der Sonne orientiert. Heute gucke ich auf mein iPhone und weiß, wie spät es ist. Ich muss nicht mal wissen, wo die Sonne ihren Lauf nimmt und wo sie gerade steht.

S3 Ach so, das meinst du. Ja, das stimmt.

I Okay, ich verstehe, was ihr meint. Woran glaubt ihr, liegt dieses Problem, dass die
Astronomie mehr und mehr im alltäglichen Leben in den Hintergrund zu rücken
scheint?

S1 Industrialisierung, technischer Fortschritt, Aufkommen verschiedenster Medien...

S2 Ja.

S3 Definitiv. Die ganzen Technologien sind dermaßen nützlich und allgegenwärtig, dass
man gewisse Dinge nicht mehr aktiv selbst wissen oder tun muss, weil sie einem
abgenommen werden. Und dann verlernt man das.

S1 Dazu kommt, dass man es dann auch von anderer Seite nicht mehr lernt. In der Schule
beispielsweise haben wir noch nie etwas mit Astronomie gemacht, oder?

S2 Höchstens mal Jahreszeiten und Ebbe und Flut oder so. Das Gravitationsgesetz ken-
nen wir, die Kepler'schen Gesetze kennen wir, aber mehr ist da nicht.

S1 Ja gut, ok. Ein bisschen was haben wir vielleicht doch gemacht. Aber wenn wir uns
mal so grundlegende astronomische Sachen anschauen würden, würde das auch nicht
schaden.

I Zum Beispiel?

S1 Naja, zum Beispiel, wie das Universum entstanden ist.

S3 Als ob wir sowas in der Schule machen würden. Das passt nicht in den Unterricht.

S2 Naja, warum denn nicht? Die Entwicklung des Universums ist, denke ich, eine sehr
interessante Sache, aber auch so Sachen wie Sternbilder, Aufbau des Universums,
Galaxien und so. Vielleicht kann man auch einfach mal einen aktuellen Bezug zu
Forschungsgebieten herstellen und mal einfach darstellen, was man so macht, worüber
man heutzutage nachdenkt.

- S1 Genau. In der Elementarteilchenphysik machen wir das ja sogar im Leistungskurs, halt nur für ein etwas anderes Gebiet der Physik. Aber hier lernen wir ja auch im Wesentlichen nur die Klassifikationen, also das Standardmodell, und sonst ist da ja gar nicht so viel. Trotzdem lernen wir ja so ein bisschen was über aktuelle Fragestellungen der Physik. Sowas in diese Richtung könnte ich mir auch für die Astronomie vorstellen. Also Grundlagen und dann eben so Aktuelles.
- S3 Es ist ja auch so, dass man schon mal einiges in den Medien hört, beispielsweise wenn etwas Neues entdeckt wurde. Da kann man ja auch mal im Unterricht Bezug drauf nehmen. In anderen Fächern wird das ja prinzipiell immer gemacht. Zum Beispiel in Politik. Wenn Wahlen sind, oder wenn irgendwelche politischen Entscheidungen anstehen, machen wir im Unterricht auch etwas dazu. Das könnte man ja hier auch machen. Denn aktuelle Dinge, die dann auch interessant und wichtig sind, gibt es ja bestimmt häufig. Und wenn man dann einfach mal so ein vernetztes Wissen hat, wäre das schon gut. Denn so hört man dann vielleicht mal was von Schwarzen Löchern beispielsweise, aber man weiß gar nicht, was ein Schwarzes Loch eigentlich ist.
- I Gut, das klingt alles nachvollziehbar. Es stellt sich dann nur die Frage nach der praktischen Umsetzung. Wo und wie würdet ihr euch denn konkret eine Thematisierung von astronomischen Inhalten im Schulunterricht wünschen?
- S1 Also ich würde sagen, dass gewisse grundlegende Sachen sowieso unterrichtet werden sollten. Und dann kann man ja in der Oberstufe noch mal unterscheiden. Im Leistungskurs würde ich auf jeden Fall, so wie zur Elementarteilchenphysik, auch eine Rubrik zur Astronomie machen, die dann auch unterrichtet werden muss. Im Grundkurs hat man dann natürlich weniger Zeit, da würde dann eine abgespeckte Variante reichen.
- S3 Ich könnte mir auch vorstellen, dass man zusätzlich zum Unterricht auch etwas Freiwilliges anbietet, um sich da näher zu informieren.
- S2 Das wäre jetzt auch mein Vorschlag gewesen. Vielleicht so eine Art AG für die Mit-

telstufe und dann in der Oberstufe im Leistungskurs auf jeden Fall.

S3 Ja, genau. Wenn man den Leistungskurs gewählt hat, ist man ja sehr interessiert an Physik und möchte eigentlich auch über alle Themen etwas Bescheid wissen. Da gehört das auf jeden Fall mit rein.

I Okay, also halte ich fest, dass man für die Mittelstufe die Themen etwas ausweitet und Grundlagen schafft. Ergänzend dazu kann eine AG angeboten werden. Und in der Oberstufe im Leistungskurs sollte auf jeden Fall ein Inhaltsfeld Astronomie ergänzt werden.

S1 Ja, das wäre, denke ich, ganz gut.

I Ich danke euch für das Gespräch.

A.3 Interview mit Lehrkräften

Das Interview ist mit drei Physik-Lehrern (alle mit der Lehrbefähigung für die gymnasiale Oberstufe) sowie einem Lehramtsanwärter durchgeführt worden. Die vier Lehrkräfte unterrichten an drei verschiedenen Gymnasien in Nordrhein-Westfalen. Das Interview ist mitgeschrieben worden. Der Interviewer wird nachfolgend mit I abgekürzt, die vier Lehrkräfte mit L1, L2, L3 und L4. Bei Lehrer L4 handelt es sich um den Lehramtsanwärter.

I Vielen Dank, dass Sie alle gekommen sind. Ich möchte Ihnen ein paar Fragen zu einem möglichen neuen Unterrichtsinhalt im Inhaltsfeld der Astronomie stellen. Ich werde versuchen, Ihre Antworten mitzuschreiben, die Auswertung ist später selbstverständlich anonym. Meine erste Frage: Welche Gründe sprechen Ihrer Ansicht nach für das Unterrichten astronomischer Inhalte?

L1 Da gibt es eine Menge. Zunächst einmal ist die Astronomie genau wie viele andere Gebiete ein zentrales Gebiet in der Physik. Wir unterrichten in der Schule ja nach Inhaltsfeldern. Diese sind zum Beispiel Mechanik, Elektrik oder Atomphysik. Zu diesen Inhaltsfeldern würde auch die Astronomie zählen, denn auch sie ist – sofern man sie nicht als eigene Wissenschaft tituliert – ein Teil der Physik. Wenn man historisch sich mal die Entwicklung der Physik anschaut, wird man feststellen, dass die Astronomie wohl die älteste Wissenschaft ist. Aus ihr haben sich zentrale Thesen der Mechanik entwickelt und sie ist auch heute noch ein Gebiet, wo viele Inhalte der Mechanik, der Quantenphysik, der Atom- und Kernphysik sowie der Thermodynamik vereint werden. Die Astronomie ist also nicht nur generell als Thema der Physik zu sehen, sondern sogar als vernetzendes Thema und als historisch bedeutsames Thema.

L2 Ich kann meinem Vorredner nur beipflichten. Genau das sind die zentralen Gründe für das Unterrichten astronomischer Inhalte. Ich würde aber sogar noch einen Schritt weiter gehen und nicht nur den Stellenwert der Astronomie benennen, sondern auch mal auf unsere Schülerinnen und Schüler schauen. Die Astronomie ist nämlich auch

ein begeisterndes und motivierendes Thema. Wenn ich als Physik-Lehrer die elektrische Leistung einführe, ist das für die Schülerinnen und Schüler in der Regel nicht motivierend. Klar kann ich durch Experimente, durch Kontextbezüge und so weiter für Motivation sorgen, aber eine intrinsische Motivation ist bei Schülerinnen und Schülern nicht vorhanden. Wie auch? Kein Mensch fragt sich einfach so, wie sich die elektrische Leistung berechnet. Zumindest nicht von Natur aus, von sich aus. Aber man fragt sich durchaus von sich aus, woher kommen wir, wohin gehen wir. Was ist das alles am Himmel? Warum gibt es so etwas wie Tag und Nacht oder Frühling und Winter? Was passiert bei einer Sonnenfinsternis? Wie entstehen Polarlichter? All diese Fragen, die astronomische Bezüge aufweisen, sind durchaus Fragen, die man sich als Kind, als Jugendlicher und auch als Erwachsener stellt. Es sind in jedem Fall eine Menge Fragen, die für unsere Schülerinnen und Schüler interessant sein dürften.

L4 Das sehe ich auch so. Ich selbst habe während dem Studium schon Astrophysik und Astronomie als interessante Module kennen gelernt und denke auch, dass sich das so auf Schülerinnen und Schüler übertragen lässt. Zumal die Themen ja durchaus welche sind, wo jeder schon mal was von gehört hat, man aber vielleicht keine Erklärung dafür weiß. Außerdem lassen sich aktuelle Bezüge zu den jetzt wichtigen Forschungsgebieten herstellen. Auch das dürfte noch mal motivieren.

L3 Ich würde mich in den meisten Punkten wahrscheinlich nur wiederholen, wenn ich jetzt meine Meinung komplett darlegen sollte. Deswegen beschränke ich mich mal auf folgenden Aspekt: Astronomische Inhalte werden in vielen Filmen, egal ob sie aus dem Fantasy- aus dem Abenteuer- oder aus dem Science-Fiction-Genre sind, angesprochen. Dadurch ist die Astronomie unterbewusst durchaus eines der zentralen Themen, welchem unsere Schülerinnen und Schüler in der heutigen Zeit ausgesetzt sind. Die vermeintliche Unkenntnis bei unseren Schülerinnen und Schülern oder eigentlich in der ganzen Gesellschaft sorgt dann für eine gewisse Faszination an diesem Thema. Wenn jeder so viel über Astronomie wüsste, wäre die Astronomie keineswegs so faszinierend wie sie es nun mal ist. Es ist nicht abzustreiten, dass sogar die Grund-

züge der Astronomie, wie zum Beispiel der Aufbau unseres Sonnensystems oder die Verortung von Strukturen, also Planeten, Sterne, Monde, Sonnensysteme, Galaxien et cetera, kaum geläufig sind. Und da reden wir noch nicht über aktuelle Dinge wie L4 gerade angemerkt hat. Ich rede noch nicht von der Entwicklung des Universums, von Schwarzen Löchern, von Dunkler Materie, von Dunkler Energie und so weiter. Die Tatsache, dass jedoch gerade auch diese aktuellen Themen viele Fragen aufwerfen, ist durchaus erwähnenswert. Denn gerade hierdurch kommt der Astronomie auch etwas Geheimnisvolles, etwas Mystisches zu, weil sie uns immer wieder vor Augen führt, wie klein, winzig und unwissend wir Menschen doch sind.

I Bleiben wir doch mal bei den aktuellen Themengebieten, da sie zum Schluss von Ihnen angesprochen wurden. Wie stehen Sie denn zum Thema der Dunklen Materie? Sollte dies im Schulunterricht behandelt werden?

L4 Ich selbst finde, ja! Zum einen ist es ein aktuelles Thema mit vielfältigem Anknüpfungspotential, zum anderen ist allein der Name schon motivierend für Schülerinnen und Schüler. Der Name sagt natürlich erst mal nur aus, dass man diese Materie nicht sehen kann, sie also dunkel ist, aber man verbindet auf psychologischer Seite doch etwas Geheimnisvolles damit, was es ja auch ist, denn schließlich weiß man auch heute noch nicht, wie sich die Dunkle Materie zusammensetzt, was sie überhaupt ist.

L1 Ansprechen sollte man aktuelle Themen in jedem Fall. Ob es nun die Dunkle Materie sein muss, weiß ich nicht. Sie ist natürlich up to date, so würde man wahrscheinlich sagen. Aber genau das ist natürlich auch ein Problem für Lehrkräfte, die schon länger im Dienst sind und aufgrund der vielen Dinge, die im Schulalltag anstehen, nicht mehr die aktuelle Forschung verfolgen. Ich selbst würde also objektiv sagen, ja durchaus. Subjektiv für mich gesprochen, muss ich klar eingestehen, dass ich mich erst mal in dieses Thema einarbeiten müsste. Mir fehlt hier ganz klar Wissen.

L3 Ja, das stimmt. Unser junger Kollege L4 ist natürlich näher dran. Das ist gut. Ich selbst bin jetzt schon seit über dreißig Jahren Lehrer und einfach aus den aktuellen

Forschungsinhalten raus. Ich selbst finde das allerdings super spannend und durchaus wichtig, auch solche Sachen im Unterricht zu thematisieren. Wir wollen ja nicht nur das unterrichten, was schon seit Jahrtausenden bekannt ist, sondern auch das, was eben neu ist und gerade wichtig ist für die weitere Entwicklung der Physik. Man müsste hier allerdings auf Fortbildungen Lehrkräfte unterstützen. Das sollte aber kein Problem darstellen. Wir haben das in der Vergangenheit bei der Elementarteilchenphysik, die ja jetzt auch neu in der Oberstufe ist und jahrelang nicht im Lehrplan verankert war, höchstens als Exkursthema in einzelnen Schulbüchern zu finden war, auch erlebt. Heute konzentriert sich die Forschung ja zu einem beträchtlichen Teil auf die Teilchenphysik. Dementsprechend ist klar, dass wir es auch in der Schule unterrichten müssen. In Fortbildungen hat man uns da gut vorbereitet. Und die Schulbuchverlage haben da meiner Meinung nach auch gut mitgezogen und aktualisierte Auflagen erstellt. So etwas könnte man mit der Dunklen Materie in ähnlicher Weise durchführen. Man bräuchte also Fortbildungen und gute Schulbücher, die das auch mit abdecken.

L2 Ich stimme hier zu. Das Thema an sich ist interessant und auch für die Schule geeignet. Jedoch hapert es an der Fachkompetenz der Lehrer und an Material hierzu. Wenn es also in den Unterricht flächendeckend verbindlich aufgenommen werden soll, dann müssen Materialien für uns Lehrer vorbereitet werden, Fortbildungen organisiert werden, Unterrichtsreihen als Idee zur Verfügung gestellt werden und so weiter. Zu den Unterrichtsreihen gehören dann auch Arbeitsblätter, Aufgaben, Darstellung von Experimenten und so weiter. All das müsste beispielhaft zentral bereitgestellt werden.

L4 Wenn wir dabei sind, würde ich dann noch ergänzen, dass man auch bewusst in der Lehrerausbildung, also im Studium beispielsweise, auf das Thema der Dunklen Materie eingeht. Auch hier müsste dann einiges anders laufen. Die Astronomie und Astrophysik dürften nicht nur als Randthema oder als einzelnes Modul irgendwo mal auftauchen, sondern es müsste ein verstärkter Schwerpunkt hier gesetzt werden, damit

man sich eben auch der Themen fachlich tiefgehend sicher ist, bevor man sie dann später irgendwann unterrichtet. Das ist natürlich nicht ganz einfach, da das Studium in klar vorgeschriebene Module eingeteilt ist und man nicht alles beliebig ausführlich behandeln kann, aber vielleicht wäre es möglich, über Wahlpflichtmodule zumindest ein größeres Angebot zu schaffen, damit man sich hier weiterbilden kann. Vielleicht kann man ja auch verbindlich in den Praktika, die man als Student durchführen muss, ein bis zwei Experimente, die man hierzu in der Schule durchführen kann, auch anbieten.

L3 Da stimme ich zu. Wenn ich an meine Studienzeit zurückdenke, die natürlich schon ein paar Jahre her ist, erinnere ich mich an eine Vorlesung zur Astrophysik, die auch nur Wahlpflicht war, sofern ich das richtig im Kopf habe. Dafür hatten wir sehr viel Theoretische Physik. Hier könnte man vielleicht an der einen oder anderen Stelle Abstriche in Kauf nehmen und dafür die Astronomie und Astrophysik etwas stärker im Modulhandbuch gewichten.

I L2 hat vorhin angemerkt, dass Materialien und Unterrichtsreihen zur Verfügung gestellt werden müssten. Wie genau sollten solche unterstützenden Materialien aussehen? Was wäre hilfreich und was vor allem eher unsinnig?

L2 In jedem Fall sollten die fachlichen Aspekte gut und verständlich dargestellt werden. Wir müssen uns ja auch erst mal einarbeiten. Da reicht kein oberflächliches Geplänkel. Es muss so dargestellt werden, dass man in der Lage ist, schnell einen umfassenden Blick auf die Dinge zu bekommen. Neben dieser fachlichen Instruierung sollten vielleicht auch einzelne geschichtliche Daten erwähnt werden, damit man selbst in der Lage ist, die Dinge einordnen zu können. Und dann benötigt man natürlich Hinweise zur Umsetzung im Unterricht. Zum Beispiel Aufgaben, Daten zur Auswertung, gerne auch die Lösungen.

L1 Ja genau. Wichtig sind neben den fachlichen Darstellungen auch solche, die Tipps zur Unterrichtsgestaltung geben. Allerdings möchte ich in dem Zusammenhang anmerken, dass es nicht sinnvoll ist - zumindest nach meinem Empfinden - wenn ganze Reihen

und Stunden durchgeplant werden und man im Prinzip nur Verlaufspläne erhält. Das sollte dann jedem Lehrer selbst überlassen werden. Die allzu strukturierte Darstellung in Reihen und Stunden ist vor dem Hintergrund der heterogenen Lerngruppen, der heterogenen Lehrer und den entsprechenden Anforderungen sowie der gänzlich verschiedenen Schullandschaft nicht wirklich hilfreich, sondern eher lästig. Eine allgemeine Darstellung mit aber durchaus konkreten Hilfestellungen und auch Aufgaben ist prinzipiell die wertvollste Hilfe. Wie das dann konkret im Unterricht umgesetzt wird, also was in welcher Stunde, mit welcher Methode oder wie auch immer, das sollte jedem von uns selbst überlassen werden.

L2 Ja genau, dazu sind wir von den Lehrpersönlichkeiten zu unterschiedlich.

L3 Wenn ich das anmerken darf, ich erachte Aufgaben, auch weiterführende Aufgaben, als sehr hilfreich. Gerne auch mit Lösungen.

I Das sind jetzt eine Menge Aspekte gewesen. Ich merke, dass Sie alle astronomischen Themen im Unterricht positiv gegenüber stehen, aber sich durchaus Unterstützungsmaterialien und Weiterbildungen sowie für die Zukunft auch eine stärkere Gewichtung im Studium wünschen. Die Anforderungen an die Materialien habe ich mir notiert. Diese Aspekte werde ich in meiner Arbeit aufgreifen und Teile dieser gewünschten unterstützenden Materialien entwickeln und erproben. Vielen Dank für Ihre Zeit!

L3 Wir haben zu danken und sind sehr gespannt.

L1 Vielen Dank. Wir würden uns freuen, wenn wir demnächst die eine oder andere Reihe zur Astronomie unterrichten dürfen.

ANHANG B

Anleitung und Auswertung des Analogieexperiments zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie (Modul 1)

Die nachfolgenden beiden Kapitel sollen eine Hilfestellung für den Nachbau und den unterrichtlichen Einsatz des Analogieexperiments zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie (siehe Modul 1) darstellen. Es wird zunächst auf den Aufbau und die Durchführung eingegangen, anschließend auf die automatisierte Auswertung mit `Root`.

B.1 Anleitung zur Durchführung des Experiments

Folgende Schritte sind bei der Durchführung des Experiments zu durchlaufen:

1. Befestigen Sie den Lautsprecher auf der Fahrradfelge (Durchmesser $d \geq 58$ dm) und positionieren Sie das Mikrofon in etwa 20 bis 50 cm Abstand.
2. Schließen Sie `Cassy` an und starten Sie die Software am PC. Das Mikrofon wird am Eingang A in der Regel automatisch erkannt (wenn nicht, lässt sich dies durch Anklicken des Eingangs A oder durch Wählen eines Versuchsbeispiels aus der Akustik manuell einstellen).
3. Aktivieren Sie den Lautsprecher und spielen Sie eine Tondatei zu einer festen Frequenz ab. Die Fahrradfelge wird noch nicht angedreht. Der Lautsprecher wird so positioniert, dass das Mikrofon den Ton gut empfangen kann.

- Die Einstellungen bei **Cassy** sind nun so vorzunehmen, dass auf der x -Achse die Frequenz dargestellt wird. Des Weiteren müssen die Messzeit und das Messintervall angepasst werden. Hierzu muss zunächst das Einstellungsmenü geöffnet werden. Dies geschieht über den entsprechenden Button, der in Abbildung B.1 dargestellt ist.



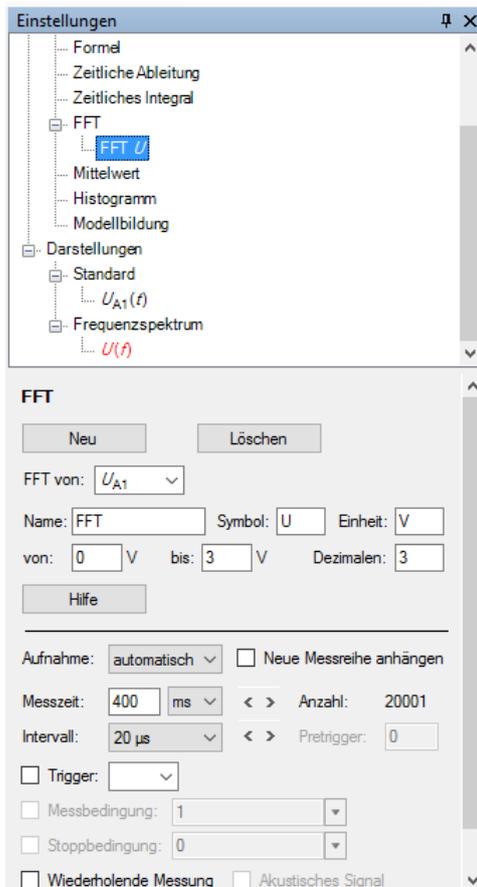
Abbildung B.1:
Cassy-Symbol
für das Einstel-
lungsmenü.

Wählen Sie nun die Messzeit und das Messintervall. Je nach Größe der Fahrradfelge und Geschwindigkeit des Andrehens muss dies durch Ausprobieren entsprechend gewählt werden. Im Einstellungsmenü ist unter der Rubrik „Rechner“ der Punkt „FFT“ auszuwählen. Es öffnen sich dann die dafür vorgesehenen Felder mit Einstellungsmöglichkeiten. Für den Start bietet es sich an, die Messzeit auf 400 ms, das Messintervall auf 20 μ s einzustellen.

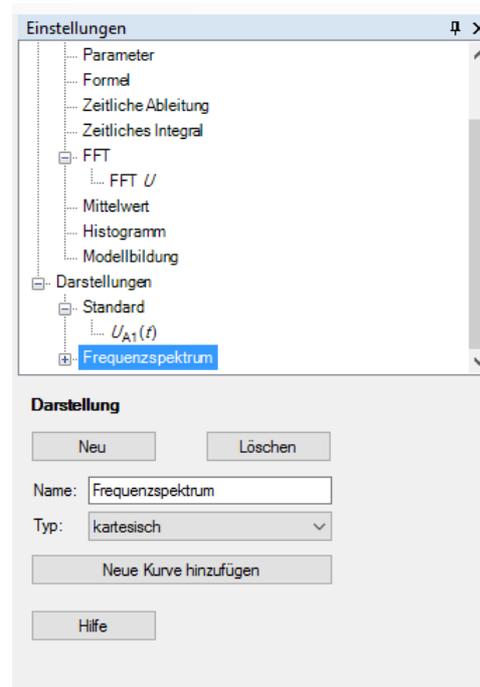
Ebenfalls kann die Einteilung der y -Achse durch Festlegen von Minimal- und Maximalwert vorgenommen werden. Der Minimalwert kann auf 0 V gesetzt werden. Der Maximalwert richtet sich nach der eingestellten Lautstärke und dem Abstand von Mikrofon und Lautsprecher. Bei eingestellter Zimmerlautstärke und einem Abstand von etwa 30 cm sind in Abbildung B.2 beispielhaft 3 V angegeben.

Sorgen Sie anschließend dafür, dass auf der x -Achse die Frequenz aufgetragen wird. Über „Darstellungen“ ist der Punkt „Frequenzspektrum“ auszuwählen, vgl. Abbildung B.2.

- Drehen Sie nun die Fahrradfelge an und starten Sie jeweils eine Messung, wenn sich der Lautsprecher auf das Mikrofon zu bewegt und direkt danach, wenn er sich von ihm weg bewegt.
- Speichern Sie die Daten ab und führen Sie entweder eine Analyse mit **Cassy** oder mit **Root** durch, vergleiche hierzu Kapitel 5.2.4.2.
- Sofern Änderungen an der Analyse-Software vorgenommen werden sollen, siehe hierzu Anhang B.2.



(a) Wählen von Messzeit und Messintervall.



(b) Darstellen des Frequenzspektrums.

Abbildung B.2: Cassy-Einstellungen zur Messung und Darstellung.

B.2 Automatisierte Auswertung mit Root

B.2.1 Bedienung der Auswertungssoftware

Die Analysesoftware `Analyse_Analogieexperiment_Dopplereffekt.cpp` soll an dieser Stelle eingefügt und kurz beschrieben werden. Die Programmierung basiert auf der Sprache C. Wie an der Dateiendung zu erkennen ist, handelt es sich hier um eine C++-Datei. Sie kann jedoch auch als `.c`-Datei abgespeichert und eingelesen werden.

Die Software liest zunächst die beiden Dateien mit Messwerten, welche von `Cassy Lab` erstellt werden, nacheinander ein. Sollte eine der Dateien beschädigt sein, so wird die Fehlermeldung „*Could not open file [...] for reading!*“ ausgegeben. Die eingeklammerte Stelle enthält dann den Dateinamen, sodass der Fehler zurückverfolgt werden kann. In den Dateien sind vier Spalten mit Messwerten einzulesen. Die Werte entsprechen der Zeit, der Frequenz, der Spannung und der Fourier-Transformierten. Beim Einlesen der ersten Datei werden sie den Variablen *time*, *frequency*, *voltage* und *FFT* zugeordnet, beim Einlesen der zweiten Datei entsprechenden Variablen mit der Zahl 2 hinter dem Variablenamen. Die Frequenzen werden anschließend mit den Wert 1000 multipliziert, um die Einheit Hertz zu erhalten. Anschließend werden Plots erzeugt, indem die Werte der Fourier-Transformierten gegen die der neu berechneten Frequenz in Hertz aufgetragen werden. Fehlerbalken werden an dieser Stelle nicht eingezeichnet, da sie für die weitere Darstellung nicht notwendig sind. Der entsprechende Befehl `g->SetPointError(point,0,0)` ist jedoch im Code enthalten, sodass die Fehlerbalken auch nachträglich ergänzt werden können. Nachdem die Beschriftungen eingefügt worden sind, werden die Fits angelegt. In diesem Fall erfolgt der Fit automatisiert über die vordefinierte GAUSS-Funktion. Der Maximalwert, der Mittelwert sowie die Standardabweichung werden automatisch erfasst. Weiteres Ziel ist dann die gemeinsame Darstellung in einem Koordinatensystem. Dazu werden die beiden Graphiken in einen `MultiGraph` gezeichnet, der durch Hinzufügen der beiden Graphen und der beiden Fits entsteht. Es folgen die Einstellungen bezüglich der Punkt- und Liniendarstellung sowie die Beschriftung der Achsen, der Titel und die Legende. Anschließend erfolgt die Ausgabe der Peakschwerpunkte, der Dopplerver-

schiebung sowie der Rotationsgeschwindigkeit in der Konsole. Diese Zeilen können auch ausgeklammert werden.

Die Fits, die hier automatisiert erstellt werden, können natürlich auch manuell erzeugt oder manuell nachbearbeitet werden. Dazu müssen die Zeilen der Fits gelöscht werden.

Ein einfacher Code für die Programmierung eines manuellen Fits lautet:

```
1     for (Int_t i=380;i<420;i++)
2     {
3         x[i] = i;
4         y[i] = 0.7179*exp(-0.5*((x[i]-398)/2)*((x[i]-398)/2));
5         fit1->SetPoint(n,x[i],y[i]);
6         n++;
7     }
8
9     for (Int_t j=380;j<420;j++)
10    {
11        v[j] = j;
12        w[j] = 1.4092*exp(-0.5*((v[j]-403)/2)*((v[j]-403)/2));
13        fit2->SetPoint(m,v[j],w[j]);
14        m++;
15    }
```

Listing B.1: Erzeugung eines manuellen Fits.

Die Einführung der Variablen und Parameter muss dann entsprechend geändert werden. Man erkennt, dass hier die Fitkurven manuell vorgegeben wurden. Dadurch erfolgt dann keine automatisierte Rechnung. Es kann jedoch nützlich sein, gerade um die Software vollumfänglich zu testen, die automatisierte Fiterzeugung durch den obigen Block zu ersetzen.

Gestartet wird das Programm an einem Linux-Rechner mit der Konsole. Man navigiert zunächst in den Ordner, in welchem die Analysesoftware abgespeichert ist und startet dann das Paket `root`, indem `root` in die Kommandozeile eingegeben wird. Die Analysesoftware wird dann durch den Befehl `.x` mit angehängtem Dateinamen gestartet. In

Klammern dahinter werden dann die beiden Textdateien mit den Messwerten angegeben sowie der `Root`-Ordner zum Abspeichern der Graphikdateien, auf welche der `TBrowser` später zugreift. Im Anschluss können der Titel des Graphen sowie die Beschriftungen der x - und y -Achse angegeben werden, sofern diese von den im Code eingetragenen Beschriftungen abweichen. Eine mögliche Variante zum Starten der Analysesoftware lautet also:

```
.x Analyse_Analogieexperiment_Dopplereffekt.cpp("Messwerte_1.txt" ,  
      "Messwerte_2.txt" , "graph.root" , " " , " " , " " )
```

Im Anschluss gibt die Konsole dann die entsprechenden Werte der beiden Peaks, der Dopplerverschiebung und der Rotationsgeschwindigkeit aus. Beendet wird die Ausgabe mit

```
bool(1) .
```

Dadurch wird verdeutlicht, dass die Software funktionsfähig gelaufen ist. Es kann nun der `TBrowser` gestartet werden mit dem Befehl `new TBrowser`. Es öffnet sich ein neues Fenster, in welchem man durch Anwählen des Ordners `graph.root` die Datei zur Auswertung der Daten öffnen kann. Dieses Fenster ist interaktiv, sodass man zoomen und nachträglich auch etwas ergänzen kann. Über `.q` verlässt man die Software `Root`.

B.2.2 Programmcode

Der Programmcode der Analysesoftware ist nachfolgend eingefügt.

```
1   #include "TFile.h"  
2   #include "TROOT.h"  
3   #include "TGraphErrors.h"  
4   #include "TCanvas.h"  
5   #include "TAxis.h"  
6   #include "Riostream.h"
```

Anhang B. Anleitung und Auswertung des Analogieexperimentes zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie (Modul 1)

```
7     #include <string>
8     #include <iostream>
9     #include <cstdlib>
10
11     using namespace std;
12
13     bool Analyse_Analogieexperiment_Dopplereffekt(TString textfile ,
14           TString textfile2 , TString root_file ,
15           TString Graph_Title="",
16           TString x_title="", TString y_title="")
17     {
18         ifstream in;
19         in.open(textfile);
20         ifstream in2;
21         in2.open(textfile2);
22         TFile *f = new TFile(root_file,"UPDATE");
23         TGraphErrors *g = new TGraphErrors();
24         TGraphErrors *g2 = new TGraphErrors();
25         TF1 *fit1 = new TF1("f1","gaus",380,420);
26         TF1 *fit2 = new TF1("f2","gaus",380,420);
27         TMultiGraph *mg = new TMultiGraph();
28
29         TCanvas *c1 = new TCanvas(Graph_Title, Graph_Title ,
30           200,10,700,500);
31         Double_t time;
32         Double_t time2;
33         Double_t frequency;
34         Double_t frequency_Hz;
35         Double_t frequency2;
36         Double_t frequency_Hz_2;
37         Double_t voltage;
38         Double_t voltage2;
39         Double_t FFT;
```

```
40         Double_t FFT2;
41         Int_t point=1;
42         Int_t point2=1;
43         Double_t mean1;
44         Double_t rms1;
45         Double_t mean2;
46         Double_t rms2;
47
48         if(!in.good())
49         {
50             if(in.is_open()) in.close();
51             std::cout << "Could not open file " << textfile <<
52                 " for reading!" << std::endl;
53             return false;
54         }
55
56         if(!in2.good())
57         {
58             if(in2.is_open()) in2.close();
59             std::cout << "Could not open file " << textfile2
60                 << " for reading!" << std::endl;
61             return false;
62         }
63
64         while(in.good())
65         {
66             in >> time;
67             in >> frequency;
68             in >> voltage;
69             in >> FFT;
70             frequency_Hz = frequency*1000;
71             //std::cout << "Frequenz: " << frequency_Hz <<
72                 " Spannung: " << FFT << std::endl;
```

```
73         g->SetPoint(point , frequency_Hz , FFT);
74         g->SetPointError(point , 0, 0);
75         point++;
76     }
77     in.close();
78
79     g->SetTitle("Bestimmung der Dopplerverschiebung
80                bei f=400 Hz – Teil 1");
81     g->SetMarkerStyle(7);
82     g->SetMarkerSize(3);
83     g->GetXaxis()->SetTitle("Frequenz (Hz)");
84     g->GetYaxis()->SetTitle("Spannung (V)");
85
86     while(in2.good())
87     {
88         in2 >> time2;
89         in2 >> frequency2;
90         in2 >> voltage2;
91         in2 >> FFT2;
92         frequency_Hz_2 = frequency2*1000;
93         //std::cout << "Frequenz 2: " << frequency_Hz_2
94             << " Spannung 2: " << FFT2 << std::endl;
95         g2->SetPoint(point2 , frequency_Hz_2 , FFT2);
96         g2->SetPointError(point2 , 0, 0);
97         point2++;
98     }
99     in2.close();
100
101     g2->SetTitle("Bestimmung der Dopplerverschiebung
102                bei f=400 Hz – Teil 2");
103     g2->SetMarkerStyle(7);
104     g2->SetMarkerSize(3);
105     g2->GetXaxis()->SetTitle("Frequenz (Hz)");
```

```
106         g2->GetYaxis()->SetTitle("Spannung (V)");
107
108         fit1->SetParameters(h1.GetMaximum(), h1.GetMean(),
109             h1.GetRMS() );
110         h1.Fit("fit1");
111         fit2->SetParameters(h2.GetMaximum(), h2.GetMean(),
112             h2.GetRMS() );
113         h2.Fit("fit2");
114
115         fit1->SetTitle("Fit Peak 1");
116         fit1->SetMarkerStyle(7);
117         fit1->SetMarkerSize(3);
118         fit1->GetXaxis()->SetTitle("Frequenz (Hz)");
119         fit1->GetYaxis()->SetTitle("Spannung (V)");
120
121         fit2->SetTitle("Fit Peak 2");
122         fit2->SetMarkerStyle(7);
123         fit2->SetMarkerSize(3);
124         fit2->GetXaxis()->SetTitle("Frequenz (Hz)");
125         fit2->GetYaxis()->SetTitle("Spannung (V)");
126
127         c1->cd();
128         g->Draw("AP");
129         g2->Draw("AP");
130         fit1->SetLineColor(2);
131         fit1->SetLineWidth(4);
132         fit2->SetLineColor(4);
133         fit2->SetLineWidth(4);
134         fit1->Draw("APL");
135         fit2->Draw("APL");
136
137         mg->SetTitle("Bestimmung der Dopplerverschiebung
138             bei f=400 Hz");
```

Anhang B. Anleitung und Auswertung des Analogieexperiments zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie (Modul 1)

```
139         mg->Add(g);
140         mg->Add(g2);
141         mg->Add(fit1);
142         mg->Add(fit2);
143     mg->Draw("APL");
144         mg->GetXaxis()->SetTitle("Frequenz (Hz)");
145         mg->GetYaxis()->SetTitle("Spannung (V)");
146
147         leg = new TLegend(0.1,0.3,0.2,0.5);
148     leg->SetHeader("Bestimmung der Dopplerverschiebung
149         als Differenz der Peakschwerpunkte");
150     leg->AddEntry(g,"Gemessene Intensit#ddot{a}t in
151         Abh#ddot{a}ngigkeit von der Frequenz","lep");
152     leg->AddEntry(fit1,"Gauss-Fit an Peak 1","lep");
153         leg->AddEntry(fit2,"Gauss-Fit an Peak 2","lep");
154     leg->Draw();
155
156         f->cd();
157         g->Write("Graph");
158         g2->Write("Graph");
159         fit1->Write("Graph");
160         fit2->Write("Graph");
161         c1->Write();
162         f->Close();
163
164         fit1->GetParameter("Mean" *mean1);
165         fit1->GetParameter("RMS" *rms1);
166         fit2->GetParameter("Mean" *mean2);
167         fit2->GetParameter("RMS" *rms2);
168         std::cout << "Peak 1: " << mean1 << " +- " << rms1
169             << " Hz" << std::endl;
170         std::cout << "Peak 1: " << mean2 << " +- " << rms2
171             << " Hz" << std::endl;
```

Anhang B. Anleitung und Auswertung des Analogieexperiments zur Messung der Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie (Modul 1)

```
172         std::cout << "Dopplerverschiebung: " << mean1-mean2
173             << "+-" << sqrt(rms1^2 +rms^2) << " Hz"
174             << std::endl;
175         std::cout << "Rotationsgeschwindigkeit: " <<
176             (mean1-mean2)*343/800 << " + " <<
177             (mean1-mean2)*343/800 * sqrt(((3/343)^2+
178                 (2/400)^2)+(sqrt(rms1^2 +rms^2)/
179                 (mean1-mean2))^2) << " m/s"
180             << std::endl;
181
182         delete f;
183         delete g;
184         delete g2;
185         delete fit1;
186         delete fit2;
187         delete c1;
188
189         return true;
190     }
191
192     int main()
193     {
194         Analyse_Analogieexperiment_Dopplereffekt;
195     }
```

Listing B.2: Analysesoftware `Analyse_Analogieexperiment_ Dopplereffekt.cpp`.

ANHANG C

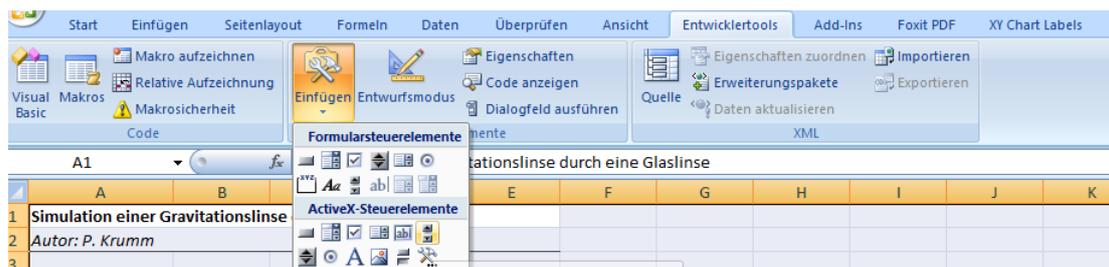
Computer-Simulationen

Im Rahmen dieser Arbeit sind zwei Excel-Simulationen erstellt worden, auf die nachfolgend näher eingegangen wird. Sofern Änderungen an den Simulationen vorgenommen werden sollen, müssen vom Nutzer zunächst die Entwicklertools aktiviert werden. Dies geht durch das entsprechende Setzen des Häkchens unter den Excel-Optionen, siehe Abbildung C.1 (a). Infolgedessen wird eine zusätzliche Registerkarte im Menü erstellt, über welche die hier verwendeten Bildlaufleisten aktiviert und eingestellt werden können, siehe Abbildung C.1 (b).

Die am häufigsten verwendeten Optionen bei der Arbeit mit Excel

- Minisymbolleiste für die Auswahl anzeigen ⓘ
- Livevorschau aktivieren ⓘ
- Entwicklerregisterkarte in der Multifunktionsleiste anzeigen ⓘ

(a) Aktivieren der Entwicklertools: Das dritte Häkchen ist zu setzen.



(b) Erstellen einer Bildlaufleiste unter dem Menüpunkt Entwicklertools.

Abbildung C.1: Excel-Einstellungen zur Anpassung der Simulationen.

Sobald eine solche Bildlaufleiste erstellt ist, kann sie durch Rechtsklick formatiert werden. Bei bereits bestehenden Bildlaufleisten muss vorher der Entwurfsmodus aktiviert werden. Das Fenster, in welchem die Formatierungsoptionen dargestellt sind, ist in Abbildung C.2 zu sehen. Über die Zelle, in welcher der entsprechend eingestellte Wert abgespeichert werden soll, bis hin zu den Darstellungsvarianten lassen sich hier verschiedene Optionen anwählen. Wichtig ist gerade für Nutzerinnen und Nutzer, die Änderungen an den hier vorgestellten Simulationen vornehmen möchten, dass der Zellbezug bestehen bleibt. Im Beispiel rechts ist etwa die verknüpfte Zelle, in welcher dann der eingestellte Zahlenwert erscheint, N11, siehe Rubrik `LinkedCell`. Über die Einstellungen im Bildlauf (`Delay`, `LargeChange`, `Max`, `Min`, `SmallChange`), können die Abstände, die Maximal- und Minimalwerte eingestellt werden.

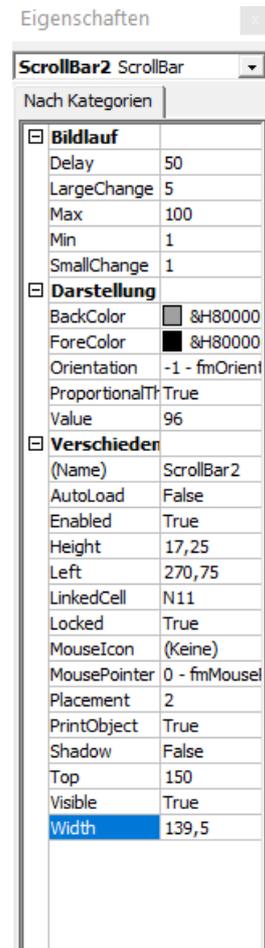


Abbildung C.2: Excel-Einstellungen zur Anpassung der Bildlaufleiste.

C.1 Simulation zum Aussehen einer als Gravitationslinse wirkenden Glaslinse (Modul 1)

Für die Simulation zum Aussehen einer als Gravitationslinse wirkenden Glaslinse gelten folgende Bedienhinweise:

1. Öffnen Sie die Datei `Simulation_Gravitationslinse.xlsx`
2. Über die einprogrammierten Schieberegler wählen Sie jetzt die Werte für ξ_0 , i (und

damit ξ_1) sowie $\psi(\xi_0)$ und x .

3. Die Tabelle mit den Werten für ξ und $\psi(\xi)$ wird automatisch erstellt und ebenso ein Koordinatensystem mit dem entsprechenden Graphen.
4. Ändern Sie nun die vier Parameter und schauen Sie sich live die Veränderung im Graphen an.

C.2 Simulation zur Abschätzung des Anteils Dunkler Materie an der Gesamtmaterie des Universums (Modul 2)

Für die Simulation zur Abschätzung des Anteils Dunkler Materie an der Gesamtmaterie des Universums gelten folgende Bedienhinweise:

1. Öffnen Sie die Datei `Simulation_Anteil_Dunkle_Materie.xlsx`
2. Über die einprogrammierten Schieberegler wählen Sie jetzt die Werte für den HUBBLE-Parameter H_0 , die Gesamtmateriedichte Ω_M , die relative Baryondichte $\Omega_B h^2$, die Neutrindichte Ω_ν sowie die Dichte der sichtbaren Materie Ω_{vis} .
3. Die Werte für die einzelnen Anteile werden darunter als numerische Zahlenwerte aufgeführt sowie in Kreisdiagrammen dargestellt.
4. Ändern Sie nun die vier Parameter und schauen Sie sich live die Veränderung in den Diagrammen an.

Test-Fragen und Aufgaben zur Auswertung der Module nach erfolgter Erprobung im Schulunterricht

Im Folgenden sind die Aufgaben und Fragen aufgeführt, mit deren Bearbeitung die Erprobung der drei Module ausgewertet worden ist.

D.1 Modul 1

Zunächst wurden die nachfolgend aufgelisteten Aufgaben gestellt, um den ersten Teil der Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik zur Messung von Rotationskurven unterrichtlich zu evaluieren. Dabei ist bei der Formulierung der Aufgaben darauf geachtet worden, diese möglichst klar und detailliert zu stellen, damit bei der nur geringen Stichprobengröße von 41 Schülerinnen und Schülern keine Missverständnisse bezüglich der Aufgabenstellung entstehen. Die eigentliche Aufgabenstellung ist fett gedruckt. Es sind die für den Schulunterricht typischen Operatoren verwendet worden. In einem zweiten kursiv gedruckten Satz erfolgt eine Spezifikation der Aufgabenstellung, damit die Schülerantworten konkret den entsprechend zugeordneten Anforderungsbereich abdecken.

1. Erläutern Sie das Prinzip der Messung von Rotationskurven in der Astronomie.

Gehen Sie hierbei detailliert auf die zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge und die sich daraus ergebende Messung ein. Achten Sie auf die Verwendung von

Fachsprache.

2. Im Unterricht haben wir zur Messung einer Rotationskurve ein Analogieexperiment durchgeführt.

Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen der astronomischen Messung und dem Analogieexperiment.

Gehen Sie insbesondere darauf ein, inwiefern das Analogieexperiment geeignet oder nicht geeignet ist, um das astronomische Messprinzip abzubilden.

3. **Begründen Sie, warum anhand einer gemessenen Rotationskurve zu einer Galaxie auf die Existenz Dunkler Materie geschlossen wird.**

Vergleichen Sie hierzu die erwartete Kurve mit der tatsächlich gemessenen Kurve und geben Sie die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen an.

Im zweiten Teil des ersten Moduls wurden die Beobachtungen und Befunde aus der Gravitationsphysik um den Gravitationslinseneffekt ergänzt. Hierzu wurden fünf Aufgaben gestellt, wobei die ersten drei analog zu den oben genannten sind und in den letzten beiden mathematische Herleitungen gefragt werden.

1. **Erläutern Sie das Prinzip der Lichtablenkung durch ein Gravitationsfeld.**

Gehen Sie hierbei zunächst auf das grundlegende physikalische Phänomen ein (eine klassische Antwort reicht aus) und nennen Sie dann weitergehend mögliche unterschiedliche Beobachtungen inklusive der entsprechenden Spezifikationen, die Sie im Unterricht kennen gelernt haben.

2. Im Unterricht haben Sie sowohl ein Analogieexperiment zu den Verzerrungseffekten als auch eine Simulation mit einer Glaslinse am PC durchgeführt und experimentell untersucht.

Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen diesen im Unterricht durchgeführten Experimenten und den entsprechenden astronomischen Effekten.

Gehen Sie hierbei insbesondere auf die Frage ein, inwieweit der astronomische Gravitationslinseneffekt mit den kennen gelernten Experimenten simuliert werden kann.

3. **Begründen Sie, warum anhand der Beobachtungen zum Gravitationslinseneffekt auf die Existenz Dunkler Materie geschlossen werden kann.**

4. **Leiten Sie eine Formel für den im Unterricht kennen gelernten Ablenkungswinkel δ her.**

Führen Sie hierbei die einzelnen Herleitungsschritte explizit aus und erläutern Sie diese.

5. **Leiten Sie eine Formel für den Radius eines Einstein-Rings her.**

Führen Sie hierbei die einzelnen Herleitungsschritte explizit aus und erläutern Sie diese.

Des Weiteren sind die Schülerinnen und Schüler nach ihrer persönlichen Einschätzung gefragt worden. Auf einem vorbereiteten Fragebogen konnten die Lernenden auf einer vierstufigen LIKERT-Skala Stellung zu den folgenden Aussagen beziehen.

1. Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ habe ich verstanden.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

2. Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ war für mich interessant.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

3. Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Gravitationsphysik“ hat bei mir zu neuen Erkenntnissen geführt.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

4. Die Wahl der Experimente und Simulationen war angemessen und für mich ersichtlich.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

5. Die Wahl der Aufgaben und Rechnungen war angemessen und für mich ersichtlich.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu
6. Ich möchte mehr zum Thema „Dunkle Materie“ erfahren.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

D.2 Modul 2

Auch für Modul 2 sind für den ersten und zweiten Teil jeweils getrennt Aufgaben formuliert worden, mit welchen das Fachwissen der Schülerinnen und Schüler abgefragt werden sollte. Die eigentliche Aufgabenstellung ist fett gedruckt, die Konkretisierung kursiv. Auch hier ist bei der Formulierung auf die Verwendung von Operatoren geachtet worden. Für den ersten Teil, also die Erkenntnisse zur Dunklen Materie anhand der Entwicklungen im frühen Universum, sind die folgenden Aufgaben gestellt worden.

- 1. Geben Sie die wesentlichen Prozesse zur Kernentstehung während der Nukleosynthese an und erläutern Sie die sich daraus ergebenden Erkenntnisse zur Elementhäufigkeit.**
Gehen Sie hierbei detailliert auf das Proton-Neutron-Verhältnis ein. Achten Sie auf eine klare Darstellung der Zusammenhänge.
- 2. Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen den Erkenntnissen zur Elementhäufigkeit und den sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen zum Massenanteil der Dunklen Materie im Universum.**
Nehmen Sie hierbei vor allem den Vergleich von theoretischen und beobachteten Daten in den Blick und stellen Sie dar, welche Auswirkungen dies auf die Bestimmung der kosmologischen Parameter hat.
- 3. Geben Sie begründet einen ungefähren Zahlenwert für den Massenanteil der Dunklen Materie im Universum an.**

Denken Sie hier an die von Ihnen durchgeführte Simulation zurück und stellen Sie Ihre Erkenntnisse zum Massenanteil der Dunklen Materie dar.

Für den zweiten Teil, also die Erkenntnisse zur Dunklen Materie aus der Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung, sind die folgenden Aufgaben gestellt worden.

1. **Erklären Sie das Zustandekommen der kosmischen Hintergrundstrahlung und erläutern Sie, inwieweit die Messung dieser Strahlung Informationen zur Entwicklung des frühen Universums liefert.**

Gehen Sie hierbei auf die Phase der Entkopplung von Strahlung und Materie im frühen Universum ein und begründen Sie, warum sich die Strahlung seither ungehindert im Raum ausbreitet.

2. **Gehen Sie näher auf die Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung ein und benennen Sie wesentliche Punkte.**

Geben Sie den Wellenlängenbereich an, in dem die Strahlung besonders intensiv ist und erläutern Sie, was man unter den Anisotropien in der Temperaturverteilung versteht.

3. **Erläutern Sie, welcher Zusammenhang zwischen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der Dunklen Materie besteht.**

Vergleichen Sie das tatsächliche Ergebnis der Analyse der Temperaturfluktuationen mit den theoretisch erwarteten Ergebnissen nach der SILK-Dämpfung und geben Sie an, was dies für die Materiedichte im frühen Universum bedeutet.

Zum Abschluss sind die Schülerinnen und Schüler auch nach diesem Modul nach ihrer persönlichen Einschätzung gefragt worden. Die Fragen sind hierbei analog zu denen von Modul 1. Auf einem vorbereiteten Fragebogen konnten die Lernenden auf einer vierstufigen Skala Stellung zu den folgenden Aussagen beziehen.

1. Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Kosmologie“ habe ich verstanden.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

2. Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Kosmologie“ war für mich interessant.
-
- stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu
3. Das Thema „Beobachtungen und Befunde zur Dunklen Materie aus der Kosmologie“ hat zu neuen Erkenntnissen geführt.
-
- stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu
4. Die Wahl der Experimente und Simulationen war angemessen und für mich verständlich.
-
- stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu
5. Die Wahl der Aufgaben und Rechnungen war angemessen und für mich ersichtlich.
-
- stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu
6. Ich möchte mehr zum Thema „Dunkle Materie“ erfahren.
-
- stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

D.3 Modul 3

Modul 3 gliedert sich in zwei Teile, nämlich die Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit Dunkler Materie sowie die Kritik an ihr und damit einhergehend alternative Erklärungsansätze. Beide Teile sind aus organisatorischer Sicht gemeinsam erprobt worden. Wie gehabt, ist die Aufgabenstellung fett gedruckt, die Konkretisierung kursiv. Es wurden die nachfolgend aufgelisteten Fragen gestellt.

1. Ein häufig genannter Kandidat für ein Teilchen, welches die Dunkle Materie erklären soll, ist das Neutrino.
- Begründen Sie, warum die bislang bekannten Neutrinos die Dunkle Materie nicht erklären können.**

Gehen Sie hierbei auf die Erkenntnisse des durchgeführten Anschauungsexperiments ein.

2. Neutrinos können, wenn überhaupt, auch nur einen Teil der dunklen Materie ausmachen.

Erläutern Sie die grundlegenden Hypothesen zur Struktur und Beschaffenheit der Dunklen Materie.

Denken Sie zurück an das Strukturdiagramm und gehen Sie auf möglichst alle Ihnen vorgestellten Kandidaten für die Dunkle Materie ein.

3. Ein wesentliches Indiz für die Existenz Dunkler Materie waren die bereits behandelten Rotationskurven von Galaxien.

Führen Sie aus, welche andere Möglichkeit es gibt, den Verlauf der Rotationskurven zu begründen und beurteilen Sie, ob damit auch die Ihnen sonst noch bekannten Befunde erklärt werden können.

Auch nach diesem Modul sind die Schülerinnen und Schüler nach ihrer persönlichen Einschätzung gefragt worden. Die Fragen ähneln zum Teil denen aus den ersten beiden Modulen, sind aber auch ergänzt worden, um eine umfassende Einschätzung durch die Lernenden zu bekommen.

1. Das Thema „Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie“ habe ich verstanden.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

2. Das Thema „Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie“ war für mich interessant.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

3. Das Thema „Offene Fragen und kritischer Ausblick zur Thematik der Dunklen Materie“ hat zu neuen Erkenntnissen geführt.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

4. Ich habe insgesamt durch die vermittelten Unterrichtsinhalte neues Wissen zum Thema „Dunkle Materie“ erlangt.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

5. Die Unterrichtsinhalte zur Dunklen Materie haben mich insgesamt interessiert.

stimme voll zu stimme teilweise zu stimme eher nicht zu stimme nicht zu

Danksagung

Ich möchte mich abschließend bei allen Personen bedanken, die mich beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt haben.

Der erste Dank gilt Herrn Professor Dr. Oliver Schwarz, der mir diese Promotion ermöglicht hat, die Arbeit betreut hat und immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Für die vielen ausführlichen Gespräche und Ratschläge danke ich Ihnen sehr herzlich!

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Karl-Heinz Lotze bedanken, der die Arbeit als Zweitgutachter eingehend gelesen hat und dessen Ratschläge mir eine wertvolle Hilfe beim Fertigstellen der Arbeit waren.

Der nächste Dank gilt den beiden Schulen, an denen ich parallel zu dieser Arbeit mit voller Stelle beschäftigt war sowie der gesamten Arbeitsgruppe der Physikdidaktik.

Neben der Unterstützung seitens der Universität und der Schulen, ist es mir an dieser Stelle auch wichtig, die Personen zu benennen, die mich im privaten Umfeld unterstützt und motiviert haben.

Der wohl größte Dank gebührt meinen Eltern Johannes und Bettina, die mich immer in jeglicher Hinsicht unterstützt haben. Ohne euch wären Schulzeit, Studium, Referendariat und auch die Promotion nicht so erfolgreich möglich gewesen. Ich spare mir das Aufzählen aller Einzelheiten und sage einfach nur: Vielen vielen Dank! Diese Arbeit ist euch gewidmet!

Zu guter Letzt möchte ich mich bei der Person bedanken, die seit vielen Jahren an meiner Seite ist und ohne die ich sicher nicht immer die Motivation aufgebracht hätte, neben den Tätigkeiten an der Schule, auch noch an der Promotion weiter zu arbeiten. Danke, Sarah!

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass mir die geltende Promotionsordnung vom 6. August 2020 bekannt ist und von mir anerkannt wird.

Ich erkläre, dass ich weder früher noch gleichzeitig ein Promotionsverfahren bei einer anderen Hochschule oder bei einer anderen Fakultät beantragt habe.

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer, nicht angegebener Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Es wurden keine Dienste eines Promotionsvermittlungsinstituts oder einer ähnlichen Organisation in Anspruch genommen.

Siegen, den 01.06.2021

(Philipp Krumm)