

Astronomie für Blinde und Sehbehinderte

Legitimation – Konzepte – Modelle – Materialien

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Pädagogik

vorgelegt von
Simon Friedrich Kraus

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen

Siegen 2015

Gutachter der Dissertation: Prof. Dr. Manfred Bodemann
PD Dr. Olaf Fischer
Prof. Dr. Oliver Schwarz
Tag der mündlichen Prüfung: 22.10.2015

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit soll der Frage nach den Möglichkeiten eines Astronomieunterrichts für Blinde und Sehbehinderte nachgegangen werden. Es wird zunächst gezeigt, dass astronomischen Inhalten aus Sicht der Gesellschaft eine immense Bedeutung zukommt und sie große Potentiale für die Schule bieten. Daher sollten auch für Blinde und Sehbehinderte entsprechende Angebote entwickelt werden.

Die Identifikation besonders bedeutsamer Inhalte geschieht mit Hilfe einer Lehrplananalyse. Unter Verwendung der Methode der strukturierten Inhaltsanalyse wird hierbei die Schnittmenge von sieben Lehrplänen ermittelt. Diese Auswahl bildet die Grundlage für die Entwicklung entsprechender Modelle.

Um über den Tastsinn hinaus weitere Sinne anzusprechen, werden die speziellen Eigenschaften verschiedener Wahrnehmungskanäle zusammengestellt. Damit werden ihre jeweiligen Möglichkeiten und Grenzen ausgelotet. Die Informationsvermittlung über verschiedene Sinne soll einerseits zu einer leichteren Assoziation von Phänomenen und Modellen beitragen und andererseits die Behaltensleistung fördern.

Die gewonnenen Ergebnisse der Lehrplananalyse sowie die Eigenarten der menschlichen Sinne werden – unter Einbeziehung von Erkenntnissen der allgemeinen Didaktik, der Fachdidaktik sowie der Blinden- und Sehbehindertendidaktik – in der Entwicklung astronomischer Modelle zusammengeführt. Dabei werden beispielhaft verschiedene Konzepte zur Nutzung unterschiedlicher Sinne wie des Tastsinns, des Wärmeempfindens und des Gehörs verwirklicht. Die Modelle werden eingebettet in Begleitmaterial in Form von Texten und tastbaren Grafiken.

Abstract

This dissertation will discuss the question of the opportunities to make astronomical education accessible for blind and visually impaired people. It will be shown that astronomical contents are of enormous significance for the society. They hold great potentials for educational purposes too. Therefore there should be corresponding offers for blind and visually impaired people.

The identification of particularly significant contents will be done by analysing the curriculum. The intersection of 7 curricula will be determined. The obtained sample of contents forms the foundation for the development of astronomical models.

Specific properties of different senses will be composed to find ways of impartation reaching beyond the tactile sense. The use of different senses should improve the connotation of phenomena and models.

With regard to teaching methodology and didactics for blind and visually impaired, the obtained results will be united by the development of astronomical models. It will be exemplarily shown, how to make use of the tactile and aural sense and even the sensation of heat. All models are accompanied by further material in the form of explanations and tactile graphics.

Meinen Eltern.

Vorwort

An erster Stelle möchte ich all jenen Personen meinen Dank aussprechen, ohne deren Betreuung, Unterstützung und Begleitung diese Arbeit wohl kaum entstanden wäre.

Herrn Prof. Dr. Oliver Schwarz gilt mein besonderer Dank für die Betreuung der Arbeit und die vielfältigen Ratschläge. Auch allen weiteren Mitarbeitern der Arbeitsgruppe für Didaktik der Physik, Dr. Henrik Bernshausen, Prof. Dr. Manfred Bodemann, Christian Deitersen, Dr. Volker Heck, Dr. Eduard Krause, Ina Militschenko, Sabine Schirm-Springob, Cornelia Schulte, Christoph Springob, Tran Ngoc Chat, Adrian Weber und Prof. Dr. Wolfram Winnenburg sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Frau Gülseren Çelik danke ich für das sorgsame Korrekturlesen.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modelle entstanden mit finanzieller Unterstützung der Rolf Bork-Stiftung.

Im Rahmen dieser Arbeit kommt es gelegentlich zu einer Mehrfachverwendung verschiedener Größen und Symbole. Innerhalb des jeweiligen Textumfeldes (i.d.R. innerhalb eines Kapitels) ist jedoch durchgängig für eine eindeutige Zuordnung Sorge getragen worden.¹

Wird an einigen Stellen dieser Arbeit zur besseren Lesbarkeit nur die männliche Form verwendet, so ist die weiblich Form selbstverständlich mit eingeschlossen.

Wilnsdorf, im April 2015

Simon F. Kraus

¹Es wurden Gleichungen aus den Bereichen Astronomie, Astrophysik und Physiologie herangezogen. Dabei werden die im jeweiligen Forschungsbereich gebräuchlichen Formelzeichen verwendet, um einen einfachen Rückgriff auf die entsprechende Disziplin nicht zu behindern.

Inhaltsverzeichnis

Größen und Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Legitimation	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Originäre Forschungsfragen und eigenständige Beiträge	4
1.4 Aufbau der Arbeit	6
1.5 Überblick über den Forschungsstand	7
1.5.1 Literaturübersicht	7
1.5.2 Existierende Modelle und Medien	13
2 Bedeutung der Astronomie für Schule und Gesellschaft	15
2.1 Allgemeinbildende Funktionen der Astronomie	15
2.1.1 Generierung eines Weltbildes	16
2.1.2 Rolle der Astronomie als Lebensgrundlage der Menschheit	18
2.1.3 Fehlvorstellungen im Bereich der Astronomie	18
2.2 Einbindung astronomischer Inhalte in den Schulunterricht	22
2.2.1 Fächerübergreifende Zugänge	23
2.2.2 Interesse und Motivation	24
3 Auswahl astronomischer Themen	28
3.1 Themenfelder der astronomischen Bildung	28
3.1.1 Instrumente, Methoden und Beobachtungen	28
3.1.2 Bewegungen und Jahreszeiten	29
3.1.3 Bestandteile, Objekte und Modelle	29
3.1.4 Strukturen und Anordnungen	30
3.1.5 Entwicklung	30
3.2 Lehrplananalyse	32
3.2.1 Untersuchte Lehrpläne	32
3.2.2 Methodik	32
3.2.3 Schnittmenge der Lehrpläne	41
3.2.4 Astronomie als Bestandteil anderer Schulfächer	44

4	Vermittlungszugänge für Blinde und Sehbehinderte	47
4.1	Formen physischer Wahrnehmung	47
4.1.1	Wahrnehmungsphysiologische Grundlagen	47
4.1.2	Tastsinn	54
4.1.3	Gehör	55
4.1.4	Wärmeempfinden	57
4.2	Methodenauswahl zur Vermittlung astronomischer Inhalte	59
5	Vorbetrachtungen zur Modellentwicklung	61
5.1	Brailleschrift	61
5.2	Gestaltung tastbarer Abbildungen	65
5.3	Auswahl der Inhalte	68
5.4	Grundlegende Anforderungen an Modelle	69
5.4.1	Zur Bedeutung von Modellen im Unterricht	69
5.4.2	Vertiefung des Modellbegriffs und der Modellklassifikation	71
5.4.3	Eigenschaften von Modellen	72
5.4.4	Anwendung auf die Modellentwicklung	74
5.4.5	Modelle aus schulpraktischer Perspektive	75
6	Entwicklung astronomischer Modelle für Blinde und Sehbehinderte	77
6.1	Modell I: Tastbare Hauptreihensterne	77
6.1.1	Zielsetzung	77
6.1.2	Fachlicher Hintergrund	78
6.1.3	Lernziele	85
6.1.4	Umsetzung	86
6.1.5	Begleitmaterial	91
6.2	Modell II: Räumliches Sternbild	94
6.2.1	Zielsetzung	94
6.2.2	Fachlicher Hintergrund	94
6.2.3	Lernziele	99
6.2.4	Umsetzung	100
6.2.5	Begleitmaterial	105
6.3	Modell III: Sonnenflecken	109
6.3.1	Zielsetzung	109
6.3.2	Fachlicher Hintergrund	109
6.3.3	Lernziele	115
6.3.4	Umsetzung	116
6.3.5	Begleitmaterial	123
6.4	Messgerät: Elektronisch-akustischer Positionswinkelmesser	127
6.4.1	Zielsetzung	127
6.4.2	Fachlicher Hintergrund	127
6.4.3	Lernziele	130
6.4.4	Umsetzung	131

Inhaltsverzeichnis

6.4.5	Begleitmaterial	139
6.5	Tiefziehmaschine zur Herstellung tastbarer Darstellungen	143
6.6	Ausgeschlossene Methoden und Modelle	151
7	Erprobung	153
7.1	Ersterprobung	154
7.1.1	Methodik und Voraussetzungen	154
7.1.2	Ergebnisse	155
7.2	Zweiterprobung	159
7.2.1	Methodik	159
7.2.2	Voraussetzungen	161
7.2.3	Ergebnisse	162
7.2.4	Auswertungsraster	181
7.3	Zusammenfassung	184
7.3.1	Tastbares Sternbild	184
7.3.2	Hauptreihensterne	184
7.3.3	Sonnenflecken	185
7.3.4	Winkelmesser	186
7.3.5	Allgemeines	186
8	Resultate und Ausblick	188
8.1	Ergebnisse und Thesen	188
8.2	Ausblick und offene Fragen	194
	Literaturverzeichnis	196
	Abbildungsverzeichnis	207
	Tabellenverzeichnis	210
A	Fundstellennachweise zur strukturierten Inhaltsanalyse	A 1
A.1	Fundstellennachweise des ersten Materialdurchlaufs	A 1
A.2	Fundstellennachweise zur lehrplaninternen Komprimierung	A 31
A.3	Fundstellennachweise zur lehrplanübergreifenden Zusammenführung	A 62
B	Begleitmaterial	B 1
B.1	Schülertext zum Modell I: Hauptreihensterne	B 1
B.2	Schülertext zum Modell II: Räumliches Sternbild	B 3
B.3	Schülertext zum Modell III: Sonnenflecken	B 5
B.4	Schülertext zum Winkelmesser	B 7

Größen und Abkürzungen

δ	Schiefe der Ekliptik ($23,5^\circ$)	M_{bol}	bolometrische Helligkeit eines Sterns
φ	geografische Breite	n	Stevens-Konstante
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	Δm	Differenz der scheinbaren Helligkeiten zweier Sterne
a	Richtung eines Objektes von Süden über Westen gemessen in Grad	r	Entfernung (eines Sterns)
b	Skalierungsfaktor der stevensschen Potenzfunktion	r_\odot	Sonnenradius
c	Fechner-Konstante	R	physischer Reiz (Kapitel 4) Sternradius (Kapitel 6.1 und 6.2) Sonnenfleckenrelativzahl (Kapitel 6.3)
g	Anzahl der Gruppen von Sonnenflecken	R_0	Ausgangsreiz im Weber-Fechner-Gesetz
h	Höhe eines Objektes über dem Horizont in Grad	ΔR	Änderung des physischen Reizes
h_K	Kulminationshöhe der Sonne oder eines Sterns	S	Reizstärke
E	Empfindungsstärke	T	Oberflächentemperatur eines Sterns
f	Anzahl der einzelnen Sonnenflecken		
I	Schallintensität	AE	Astronomische Einheit (149,6 Mio. km)
k	Weber-Konstante (Kapitel 4) Korrekturfaktor zur Anpassung der Sonnenfleckenrelativzahl an das Züricher System (Kapitel 6)	Cas	Kürzel für das Sternbild Kassiopeia
L	Schalldruckpegel (Kapitel 4) Leuchtkraft (eines Sterns) (Kapitel 6)	f-Fleck	nachfolgender Sonnenfleck (in Rotationsrichtung)
L_\odot	Sonnenleuchtkraft in W/s (Kapitel 6)	HRD	Hertzprung-Russell-Diagramm
m	scheinbare Helligkeit	IAU	Internationale Astronomische Union
M	absolute Helligkeit	p-Fleck	vorauselender Sonnenfleck (in Rotationsrichtung)
		pc	parsec (Parallaxensekunde)

1 Einleitung

Die Entwicklung der Menschheit ist schon immer eng mit den Fortschritten der Astronomie verbunden. Die Vielfalt der Himmelserscheinungen begleitet den einzelnen Menschen während seines gesamten Lebens. Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass sich aus den systematischen Beobachtungen des Himmels die Astronomie überhaupt als erste Naturwissenschaft entwickelte. Astronomische Phänomene haben ihre Bedeutung bis in die heutige Zeit nicht verloren. Elementare Erscheinungen wie der Tag-Nacht-Wechsel und der Ablauf der Jahreszeiten prägen selbstverständlich unser Leben. Der Strahlungsfluss der Sonne bedingt das Leben auf der Erde und die solare Aktivität spiegelt sich in prachtvollen Naturscheinungen wie den Polarlichtern ebenso wider, wie in ihrem Einfluss auf die moderne Technologie, etwa Funkübertragungen und Satelliten. Im Laufe der Zeit entwickelte sich die klassische Astronomie durch das Zusammenwirken mit der Physik hin zur Astrophysik.

Die Allgegenwärtigkeit astronomischer und die immense Bedeutung astrophysikalischer Phänomene macht eine Behandlung dieser Themen im Schulunterricht unumgänglich. Dabei soll ihre Thematisierung auch dort nicht halt machen, wo Menschen von der wesentlichen Erkenntnismethode der Astronomie – der Beobachtung – ausgeschlossen bleiben. Hierzu zählen blinde und sehbehinderte Schülerinnen und Schüler. An dieser Stelle sei ein Zitat Adolph Diesterwegs (1790 - 1866) erwähnt, welches eben jenes Anliegen der vorliegenden Arbeit wiedergibt:

„Die Astronomie ist eine herrlich erhabene, weil erhebende Wissenschaft. Deshalb sollte sie keinem, auch nicht einem vorenthalten werden.“

In diesem Sinne werden in dieser Arbeit Ansätze entwickelt, um die Himmelskunde – klassische Astronomie wie auch die moderne Astrophysik – an Blinde und Sehbehinderte zu vermitteln.

Die folgenden Abschnitte geben dabei zunächst einen kurzen Überblick über die Legitimation der Arbeit, bevor die Zielsetzung präzisiert wird. Das Kapitel 1.3 stellt die zugrundeliegenden Forschungsfragen zusammen, worauf im nachfolgenden Abschnitt der Aufbau der gesamten Arbeit vorgestellt wird. Es folgt eine Übersicht des bisherigen Forschungsstandes, die sowohl einschlägige Literatur als auch bekannte Anschauungsmodelle zum Thema umfasst.

1.1 Legitimation

Das statistische Bundesamt weist für das Jahr 2005 in Deutschland 6,765 Mio. Menschen aus, die als schwerbehindert gelten. Davon liegt bei 5 % (338 250 Betroffene) eine Sehbehinderung oder Blindheit vor. [Statistisches Bundesamt, 2008, S. 241 f.]

Für das Jahr 2007 stehen konkretere Daten des Statistischen Bundesamtes bereit, die über die Versorgungsämter erhoben werden. Von den 348 442 Blinden und Sehbehinderten sind 141 937 männlich und 206 505 weiblich. Bei 55,7 % der Erkrankten liegt der Grad der Behinderung bei 100 %. [Pfaff, 2010]

Andere Quellen berechnen, ausgehend von den Zahlen der Weltgesundheitsorganisation WHO, für das Jahr 2002 eine Anzahl von 164 000 Blinden und 1 066 000 Sehbehinderten in Deutschland. Die Bestimmung der Zahlen anhand der Blindengeldbezieher ergibt für das Jahr 1997 eine Zahl von 133 660 erblindeten Personen. Die Differenzen, beim Vergleich der unterschiedlichen Quellen, ergeben sich dabei hauptsächlich aus den verschiedenen Definitionen von Blindheit. Für die Gruppe der unter 15-jährigen liegt der Anteil blinder Personen in der Europäischen Union laut WHO bei 0,03 %, was bei einer gegenwärtigen Bevölkerung von 740 Mio. einer Anzahl von 220 000 Betroffenen entspricht, für die innerhalb der Bildungssysteme geeignete Angebote vorgehalten werden müssen. [Bertram, 2005]

Für die Weltbevölkerung liegen seitens der WHO (siehe Resnikoff u. a. [2004]) Schätzungen vor, die von einer Gesamtzahl von 36,8 Millionen Blinden ausgehen. Von diesen sind fast 1,4 Millionen unter 15 Jahre alt. Im Einklang mit diesen Zahlen stehen die Angaben über die Ursachen von Blindheit, die in 3,9 % aller Fälle von Geburt an bestand oder in der Kindheit auftrat (childhood blindness).

Die Diskussion über das Recht auf diskriminierungsfreien Zugang zu Bildung, ist in den letzten Jahren, insbesondere durch die UN-Konvention über die Rechte von Menschen mit Behinderungen, angeregt worden (Deutscher Bundestag, 2008). Artikel 24 verlangt ein integratives Bildungssystem auf allen Ebenen. Es ist ferner sicherzustellen, dass „Menschen mit Behinderungen innerhalb des allgemeinen Bildungssystems die notwendige Unterstützung geleistet wird, um ihre erfolgreiche Bildung zu erleichtern“ (Deutscher Bundestag, 2008, S. 1437).

Wie noch zu zeigen sein wird (vgl. Kapitel 2), sind astronomische Inhalte im Bildungswesen und in der Gesellschaft von hohem Wert. Sollen nun die Rechte blinder Schüler und Erwachsener auf Bildung im Sinne der UN-Konvention umfassend umgesetzt werden, so betrifft dies auch die oben genannten astronomischen Inhalte. Geeignete Vermittlungswege und Umsetzungsformen für die Zielgruppe der Blinden und Sehbehinderten zu finden, ist Aufgabe der fachdidaktischen Forschung.

1.2 Zielsetzung

Die Frage nach der grundsätzlichen Vermittelbarkeit von astronomischen Inhalten an blinde und sehbehinderte Lernende darf als bereits positiv beantwortet angesehen werden. So berichtet Zenkert [2008] über die Einführung des Astronomieunterrichts an den Blindenschulen der DDR:

„Die Bemühungen, spezifische Lehr- und Unterrichtsmittel für den Astronomieunterricht zu schaffen, hatten sich gelohnt. Damit ist auch der Beweis erbracht worden, dass auch Blinde und Sehbehinderte durch entsprechende Hilfsmittel die Welt der Sterne sowie die Raumfahrt ihren Möglichkeiten entsprechend bewusst miterleben können.“

Das Zitat zeigt ansatzweise, wie sich erfolgreicher Astronomieunterricht auch an Blindenschulen gestalten lässt – eben durch spezifische Lehrmittel, mit anderen Worten Modelle. Für die sehbehindertenspezifische Didaktik gilt nach Laufenberg und Löttsch [1995, S. 17] generell, dass „für die Veranschaulichung vieler Sachverhalte [...] Tast-Abbildungen häufig nicht aussagekräftig genug [sind]. Hier sind dreidimensionale Modelle unverzichtbar.“ Bei der Gestaltung solcher Lehrmittel und Modelle soll auch eine auf Comenius zurückgehende Forderung der allgemeinen Pädagogik Berücksichtigung finden:

„Alles soll wo immer möglich den Sinnen vorgeführt werden, was sichtbar dem Gesicht, was hörbar dem Gehör, was riechbar dem Geruch, was schmeckbar dem Geschmack, was fühlbar dem Tastsinn. Und wenn etwas durch verschiedene Sinne aufgenommen werden kann, soll es den verschiedenen zugleich vorgesetzt werden.“ [Comenius, 1657]

Die zusätzliche Einbindung astrophysikalischer Themen in den Physik bzw. Astronomieunterricht wird seit langer Zeit gefordert. Eine der ältesten astronomiedidaktischen Monografien, die diese Forderung erhebt, stammt von Höfler [1913]². Von da an wurde der Wunsch über viele Jahre immer wieder vorgebracht und erneuert (vgl. etwa Winnenburg [1974, S. 5] oder Schwarz [2013]).

Die zentralen Anliegen der vorliegenden Arbeit lassen sich daraus wie folgt zusammenfassen: Es wird beabsichtigt, Hilfsmittel – im Sinne von Modellen, Messgeräten und weiterem Lehr- und Lernmaterial – zu entwickeln, durch welche die Vermittlung astronomischer und astrophysikalischer Inhalte an Blinde und Sehbehinderte begünstigt wird. Dabei werden, wo dies notwendig ist, dreidimensionale Modelle verwendet, die möglichst viele Sinne ansprechen.³

²Genannt werden darin die Spektralanalyse im Allgemeinen (S. 27) sowie selbige im Bezug auf das Sonnenspektrum und ferner der Dopplereffekt (S. 333).

³Die Erarbeitung eines in sich geschlossenen Astronomiekurses wird dabei jedoch nicht angestrebt. Vielmehr gilt es, anhand ausgewählter Beispiele verschiedene Zugangsmöglichkeiten aufzuzeigen.

1.3 Originäre Forschungsfragen und eigenständige Beiträge

Aus der geschilderten Zielsetzung ergeben sich folgende Forschungsfragen, deren Beantwortung im Rahmen dieser Arbeit angestrebt wird:

- **Warum sollten Astronomie und Astrophysik auch an Blindenschulen gelehrt werden?**

Ausgehend von dem Stellenwert der Astronomie und ihrer Teildisziplinen in unserem heutigen Bildungswesen stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit der Einbindung des Faches bzw. seiner Inhalte in den Unterricht an Schulen für Blinde und Sehbehinderte. Dabei sollen vorrangig die pädagogischen und didaktischen Gesichtspunkte diskutiert werden.

- **Welche Themen kommen für eine Umsetzung in Modelle besonders in Betracht?**

Diese Frage soll anhand einer Lehrplananalyse beantwortet werden, da davon auszugehen ist, dass dort die Fachsystematik unter Berücksichtigung fachdidaktischer Überlegungen abgebildet ist.

- **Welche Sinneskanäle eignen sich zur Vermittlung astronomischer Inhalte? Lässt sich das Spektrum der Wahrnehmung über den Tastsinn hinaus nutzen?**

Zu untersuchen ist an dieser Stelle, wie sich unterschiedliche Sinneskanäle, wie etwa das Wärmeempfinden, sinnvoll zur Erkenntnisgewinnung an Modellen einsetzen lassen.

- **Lassen sich himmelskundliche Modelle für blinde und sehbehinderte Lernende mit einfachen Mitteln herstellen?**

Im Hinblick auf eine möglichst große Verbreitung derartiger Modelle und die angestrebte Teilnahme Sehbehinderter am Unterricht der Regelschulen, ist eine Herstellung mit begrenzten technischen und finanziellen Ressourcen wünschenswert. Es ist daher zu beantworten, ob eine adäquate Umsetzung auch unter diesen Rahmenbedingungen möglich ist.

- **Lassen sich wahrnehmungsphysiologische Hindernisse und Paradoxien umgehen bzw. ausschließen?**

Diese Frage ist im Zusammenhang mit der vorhergehenden zu sehen. So sind bei der Nutzung bestimmter Sinne auch ungewollte Assoziationen denkbar. Auch sind bestimmte Effekte der Wahrnehmung zu berücksichtigen, wie sie beispielsweise in sehr einfacher Form u.a. vom Weberschen 3-Schalen-Versuch für die Thermorezeption bekannt sind.

- **Können astronomische Modelle von Blinden und Sehbehinderten weitgehend selbstständig erschlossen werden?**

Im Sinne des Ansatzes des entdeckenden Lernens erscheint das eigenständige Erschließen des Modells, mit der damit einhergehenden Entdeckung seiner Eigenschaften, wünschenswert. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit eine solche Vorgehensweise unter möglichst weitgehendem Verzicht auf zusätzliche Informationen sinnvoll ist.

Die Beantwortung der oben genannten Forschungsfragen erfordert unter anderem fundierte Vorschläge für die Behandlung von Themen und Themenfeldern. Auch teilerprobte konkrete Vorschläge für (Tast-)modelle, Diagramme und Begleittexte werden vorgestellt.

Die eigenen Beiträge umfassen dabei sowohl die Fach- als auch die Sehbehindertendidaktik. Ferner beinhaltet die Entwicklung von Modellen und Materialien experimentelle Aufgaben und erfordert handwerkliches Geschick. Die Methode der Lehrplananalyse wird zur Auswahl geeigneter thematischer Schwerpunkte herangezogen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit folgt dem nun dargestellten Aufbau. Kapitel 2 stellt den Zweck und die Möglichkeiten der Einbindung astronomischer Inhalte in den Schulunterricht dar. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Punkte: Verständnis von Modellen, fächerübergreifende Zugänge sowie die förderliche Wirkung solcher Inhalte auf das Interesse und die Motivation der Lernenden. Weiterhin werden allgemeinbildende Funktionen thematisiert, etwa die Konstruktion eines Weltbildes, die Rolle der Astronomie beim Verständnis der Lebensgrundlagen der Menschheit sowie Fehlvorstellungen aus dem Bereich der Astronomie.

Kapitel 3.1 widmet sich der Frage, welche Themen aus dem Bereich der Astronomie für eine Behandlung im Unterricht im Allgemeinen und besonders für eine Umsetzung in sehbehindertengerechte Modelle in Frage kommen. Dies soll mit Hilfe einer Lehrplananalyse (Kapitel 3.2) beantwortet werden.

Die bei der Modellentwicklung zu beachtenden Grundlagen der Wahrnehmungsphysiologie sind in Kapitel 4 auszugsweise dargestellt. Behandelt werden neben allgemeinen Grundlagen der Tastsinn, das Gehör und das Wärmeempfinden.

Kapitel 5 stellt weitere Vorbetrachtungen dar, die mit der Modellentwicklung einhergehen, jedoch weitgehend unabhängig von der Wahrnehmungsphysiologie sind. Zum einen sind dies die Brailleschrift und die Gestaltungsgrundsätze tastbarer Darstellungen. Zum anderen werden Modelle in ihren allgemeinen theoretischen Eigenschaften sowie die praktische Umsetzung der Theorie in die Praxis dargelegt.

Die ausführliche Darstellung der Grundlagen und die Umsetzung der einzelnen Modelle erfolgt Abschnittsweise in Kapitel 6. Die einzelnen Abschnitte gliedern sich dabei wiederum in die Zielsetzung des jeweiligen Modells, den fachlichen Hintergrund, die fachlichen Lernziele und die technische Umsetzung. Es folgen jeweils Ausführungen zum Begleitmaterial, welches abhängig vom einzelnen Modell, in Form von Texten und Grafiken vorliegen kann. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung der verwendeten Hilfswerkzeuge, im Wesentlichen der Tiefziehmaschine zur Herstellung einfacher tastbarer Abbildungen und einer Auflistung derjenigen Umsetzungsformen, die sich bereits in der Entwicklungsphase als ungeeignet erwiesen haben.

Kapitel 7 behandelt die zweistufige Erprobung bestehend aus einer Erst- und Zweiterprobung mit einzelnen Testpersonen.

Den Abschluss der Arbeit bilden die Thesen, der Ausblick sowie die offenen Forschungsfragen.

1.5 Überblick über den Forschungsstand

1.5.1 Literaturübersicht

In der Fachliteratur dokumentierte Bemühungen, Astronomie im Schulunterricht auch Blinden zugänglich zu machen, gehen im deutschsprachigen Raum im Wesentlichen mit der Einführung des Schulfaches Astronomie in der DDR einher. Dementsprechend stammen erste Veröffentlichungen aus den 1960er Jahren. Zu erwähnen ist hier insbesondere die Entwicklung passender Lehrmittel durch den Blindenschullehrer Gerhard Henschel, der seine Maßnahmen und neu entwickelten Lehrmittel in zwei Publikationen darstellte (Henschel [1965] und Henschel [1967]). Niebling [1985] berichtet über die Einrichtung einer Arbeitsgemeinschaft Astronomie an der Sehschwachenschule in Weimar, um dem hohen Interesse der Schüler, über das einstündig unterrichtete Fach Astronomie hinaus, gerecht zu werden.

Mitte der Neunziger Jahre wurde durch Junker [1995] ein Planetenlehrpfad in Marburg konzipiert und umgesetzt, der speziell auf die Bedürfnisse Blinder und Sehbehinderter ausgerichtet ist. Erstmals wurde damit für Blinde die Möglichkeit geschaffen, selbstständig die Größenverhältnisse im Sonnensystem zu erfahren (der Maßstab beträgt 1:1 Mrd.) und gleichzeitig Informationen zu den Planeten zu gewinnen, da der Lehrpfad mit Tafeln in Brailleschrift versehen ist. Das seinerzeit weltweit einmalige Projekt fand in den folgenden Jahren zahlreiche Nachahmer im In- und Ausland (Deutsche Blindenstudienanstalt [2005]).

Einen anderen Weg beschritt das Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), als durch dieses im Jahre 2001 ein Internetportal mit astronomischen Informationen für Blinde gestaltet wurde. Die einzelnen Seiten behandeln das Sonnensystem, die Sterne, Galaxien und die Kosmologie. Sie verknüpfen jeweils einen Sachtext mit einer einfach gehaltenen Grafik, die sich auf Druckern für Schwellpapier in tastbarer Form zugänglich machen lässt (INAF - Astronomical Observatory of Padua [2001]).

Auf eine verbreitete Fehlvorstellung bezüglich des Zugangs von Blinden und Sehbehinderten zur modernen Astronomie, wird von Beck-Winchatz [2002] hingewiesen. So ist die Fähigkeit zur Wahrnehmung optischer Reize keineswegs Voraussetzung zur Teilhabe an den astrophysikalischen Forschungsprojekten unserer Zeit. Ebenso entfällt für den Astronomen die Reise zu den Teleskopen und deren Bedienung – die Änderung der Arbeitsbedingungen wird dabei insbesondere bei dem Gedanken an die Weltraumteleskope deutlich. Beck-Winchatz kommt daher zu dem Schluss: „There is nothing a blind person could not do as well“. Eben solche Daten der modernen Astronomie und Astrophysik auch für Blinde anschaulich zu machen, versuchte Grice [2004]. Mit *Touch the Universe* (Grice [2002]) sollten erstmals Aufnahmen des Hubble-Teleskops als tastbare Grafiken zugänglich gemacht und mit erklärenden Texten versehen werden. Der Ansatz wurde später auch auf Daten aus anderen Wellenlängenbereichen (Infrarot-, Radio- und Röntgenstrahlung) übertragen (Grice u. a. [2007]).

Auf den direkten haptischen Zugang setzen Beck-Winchatz und Ostro [2004]. Die Umsetzung von radarbasierten Beobachtungen erdnaheer Asteroiden in 3D-Modelle eröffnet einen

Zugang zu einem aktuellen Forschungsgebiet der Astronomie, welches zusätzlich von hohem öffentlichen Interesse ist. Gegenüber 2D-Darstellungen entfällt hier der oftmals schwierige Übergang der gedanklichen Umsetzung von der ebenen Zeichnung in ein dreidimensionales Objekt (Beck-Winchatz und Ostro [2004, S. 2]).

Auf die Zielgruppe der Sehbehinderten mit einem gewissen Restsehvermögen ausgerichtet, ist die Arbeit von Ries u. a. [2004]. Die Nutzung von einfachen kontrastverstärkten Modellen erlaubt etwa die Darstellungen der Mondphasen, während die bei der Entstehung des Sonnensystems wichtige Drehimpulserhaltung handlungsorientiert auf einem Karussell veranschaulicht wird. Eine zentrale Aktivität stellt die eigene Beobachtung heller Himmelsobjekte, wie des Mondes und der Venus mit Hilfe eines Teleskops, dar.⁴ Das Hauptaugenmerk liegt bei diesem Projekt auf einfach zu erstellenden Materialien, die sich im Schulunterricht einsetzen lassen.

Winchatz [2004] berichtet über ein Projekt am Yerkes Observatorium in Wisconsin, in dessen Rahmen blinden Schülern der Zugang zu den Instrumenten dieser astronomischen Forschungseinrichtung ermöglicht wurde. Weitgehend eigenständig war so die Aufnahme von Bildern möglich, die anschließend in Spezialpapier geprägt und so den Beobachtern zugänglich gemacht wurden.

In der Folgezeit wurden durch das Observatorium Bilder mit erklärenden Texten zur Verfügung gestellt, die unmittelbar geeignet sind auf Schwellpapier gedruckt zu werden (Bild 1.1). Auch zu weiteren Themen wurde in der Folgezeit Material entwickelt. Dazu gehört u.a. eine vereinfachte drehbare Sternkarte, die tastbar gemacht wurde oder eine Karte der Sonne, anhand der sich die Bewegung von Sonnenflecken und die Rotation unseres Zentralgestirns nachentdecken ließen. Ein weiteres Element ist die Auswertung der Lichtkurve eines veränderlichen Sterns, für den Helligkeitsmessungen über einen Zeitraum vom 12 Nächten hinweg zur Verfügung gestellt wurden. Auch die Mondphasen wurden in Form von tastbaren Abbildungen der einzelnen Phasen behandelt (Grice u. a.).

Einfache Möglichkeiten um Astronomie, teils mit Alltagsgegenständen an Blinde und Sehbehinderte zu vermitteln, fasst Grice [2007] in einer Literaturübersicht zusammen.

Weferling [2007] präsentiert eine Einführungsstunde zur Astronomie für eine gemischte Altersgruppe von Schülern bis hin zu Senioren. Am Anfang steht hierbei die Erkundung des Sonnensystems, wobei die Erde durch ein Sandkorn (2 mm Durchmesser) repräsentiert wird. Die Sonne sowie die übrigen Planeten lassen sich durch den gewählten Größenmaßstab ebenfalls mit alltäglichen Gegenständen darstellen und sollen so besser im Gedächtnis verankert werden. Um die Entfernungen innerhalb des Sonnensystems verständlich zu machen, wird eine Skalierung dieses Modells vorgenommen. Die Sonne wird von der Größe eines Basketballs auf die Größe eines Sandkorns verkleinert. Das eigentliche Modell besteht hierbei aus einer mit Knoten versehenen Schnur, wobei die Abstände der Knoten die Distanzen der

⁴Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann keine direkte Beobachtung im klassischen Sinn stattfinden, da auch vollständig Erblindete in das Konzept einbezogen werden. Stattdessen wird in Kapitel 6.4 ein Hilfsmittel vorgestellt, durch welches eigenständige Messungen auch für Blinde möglich werden.

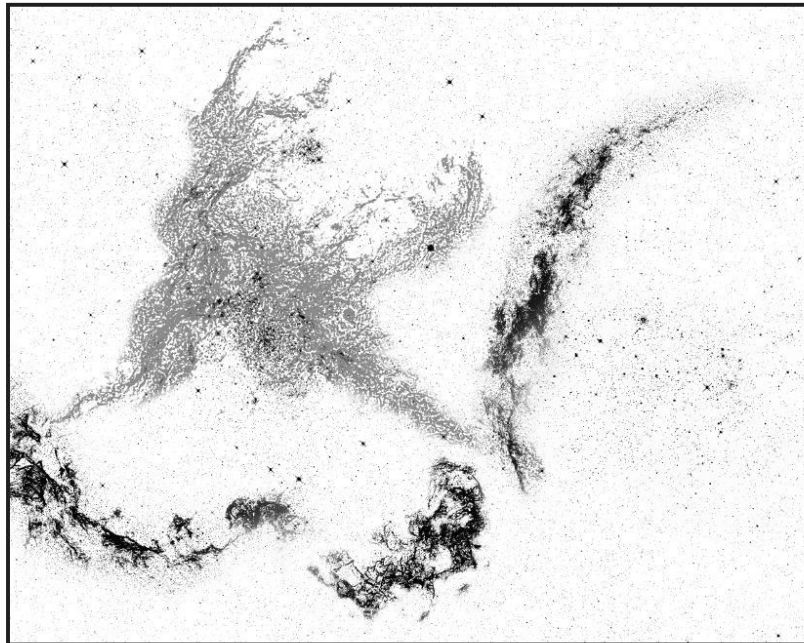
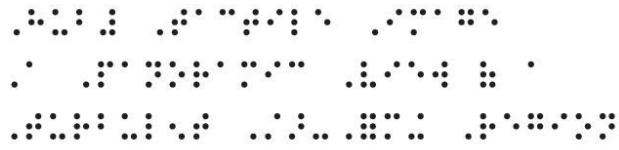


Abbildung 1.1: Sternentstehungsregion 30 Doradus als Vorlage für eine taktile Darstellung (Quelle: STScI [2012]).

Planeten widerspiegeln. Da der Abstand zum Merkur im Modell 8 cm beträgt, weist es eine Gesamtlänge (Pluto war in diesem Modell noch inbegriffen) von 8,45 m auf. Damit lassen sich die weitgehende Leere und die immensen Entfernungen innerhalb des Sonnensystems anschaulich darstellen. Gleichzeitig bietet diese Umsetzung gegenüber einem klassischen Planetenlehrpfad gewisse Vorteile hinsichtlich des Zeitbedarfs, der Witterungseinflüsse und eventueller körperlicher Einschränkungen seitens der Teilnehmer (Weferling [2007, S. 5]). Weitere Inhalte der Einführungsstunde betreffen die Entfernungen zu den nächsten Sternen und Galaxien sowie die Anzahl der Sterne in einer typischen Galaxie, die durch die Anzahl der Sandkörner in einem Eimer dargestellt werden.

Möglichkeiten eine Planetariumsshow auch für ein sehbehindertes Publikum zugänglich zu machen wurden durch den Verein Andersicht e.V. [2009] erarbeitet. Eine dort entwickelte Audiotranskription bietet beschreibende und erklärende Informationen zu den aktuellen Angeboten.

Im Rahmen des Jahres der Astronomie (2009) wurden in Spanien Projekte zur Anpassung astronomischer Angebote an die Bedürfnisse Behinderter entwickelt. Für Blinde und Sehbehinderte wurde als ein Beitrag die oben genannte Internetseite (INAF - Astronomical Observatory of Padua [2001]) ins spanische übersetzt und als Buch bereitgestellt. Weiterhin wurde ein Planetariumsprogramm so modifiziert, dass Konstellationen jeweils mit bestimmten Musikstücken verknüpft werden. Unter Nutzung der räumlichen Verteilung der Lautsprecher in der Planetariumskuppel kann so die Position eines Sternbildes näherungsweise dargestellt werden. Die eigentliche Erscheinung einiger ausgewählter Sternbilder wird mit Hilfe einer Halbkugel aus Kunststoff dargestellt, auf deren Oberfläche verschieden große Erhebungen die Sterne und deren unterschiedliche Helligkeiten symbolisieren. Die üblichen Verbindungslinien innerhalb der Sternbilder werden mittels durchgezogener Linien angedeutet, während gestrichelte Linien den Besucher von einem Sternbild zum nächsten leiten, wie es im Ablauf der Planetariumsshow vorgesehen ist (siehe Ortiz-Gil u. a. [2011] sowie Lanzara [2009]).

Die erst seit einigen Jahren auch für Anwendungen außerhalb der Industrie erschwingliche Technik des 3D-Drucks wird von Ortiz-Gil [b] verwendet, um ein tastbares Modell des Mondes darzustellen. Im Unterschied zu anderen Ansätzen sollte dabei keine flache Abbildung des Mondreliefs entstehen. Weiterhin wollte man die visuelle Erscheinung anstelle der topografischen Gegebenheiten nachvollziehen. Die Basis bilden Aufnahmen der Raumsonde Clementine, die jedoch für diesen Zweck zu detailreich sind. Nur deutlich sichtbare Elemente der Mondoberfläche, wie die größten Krater und Maria, Gebirgszüge und auffällige Strahlensysteme der Krater sollten erhalten bleiben. Die restlichen Elemente wurden aus den Daten entfernt oder mit einer künstlichen Unschärfe versehen. Abschließend erfolgte die Kennzeichnung der bedeutensten Elemente durch Buchstaben in Brailleschrift. Der entstandene Datensatz wurde in ein 3D-Modell umgesetzt und konnte so kostengünstig in größerer Stückzahl reproduziert werden.

Der (umgekehrte) Weg von der Vermittlung astronomischer Inhalte an Blinde hin zu neuartigen Vermittlungsansätzen für die allgemeine Öffentlichkeit ist in Hecker und Mohr [2012] dargestellt. Ausgehend von der Erkenntnis, dass Blinde und Sehbehinderte oftmals weniger

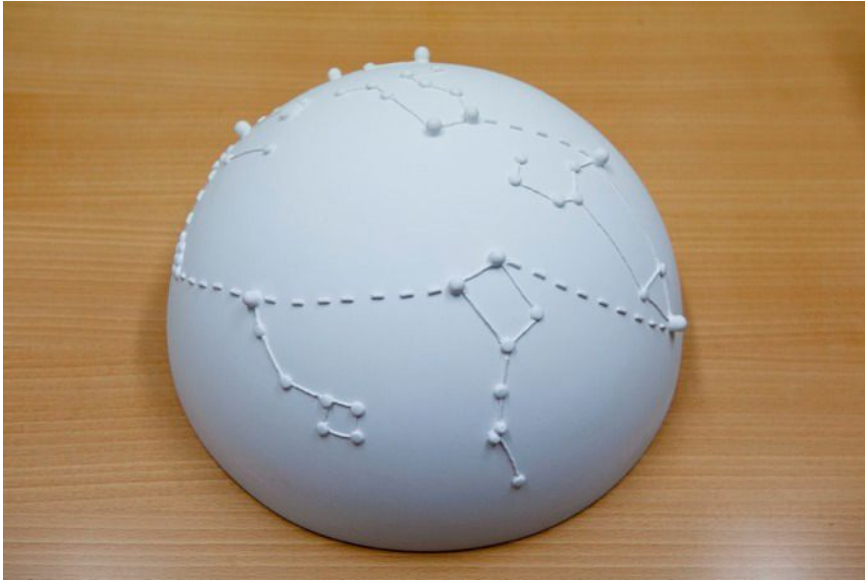


Abbildung 1.2: Halbkugel zur Unterstützung der Planetariumspräsentation (Quelle: Ortiz-Gil [a]).

Probleme bei der Vorstellung von Distanzen haben als Sehende und eben diese Vorstellungskraft für astronomische Zusammenhänge entscheidend ist, wurde ein Vermittlungskonzept entwickelt, welches die hier störende visuelle Wahrnehmung ausschließt. In einem komplett abgedunkelten Raum finden sich verschiedene Exponate, darunter tastbare Modelle der Planeten (nicht maßstabsgetreu), mit denen Oberflächenmerkmale dargestellt werden. Die Größenverhältnisse und Distanzen des Sonnensystems werden auf Basis der von Weferling [2007] vorgeschlagenen Modelle erläutert. Zur Darstellung der unterschiedlichen Gravitation auf den Planetenoberflächen, wurden den Besuchern gleich große Wasserflaschen mit unterschiedlichem Füllstand gereicht. Abschließend wurden Halbkugelmodelle der Planeten im richtigen Maßstab (lediglich der Durchmesser, nicht ihre Distanzen) präsentiert.

Die Zielsetzung eines barrierefreien astronomischen Observatoriums wird von der Sternwarte Sankt Andreasberg verfolgt (Sternwarte Sankt Andreasberg [2013]). So sollen neben Tastmodellen (vorgestellt in Reinboth [2012]) auch Audioaufzeichnungen zu den momentan beobachteten astronomischen Objekten angeboten werden. Die dort ebenfalls zum Einsatz kommenden Sternkarten und eine Form der Darstellung der räumlichen Verteilung von Sternen werden von Reinboth [2012] beschrieben. Die unterschiedlichen Leuchtkräfte der Sterne werden in diesen Modellen durch den Durchmesser von Metallstangen dargestellt. Ihre Länge entspricht der Entfernung zum Stern.



Abbildung 1.3: Modell des Jupiter aus der Ausstellung „Astronomie im Dunkeln“.

1.5.2 Existierende Modelle und Medien

Nachfolgend soll ein Überblick über ausgewählte Modelle und Medien zur Vermittlung astronomischer Inhalte gegeben werden. Die Ausführungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sollen lediglich in einem Querschnitt die bislang genutzten Vermittlungszugänge und Intentionen der Ersteller aufzeigen. Eine vollständige Katalogisierung ist im Rahmen dieser Arbeit nicht beabsichtigt.

Astronomische Modelle für Blinde und Sehbehinderte werden bereits seit einigen Jahrzehnten in der Literatur erwähnt, jedoch sind diese nicht immer zugänglich bzw. nicht vollständig in der Fachliteratur geschildert und können daher zum Teil nur stichwortartig beschrieben werden.

Neben Modellen für die genannte Zielgruppe existiert Unterrichtsmaterial, welches sich ohne oder nur mit geringen Anpassungen auch für Blinde und Sehbehinderte eignet. Dazu zählen u.a. das Füssener-Steckplanetarium (Reichert [2011]), welches die Stellung der Himmelskörper auf einfache Art und Weise veranschaulicht. Auch Dimensionsmodelle zur Darstellung astronomischer Entfernungen – die sich aus Pappscheiben und Bindfäden fertigen lassen – sind unmittelbar einsetzbar (Fischer [2005, S. 46 f.]). Gleiches gilt auch für Modelle aus Alltagsgegenständen, etwa Jupiter und sein Ringsystem, dargestellt durch eine Schaumstoffkugel, die durch eine Schallplatte gesteckt wird ([Fischer, 2005, S. 49 f.]). Hierbei zeigt sich die Verbindung zwischen allgemeiner Fachdidaktik sowie blindenspezifischer Didaktik, deren gemeinsame Lösung der Rückgriff auf Alltagsgegenstände sein kann.

Als ein Beispiel für Unterrichtsmaterial, welches Anpassungen notwendig macht, sei an dieser Stelle ein Hafttafelmodell zur Darstellung der Planetenpositionen genannt. Es bietet im Vergleich zum Füssener-Steckplanetarium mehr Freiheiten, erfordert jedoch das Anfertigen einer tastbaren Grundplatte sowie die nachträgliche Kennzeichnung der Planetensymbole in Blindenschrift (Fischer [2005, S. 56 f.]).

Eine Kurzübersicht der geschilderten blindenspezifischen Modelle ist in Tabelle 1.1 wiedergegeben.

Tabelle 1.1: Auswahl astronomischer Modelle und Medien.

Modell	Autor
Himmelsglobus (Sternbilder und Horizontebene)	Henschel [1967]
Himmelsglobus (Orientierungssterne und Koordinaten)	Henschel [1967]
Kratermodell	Henschel [1965]
Mondrelief	Henschel [1965]
Mondglobus	Henschel [1965]

Auswahl astronomischer Modelle und Medien. – **Fortsetzung**

Modell	Autor/Jahr
Sonnenglobus (Sonnenflecken und Protuberanzen)	Henschel [1965]
Drehbare Sternkarte	Henschel [1965]
Planetenmodelle aus Alltagsgegenständen	Henschel [1965]
Wandkarte „Tierkreis“	Henschel [1965]
Wandkarte „Nördlicher Sternhimmel“	Henschel [1965]
Raketenmodelle	Henschel [1965]
Modell der scheinbaren Sonnenbahn	Henschel [1965]
Himmelskuppel	Henschel [1965]
Planeten unseres Sonnensystems	Henschel [1965]
Größen- und Entfernungsrelationen im Sonnensystem	Weferling [2007]
Anzahl der Sterne im Milchstraßensystem, Anzahl der Galaxien im Universum	Weferling [2007]
Tastbare Darstellungen von Hubble-Bildern	Grice [2002]
Asteroidenmodelle	Beck-Winchatz und Ostro [2004]
Drehbare Sternkarte	Grice [2004]
Mondphasen	Grice [2004]
Diagramme zu erdnahen Asteroiden	Grice [2004]
Sonnenflecken	Grice u. a.
Veränderliche Sterne	Grice u. a.
Planetenlehrpfad	Junker [1995]
Planetenmodelle	Hecker und Mohr [2012]
Buch zur Einführung in astronomische Themen	Ortiz-Gil u. a. [2011]

2 Bedeutung der Astronomie für Schule und Gesellschaft

Im folgenden Kapitel soll die Frage nach der heutigen Bedeutung der Astronomie beantwortet werden. Dies soll zum einen im Hinblick auf die gesamtgesellschaftliche Bedeutung der Astronomie geschehen. Der Einfluss der Astronomie auf das Weltbild der Menschen und ihre Bedeutung als Lebensgrundlage der Zivilisation insgesamt sollen dargestellt werden. Im zweiten Teil wird die Bedeutung der Astronomie für den Schulunterricht thematisiert (Kapitel 2.2), für den positive Effekte aus der Einbindung der Astronomie als eigenes Schulfach oder auch durch die Integration astronomischer Themen in die bestehenden Unterrichtsfächer zu erwarten sind. Die Notwendigkeit astronomischer Bildung wird anhand verbreiteter Fehlvorstellungen dargelegt. Das ebenfalls bedeutsame Verständnis von Modellen, wie sie im naturwissenschaftlichen Unterricht häufig anzutreffen sind, wird in Kapitel 5.4.1 näher betrachtet.⁵

2.1 Allgemeinbildende Funktionen der Astronomie

Schwarz [2013] benennt in seinem Beitrag drei zentrale Aspekte, die als Argumente für den Fortbestand oder die Einführung eines Schulfaches Astronomie beständig vorgebracht werden. Dies sind:

- Die Ästhetik der Himmelskunde und ihre motivationalen Konsequenzen,
- die weltanschauliche Bedeutung der Astronomie in ihrem Wortsinn als Weltschau,
- ihr praktischer Nutzen.

Wenngleich die Argumente auf das konkrete Schulfach bezogen werden, so wird dennoch der übergreifende, allgemeinbildende Charakter ihres Inhaltes unmittelbar deutlich.

Auch die allgemeine Pädagogik entwirft Konzepte, anhand derer sich die Beiträge eines Faches zur Allgemeinbildung, über den unmittelbaren Schulunterricht hinaus, beurteilen lässt. Heymann [1997] führt sieben Aufgaben auf, die seiner Ansicht nach von allgemeinbildenden Schulen und damit natürlich auch – jeweils in begrenztem Umfang – von den

⁵Es wird im folgenden Kapitel bereits an einigen geeigneten Stellen auf bestimmte Modelle verwiesen, um die Bezüge der hier dargestellten Grundgedanken zur Auswahl und Umsetzung von konkreten Modellen aufzuzeigen.

einzelnen Schulfächern zu erfüllen sind. An dieser Stelle sollen nicht die möglichen Beiträge der Astronomie zu allen Aufgaben der Schule untersucht werden. Vielmehr wird lediglich die Weltorientierung als ein Punkt herausgegriffen, zu dem die Astronomie in besonderem Maße beitragen kann.

Kennzeichen von Weltorientierung sind nach Heymann ein – über den privaten Lebenshorizont hinausgehender – Überblick über die erkennbare Welt sowie eine Auseinandersetzung mit den epochaltypischen Schlüsselproblemen nach Klafki. Es gilt hierbei jeweils die fundamentalen Grundsätze eines jeden Faches zu finden, auf denen ein tragfähiges Weltbild aufgebaut werden kann. Im Hinblick auf das dadurch notwendig werdende exemplarische Prinzip stellt sich ferner die Frage nach der damit ebenfalls notwendig werdenden Vernetzung der Inhalte untereinander sowie unter den verschiedenen Fächern.

Die Beiträge des Astronomieunterrichts bzw. von astronomischen Inhalten innerhalb des Physikunterrichts zum Aufbau eines Weltbildes, sind unmittelbar ersichtlich.⁶ Dabei ermöglicht die Einnahme einer astronomischen Perspektive zum einen den äußeren Blick auf die Welt als Ganzes, zum anderen können jedoch viele naturwissenschaftliche oder auch gesellschaftliche Fragen – man denke etwa an die Energieversorgung der Zukunft oder den Klimawandel – wiederum durch Beiträge der Astronomie einer Lösung näher gebracht werden. Dies geschieht anhand von Phänomenen, die oftmals leicht zu beobachten sind oder der Beobachtung zugänglich werden, wenn der Blick genügend geschärft wird. Die Authentizität solcher astronomischen Fragestellungen sowie die Möglichkeit und Notwendigkeit zur Anbindung weiterer Disziplinen machen den Reiz dieser Wissenschaft aus und lassen ihren allgemeinbildenden Charakter deutlich hervortreten.

2.1.1 Generierung eines Weltbildes

Seit jeher bildet der Stand der astronomischen Kenntnis den Rahmen für das Weltbild des Menschen. Ein Blick zum Himmel stellt ihn uns zunächst als Halbkugel dar, die sich über der flachen Erde erhebt. Schon die Philosophen der Antike wie Aristoteles und Ptolemäus, erweiterten diese einfache Vorstellung zu einem gedanklichen Modell von einer Kugelgestalt der Erde, die von Eratosthenes um 230. v.Chr. mit Werten für deren Umfang untermauert wurde (vgl. Hamel [2013]).

Astronomische Beobachtungen hatten in den folgenden Jahrhunderten einen bedeutenden Anteil daran, die Erde in den Köpfen der Menschen aus dem Zentrum des Weltalls – zuerst unter die übrigen Planeten des Sonnensystems und danach noch weiter in den Randbereich des Milchstraßensystems – zu rücken. Mit der Entdeckung unzähliger weiterer Galaxien und vieler hundert Planeten in unserer kosmischen Umgebung, verliert unser Heimatplanet immer mehr von seiner einst so zentralen Stellung. Gleichfalls rücken jedoch auch die mannigfaltigen Erscheinungsformen fremder Planetensysteme ins Bewusstsein. Nach wie vor

⁶Auch die Anknüpfungspunkte zu weiteren schulischen Disziplinen werden im Kapitel 2.2.1 dargelegt.

bietet die Erde einmalig günstige Bedingungen für die Entwicklung von hochentwickeltem Leben – die letzten Schritte der Entwicklung unseres Weltbildes sind noch nicht gegangen.

Einzelne Schritte dieser Entwicklung des Weltbildes der Menschheit sind zum Teil auch heute noch vorhanden. Sei es in Form von Misskonzepten unter Erwachsenen oder als Entwicklungsschritte des Weltbildes bei Kindern. Studien offenbaren, dass sich Lernende mit zunehmendem Alter der Beschaffenheit unseres Planeten zunehmend bewusst werden und damit auch seine Besonderheiten und Probleme erkennen. So handelt es sich bei unserem Heimatplaneten um ein in sich geschlossenes System, welches von uns genutzt werden kann, jedoch auch vor Überforderung geschützt werden muss (siehe dazu auch Kapitel 2.1.2).

Es soll nun betrachtet werden, wie die Entwicklung eines vollständigen Weltbildes, welches den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft abbildet, verstanden werden kann. Die Erkundung des Universums kann in Analogie zur Erkundung einer noch unbekanntes Stadt gesehen werden:

Am Anfang steht die Untersuchung des unmittelbaren Nahraumes, die Objekte um den Beobachter herum – die Gebäude, das Wegenetz und die Verkehrsmittel – erscheinen zunächst noch unstrukturiert. Die genauere Beobachtung zeigt erste Strukturen in der unmittelbaren Umgebung. Gebäude formen Gebäudekomplexe, die durch Straßen und Grünanlagen voneinander getrennt sind. Auf den Verkehrswegen offenbaren sich Bewegungsabläufe. Manche von ihnen sind einmalige Ereignisse, andere zeigen nach einiger Zeit der Beobachtung ihre Periodizität, wie etwa die wiederkehrenden Stopps einer Straßenbahn. Die Bewegungen laufen nicht nur nach zeitlichen Regeln ab, sondern werden auch von bestimmten räumlichen Rahmenbedingungen weiter strukturiert. So fließt der Verkehr etwa auf den Verkehrswegen in vorgegebene Richtungen. Eine günstige Beobachtungsposition erlaubt u.U. auch den Blick über weite Teile einer Stadt und gibt den Blick auf die großräumigen Strukturen frei. So zeigen sich weitere Stadtgebiete mit unterschiedlicher Bebauung, Gebiete mit älteren Gebäuden werden sichtbar, solche mittleren Alters und auch jene, die erst kürzlich entstanden sind.

Diese Analogie deckt die Bereiche astronomischer Bildung ab, wie sie auch in Kapitel 3.1 dargestellt werden. Die Orientierung im Nahraum entspricht der Beobachtung der Objekte des Sonnensystems. Es zeigt sich hier bereits eine erste Struktur: das Sonnensystem selbst mit seinen mannigfaltigen Objekten und Objektklassen, wie etwa den Planeten oder den Kleinkörpern im Asteroidengürtel. Die periodischen Bewegungen innerhalb des Sonnensystems, seien sie nun durch die Drehung der Erde um sich selbst oder den Umlauf der Planeten um die Sonne hervorgerufen, sind elementar für das Verständnis der Welt. Richtet man den Blick tiefer ins All, so zeigen sich weitere Objekte und Strukturen. Gleichzeitig erlaubt uns eine große Stichprobe an Beobachtungsobjekten auch erste Aussagen zur Entwicklung der Bestandteile des Kosmos, auch wenn wir – wie etwa bei der Errichtung eines Gebäudes, die wir nur im Vorübergehen beobachten und daher kaum eine Veränderung feststellen können – die Entwicklung des Einzelobjektes selbst i.d.R. nicht nachverfolgen können.

Die Astronomie erweitert jedoch nicht ausschließlich unser Weltbild um viele Größenordnungen, sie verknüpft gleichzeitig auch immer aufs Neue unsere alltägliche Umgebung und die

physikalischen Gesetze, die ihnen zugrunde liegen, mit den Erscheinungen im fernen Weltall. Die umfassende Gültigkeit der Physik, auch in Form der Astrophysik, als eine Anwendung im Bereich der astronomischen Forschung, ist losgelöst von Raum und Zeit, was die Welt um uns herum gleichzeitig zu einem Teil des Universums macht und damit die unvorstellbar großen Skalen mit jenen in unserer Lebenswelt in Verbindung bringt (vgl. Zimmermann [2002, S. 102]). Wie Lindner [2005, S. 4] treffend bemerkt, überschreitet dabei kein anderes Fach die Grenzen der Erde so konsequent wie der Astronomieunterricht.

2.1.2 Rolle der Astronomie als Lebensgrundlage der Menschheit

In den letzten Jahrzehnten wurden einige der fundamentalsten Probleme der Menschheit deutlich sichtbar. Der kräftige Anstieg der Bevölkerungszahlen sowie der stetig steigende Energiebedarf führen uns die begrenzten Ressourcen des Planeten Erde nachdrücklich vor Augen. Auch den regenerativen Energien oder anderen vermeintlich umweltschonenden Techniken, sind Grenzen gesetzt. Diese ergeben sich nicht ausschließlich aus dem Flächenbedarf, sondern auch aus der Überlegung heraus, dass die Erde sich als Gesamtsystem im thermodynamischen Gleichgewicht befinden muss. So würde konstantes Wachstum unabhängig von der Quelle der Energie über die freigesetzte Abwärme zu einer kontinuierlichen Steigerung der mittleren Temperaturen der Erde führen.

Auch ist der Nutzung regenerativer Energien aus einem anderen Grund eine obere Grenze gesetzt. So lässt sich die ankommende Strahlung der Sonne nur zu einem sehr kleinen Teil technisch nutzen. Die Gesamtheit der einfallenden Strahlung und der Carnot-Wirkungsgrad schieben dem ungezügelter Wachstum des Energiebedarfes einen Riegel vor. [Schwarz und Deitersen, 2013]

Solche und ähnliche Überlegungen lassen sich besonders leicht mit dem äußeren Blick der Astronomie verstehen (Abb. 2.1). Der typische Perspektivwechsel der Astronomie, zu einer Außenansicht des Objektes Erde, kann somit auch fruchtbar für zunächst rein physikalische Überlegungen sein.

Sie zeigt uns einerseits die Begrenztheit des Systems Erde und gleichzeitig seine Einzigartigkeit in unserem Sonnensystem und weit darüber hinaus. Sie schärft damit auch den Blick für die besonderen Bedingungen, die die Erde zu dem Ort machen, den wir kennen. Die Vielzahl bereits bekannter Exoplaneten und ihr Vergleich mit den Rahmenbedingungen für die Entstehung von Leben zeigt, welche kleine Veränderungen ausreichend sind, um aus einer bewohnbaren Welt, eine für uns unbewohnbare zu machen.

2.1.3 Fehlvorstellungen im Bereich der Astronomie

Die Funktionen der Astronomie zur Herausbildung eines Weltbildes, welches dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaft genügt sowie die Beschäftigung mit den Fragen der fundamen-

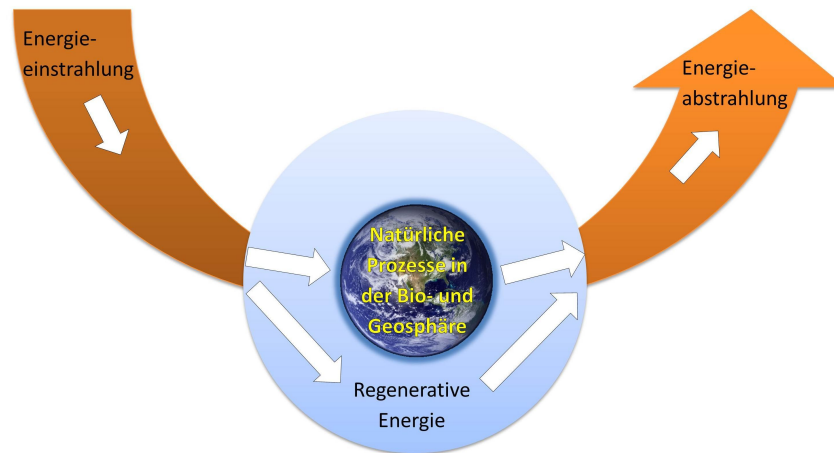


Abbildung 2.1: Die Nutzung regenerativer Energien durch den Menschen muss in der energetischen Bilanz der Erde versteckt werden (nach Schwarz [2007, S. 174]).

talen Lebensgrundlagen der menschlichen Zivilisation, führen hin zu den Fehlvorstellungen und Misskonzepten, die diesen Anliegen entgegenstehen.

Untersuchungen zur Vorstellung der Gestalt der Erde bei Schülerinnen und Schülern des Alters von 8 bis 14 Jahren zeigen verschiedene Modellvorstellungen, die sich im Laufe der Zeit verändern und sich hin zu einem wissenschaftlich vertretbaren Bild der Erde entwickeln. Die verschiedenen Modellvorstellungen werden bei Sommer [2004] zusammengefasst (ausführlicher u.a. auch bei Vosniadou und Brewer [1992] oder Nussbaum [1979]).

Die erste Stufe ist durch die sehr stark vereinfachende Vorstellung einer flachen Erde mit einem ebenso flachen Himmel gekennzeichnet. Der Himmel erstreckt sich parallel zur Erdoberfläche. Die bekannten Himmelskörper befinden sich am Himmel, weitere Vorstellungen zu einem, die Erde umgebenden Universum, fehlen in dieser Entwicklungsstufe.

Mit der zweiten Stufe ist die Vorstellung zu einem Halbkugelmodell weiterentwickelt worden. Die bewohnte Oberfläche der Erde ist flach, der Himmel mit Sonne, Mond und Sternen ist darüber gewölbt. Das Weltall ist hier optional und kann sich entweder oberhalb der Halbkugel des Himmels erstrecken oder auch die Erde als Ganzes umschließen.

Modell 3 stellt die Erde bereits als Kugel dar. Die Schwerkraft ist dabei jedoch stets im festen Bezugssystem des Bildes nach unten gerichtet (unterer Bildrand der Zeichnungen). Leben kann daher nur auf der Oberseite der Kugel existieren, das bekannte Antipodenproblem tritt zutage. Das Weltall mit den Himmelskörpern erstreckt sich um die Erde herum, die Himmelskörper sind jedoch u.U. vorrangig oberhalb eines eingezeichneten Beobachters platziert.

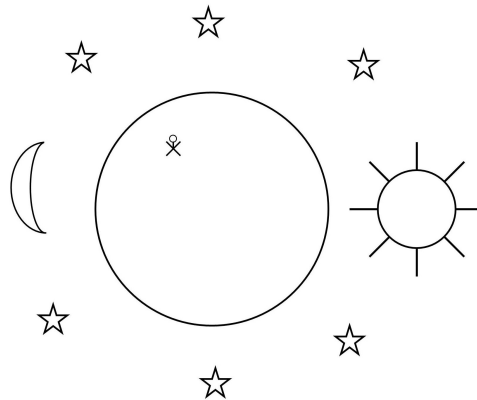


Abbildung 2.2: Beispielhafte Darstellung zum Modell 4. Prinzip der Vorstellung von Schülern zum Planeten Erde (nach Sommer [2004, S. 95]).

Eine wissenschaftliche vertretbare Vorstellung ist mit Modell 4 erreicht. Die Erdoberfläche wird als Kugeloberfläche verstanden, die insgesamt bewohnbar ist. Alle Gegenstände fallen in diesem Modell stets in Richtung des Erdmittelpunktes. Die Beschaffenheit des Weltalls entspricht weitgehend der von Modell 3, wobei hier die Sterne um die Erde herum gleichmäßig verteilt sind.

An dieser Stelle liegt eine vergleichbare Vorstellung der Welt vor, wie sie auch in der Zeit vor der kopernikanischen Revolution bestanden hat. Die Erde befindet sich im Zentrum des Weltalls. Allerdings kann an dieser Stelle bereits vermutet werden, dass Fragestellungen nach der Begrenztheit von Ressourcen, auch aus astronomischer Sicht, schon auf diesem Entwicklungsstand behandelt werden können. Die Erweiterung des Weltbildes zu einem heliozentrischen ist hierfür zunächst nicht erforderlich.

Im Hinblick auf eine umfassendere astronomische Allgemeinbildung, die zumindest diejenigen Phänomene umfasst, die dem Beobachter bereits ohne Hilfsmittel zugänglich sind, ist jedoch der Übergang zu einem heliozentrischen Weltbild erforderlich.

In direktem Zusammenhang damit stehen Fehlvorstellungen zum Tag-Nacht-Wechsel. Trumper [2001] konnte zeigen, dass auch auf der junior high school (12-15 jährige Schüler) noch ein beträchtlicher Anteil der Schüler (39 %) diesen auf die Bewegung der Erde um die Sonne bzw. auf eine Bewegung der Sonne um die Erde (11 %) zurückführen. Fehlvorstellungen zu den Mondphasen sind weniger verbreitet, jedoch werden diese von 25 % der Befragten auf den Eintritt des Mondes in einen Schatten⁷ zurückgeführt. [Trumper, 2001, S. 1116]

Deutliche Schwierigkeiten konnten von Trumper auch im Bereich von Dimensionen und Entfernungen ausgemacht werden. So konnte die Entfernung zwischen Erde und Sonne in einer Modellvorstellung (Darstellung der Erde mittels eines Basketballs) nur von 18 % der

⁷„[...] 25 % believed that the Moon moves into the Sun’s shadow.“

Schüler richtig beantwortet werden.⁸ Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Entfernung zum nächstgelegenen Stern. Hier lag der Anteil der richtigen Antworten ebenfalls nur bei 20 %.⁹ Der ungefähre Durchmesser der Erde wurde sogar von 91 % der Befragten falsch wiedergegeben.¹⁰

Neben diesen Befunden für die absoluten Abmessungen und Entfernungen von Himmelskörpern wurde auch deren relative Entfernung, von der Erde aus gesehen, mittels einer Frage erfasst. Lediglich 36 % wählten dabei die richtige Reihenfolge Mond – Pluto – Sterne.

Unmittelbar den Alltag betreffen drei Fragen zu den Jahreszeiten. Die richtige Begründung für die Entstehung der Jahreszeiten lieferten hier 46 % der Befragten. Die größte Gruppe der fehlerhaften Antworten führte sie auf den variablen Abstand zwischen Erde und Sonne im Jahresverlauf zurück. Die Frage nach dem Grund für die höheren Temperaturen im Sommer wurde jedoch lediglich von 36 % der Schüler richtig beantwortet. Die Inkonsistenzen bei den Antworten werden durch die Auswertung einer weiteren Frage bestätigt, die auf den Zeitpunkt der größten Tageslänge in Australien abzielt. Hierbei schrumpfte die Quote der richtigen Antworten auf 28 %. [Trumper, 2001]

Die Studien zeigen, dass Fehlvorstellungen auch bei der Erklärung unmittelbar zugänglicher und alltäglicher Phänomene und Sachverhalte weit verbreitet sind. Abmessungen und Entfernungen werden falsch eingeschätzt und das Phänomen der Jahreszeiten ist oftmals nicht vollständig verstanden. Diese Resultate können als ein Defizit in der Allgemeinbildung verstanden werden. Darüber hinaus ergeben sich jedoch weitere Bezüge z.B. zur energetischen Leistungsfähigkeit des Systems Erde – deren Größe offenbar oft überschätzt wird – sowie zu Fragen des Klimas bzw. von Klimaveränderungen, was mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein dürfte, wenn bereits der Mechanismus des Wechsels der Jahreszeiten unverstanden bleibt.

Dementsprechend ist eine astronomische Grundbildung, die ihren Beitrag zur Verminderung derartiger Fehlvorstellungen leistet, dringend geboten – und dies natürlich im Hinblick auf alle Lernenden. Die in Kapitel 6 dargestellten Modelle greifen einige der genannten Fehlvorstellungen auf. Beobachtungen, die als Ausgangspunkt zur richtigen Interpretation der Ursachen unserer Jahreszeiten dienen können, werden unter Verwendung des Winkelmessers möglich.¹¹ Auch die Punkte astronomischer Abmessungen und Entfernungen finden sich in Modellen oder dem Begleitmaterial verwirklicht.¹²

⁸ Antwortmöglichkeiten: 30 cm, 1,5 m, 3 m, 7,5 m, 30 m

⁹ Frage: Wie groß ist der Abstand, wenn beide Sterne durch Weinbeeren dargestellt werden? Antwortmöglichkeiten: 0,5 m, 1 m, 100 m, 1,5 km, 150 km

¹⁰ Antwortmöglichkeiten: 1.500 km, 15.000 km, 150.000 km, 1.500.000 km, 15.000.000 km

¹¹ Siehe Kapitel 6.4.

¹² Astronomische Entfernungsverhältnisse werden im Modell räumliches Sternbild thematisiert, während Größenverhältnisse unter Sternen im Begleitmaterial desselben Modell dargestellt sind (Kapitel 6.2).

2.2 Einbindung astronomischer Inhalte in den Schulunterricht

Elementare astronomische Phänomene finden bereits auf vielfältige Weise Eingang in den Schulunterricht. Dies betrifft hauptsächlich den Sachunterricht in den Grundschulen. Dabei liegt der Fokus auf Erscheinungen wie Tag-Nacht-Wechseln, Jahreszeiten oder Finsternisse, deren Entstehung auf die Bewegung der Himmelskörper zurückgeht. Die genannten Themen sind auch in den Lehrplänen für Astronomie der weiterführenden Schulen stark vertreten (siehe Kapitel 3.2.3). Zimmermann formuliert den gewünschten Beitrag des Faches zur Schulbildung folgendermaßen:

„Dabei scheint mir wesentlich zu sein, dass bei den Schülern die Erkenntnis geweckt wird, dass die Erde nicht allein in der Welt existiert – Welt im umfassendsten Sinn verstanden –, sondern dass Sonne und Mond wie die Erde auch materielle Körper sind, Himmelskörper, die in ihren Bewegungen bestimmten Regeln, Gesetzen, unterworfen sind, und dass diese Gesetze erkannt und aus den Beobachtungen hergeleitet werden können. Das Ziel derartiger Betrachtungen sollte sein, dass die Schüler wenigstens andeutungsweise eine Vorstellung von der Welt außerhalb der Erde gewinnen.“ [Zimmermann, 2002, S. 99]

Darüber hinaus lassen sich zwei weitere Aspekte ausmachen, unter denen die wesentlichen Beiträge der Astronomie zu einem modernen Schulunterricht zusammengefasst werden können. Zum einen ist dies das Verständnis von Modellen, wie sie im naturwissenschaftlichen Unterricht häufig vorkommen und oftmals nicht als solche erkannt werden. Zum anderen die Möglichkeit fächerübergreifenden und fächerverbindenden Unterricht zu praktizieren, ohne auf behelfsmäßige Konstrukte ausweichen zu müssen, die lediglich die Legitimation liefern, jedoch keine wirklich übergreifende Fragestellung bieten. Beide Aspekte sollen kurz erläutert werden, um die Bedeutung astronomischer Inhalte für die Schule – über die eingangs erwähnten elementaren Phänomene hinaus – darzustellen. Die Erläuterungen zur Bedeutung von Modellen im Unterricht finden sich in Kapitel 5.4.1, wo ebenso auf die Grundlagen der Modellentwicklung eingegangen wird.

Fragt man sich welche besonderen Beiträge die Astronomie zum Schulunterricht leisten kann, die nicht bereits durch den bestehenden Physikunterricht abgedeckt werden, so zeigt sich zunächst die enge Verbindung zwischen beiden Fächern, jedoch wird ebenfalls deutlich, dass beide Fächer an entscheidenden Stellen bedeutende Unterschiede aufweisen.

So erweitert erst die Astronomie den Blick über die Erde hinaus ins Weltall, wo das Vorstellungsvermögen von Raum und Zeit weit mehr gefordert ist, als im Physikunterricht. Auch sind die physikalischen Gegebenheiten, auf die man im Universum stößt, deutlich zu unterscheiden zu jenen auf der Erde – man denke etwa an die Temperatur und Druckverhältnisse im Inneren eines Sterns. Die Astronomie eröffnet damit einen Bereich jenseits technischer Betrachtungen und lokal durchgeführter Experimente, wie sie aus dem Physikunterricht bekannt sind. Auf Seiten der Methoden erlaubt die Astronomie die Untersuchung von Objekten und Prozessen, die sich dem unmittelbaren materiellen Einwirken im Experiment entziehen.

Die spezifischen Methoden der Astronomie gestatten auch die Beobachtungen quantitativer Veränderungen, wie es die Physik meist nicht leisten kann. Schließlich ist auch die erkenntnistheoretische Dimension der astronomischen Forschungsmethoden zu berücksichtigen, die zeigen, dass sowohl im fernen Weltall als auch auf der Erde die gleichen Naturgesetze gültig sind. [Bernhard, 2005, S. 6]

2.2.1 Fächerübergreifende Zugänge

Bereits seit vielen Jahren sind die Forderungen von Pädagogik, Didaktik und Politik nach fächerübergreifendem und fächerverbindendem Unterricht aus den Diskussionen um die Verbesserung der Qualität des Unterrichts nicht mehr wegzudenken. Ausdruck fanden diese Forderungen etwa auch in den Vereinbarungen zur Gestaltung des Unterrichts in den gymnasialen Oberstufen (Kultusministerkonferenz [2013, S. 5]). Längerfristig angelegte Themen und einzelne Fragestellungen für den Unterricht, müssen jedoch für die Behandlung in fächerübergreifender Form geeignet sein. Es soll im Folgenden gezeigt werden, dass die Astronomie in dieser Beziehung wertvolle Beiträge zu einer zeitgemäßen Unterrichtsgestaltung leisten kann.

Über Themen der klassischen oder elementaren, phänomenorientierten Astronomie hinaus, bietet die Astrophysik reichhaltige Anknüpfungspunkte um fächerübergreifenden Unterricht realisieren zu können. Selbstverständlich ist hierzu ein breites mathematisch-physikalisches Grundwissen erforderlich. Hier bietet sich zunächst die Möglichkeit der Übung, Vertiefung und des Transfers sowie der Erweiterung. Über den mathematisch-physikalischen Unterricht hinaus, eröffnet eine problemorientierte astrophysikalische Aufgabenstellung jedoch auch die Einbindung geschichtlicher oder philosophischer Fragestellungen. [Zimmermann, 2002, S. 104]

Die nachfolgend dargestellten Ansätze sind lediglich beispielhaft zu verstehen und erheben keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit, was die Breite der abgedeckten Fächer oder die Themengebiete anbelangt.

Betrachtet man etwa das Fach Chemie, so bestünde ein Zugang zu fächerübergreifendem Unterricht – auch in Form von Schülerexperimenten – in der Analyse von Meteoriten. So kann etwa der Gehalt an Eisen und Nickel mit chemisch-analytischen Methoden bestimmt werden (Waitz u. a. [2013]). Eine Verbindung des physikalischen, astronomischen und chemischen Arbeitsgebietes schafft z.B. die Frage nach dem Ursprung der chemischen Elemente wie sie etwa von Keller [2011] dargestellt wird.

Die Verknüpfungen von Astronomie und Astrophysik mit der Mathematik sind reichhaltig. Die Frage nach den Abmessungen des Sonnensystems lässt sich durch Anwendung geometrischer Überlegungen auf die Beobachtung des Vorübergangs der Venus vor der Sonne beantworten. Auch ist die enge Bindung von geophysikalischen/astronomischen Überlegungen und der Geometrie leicht erkennbar. So lässt sich etwa – um ein Beispiel von hohem lebensweltlichem Bezug aufzugreifen – die Sonnenhöhe im Jahres- und Tagesverlauf mit geringem

Aufwand herleiten (siehe Lotze [2011, S. 26 f.]). Die nahe Verwandtschaft von Astronomie und Geografie wird von Gerber [2001] dargestellt. Angesprochen werden die Untersuchung des Erdmagnetfeldes, die Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen von Impaktereignissen, die Klimatologie sowie der Vergleich irdischer geologischer Strukturen mit jenen auf den übrigen Himmelskörpern.

Die wachsende industrielle Bedeutung der Raumfahrt und die politischen Implikationen machen das Thema Raumfahrt – als ein Element des Astronomieunterrichts – auch zu einem Thema des Sozialkundeunterrichts. [Kretschmer, 2000]

Möglicherweise weniger leicht erkennbar sind jedoch die reichhaltigen Verbindungen zwischen Astronomie und der Kunst sowie der Literatur. So zeigt etwa Lichtenfeld [2000] diverse Fresken, Skulpturen und Gemälde, deren astronomische Inhalte Gegenstand einer intensiveren Auseinandersetzung sein könnten. Fotos und Gemälde als Quelle astronomischer Fragestellungen präsentieren ferner auch Müller [2011] und Zenkert [2011].

An der Nahtstelle zwischen Physik, Astronomie und Mathematik findet sich das Fach Informatik. Nicht zwingend ist hier die Beherrschung einer komplexen Programmiersprache erforderlich, wenn es um die Auswertung und Darstellung astronomischer Erscheinungen geht. Auch mittels einer Tabellenkalkulation kann hier ein fächerübergreifender Zugang gefunden werden, wie etwa bei Schultz [2011], der Bahn und Umlaufzeiten des Mondes in Excel berechnet und grafisch darstellt.

Abschließend seien noch Überschneidungen mit dem Fach Geschichte genannt. Am Schnittpunkt zwischen Astronomie, Geschichte und Kunst stehen etwa Betrachtungen mittelalterlicher Herrschaftsinsignien (siehe Skarits [2011]), während archäologische Ausgrabungen eine Vielzahl steinzeitlicher Anlagen freigelegt haben, die oftmals eine Ausrichtung nach astronomischen Gesichtspunkten erkennen lassen (Meinike [2013]).

Die genannten Beispiele zeigen auf, wie es gelingen kann, fächerverbindenden Unterricht unter Beibehaltung der fachspezifischen Strukturen und Methoden oder auch fächerübergreifenden Unterricht unter Auflösung der traditionellen Schulfächer zu praktizieren, wie es etwa von Richter [2000] gefordert wird. Die Astronomie bietet hierzu reichhaltige und tiefgreifende Themen, die gleichzeitig die Lebenswelt der Schüler betreffen und daher als Unterrichtsthemen besonders geeignet sind. Damit wird auch dem exemplarischen Prinzip im Sinne Wagenscheins genüge getan und gleichermaßen die neuere Scientific Literacy berücksichtigt, die neben der Behandlung der wissenschaftlichen Methodik an ausgewählten Beispielen auch ein genügend großes Orientierungswissen fordert (vgl. Dubs [2002]).

2.2.2 Interesse und Motivation

Die oftmals vorgebrachten Argumente für die Einbindung astronomischer Inhalte in den Physikunterricht werden u.a. 2003 vom Rat deutscher Sternwarten folgendermaßen formuliert:

„Astronomie ist sehr populär; das Fach zählt mit zu den Zugpferden, welche junge Menschen für das Studium der Physik begeistern. Die Faszination naturwissenschaftlicher Forschung lässt sich durch die Astronomie besonders eindrucksvoll demonstrieren, auch weil die Fragen nach dem Ursprung und der Entwicklung des Universums einen zentralen Aspekt unseres Weltbildes darstellen.“ (zitiert nach Lindner [2005, S. 4])

Betrachtet man entgegen das Interesse am Schulfach Physik zeigt sich, dass für Jungen das Fach nur etwa im Mittelfeld rangiert. Für Mädchen jedoch nimmt das Schulfach Physik für die überwiegende Mehrheit (61,3%) die Rolle eines herausragend unbeliebten Faches ein. [Muckenfuss, 1995, S. 77]

Ein Blick auf das Fachinteresse über die Jahrgangsstufen 5 bis 10 hinweg zeigt, dass das Interesse bei den Jungen keiner signifikanten Änderung unterworfen ist. Bei den Schülerinnen zeigt sich jedoch ein deutlicher Abfall des Interesses im Laufe der Schulzeit (Abb. 2.3).

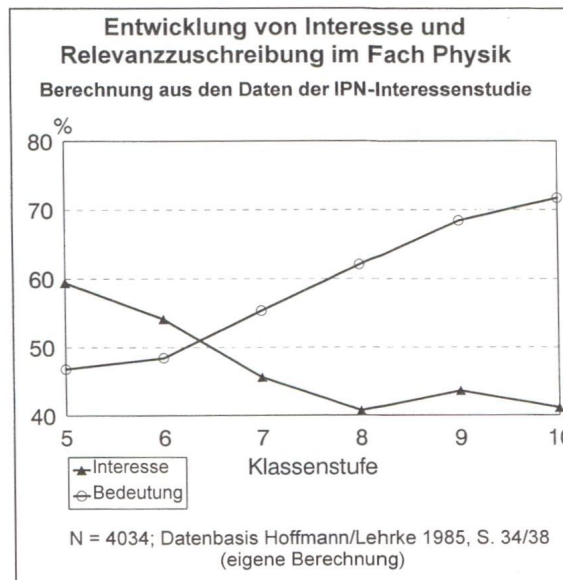


Abbildung 2.3: Interesse an sowie Einschätzung der Bedeutung von Physik im Lauf der Schulzeit (Quelle: Muckenfuss [1995, S. 84]).

Durch die Auswahl von geeigneten Kontexten aus verschiedenen Bereichen des Alltags, kann jedoch eine Steigerung des Interesses des Schülers am Fach Physik erzielt werden. [Müller, 2006]

Holstermann und Bögeholz [2007] stellen die Interessenlage im Bereich naturwissenschaftlicher Themen detailliert und im internationalen Vergleich dar. Im folgenden werden vornehmlich solche Kontexte betrachtet, bei denen ein astronomischer Bezug vorhanden ist. Abb. 2.4 zeigt den Vergleich mit weiteren naturwissenschaftlichen Kontexten.

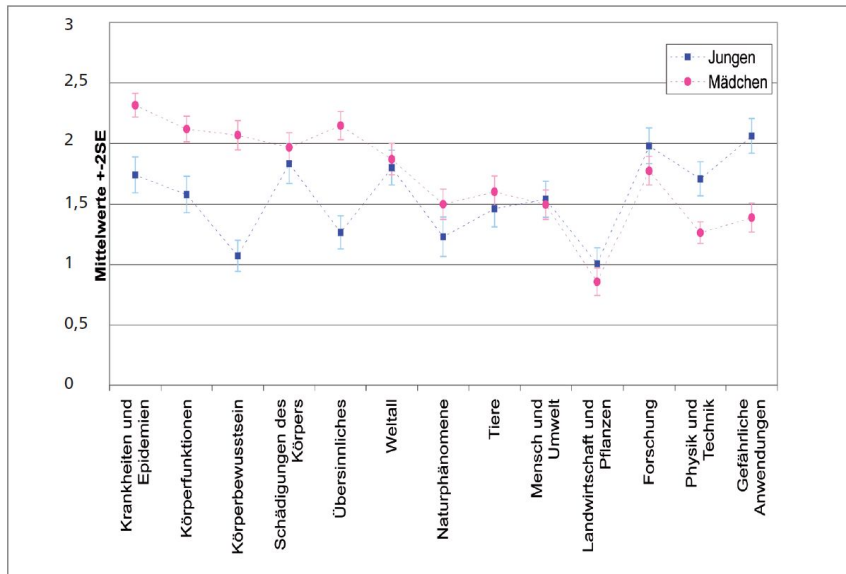


Abbildung 2.4: Interesse von Mädchen und Jungen an verschiedenen naturwissenschaftlichen Kontexten – aus Daten der ROSE-Studie, 0 = nicht interessant, 3 = sehr interessant (Quelle: Holstermann und Bögeholz [2007, S. 75]).

Das Thema „Weltall“ ist eines der wenigen Gebiete, bei welchem sich die Interessen von Schülerinnen und Schülern einander annähern und gleichzeitig ein relativ hohes Gesamtinteresse festzustellen ist. Auch beim Themengebiet „Forschung“ divergiert die Interessenslage zwischen den Geschlechtern nur wenig, während das Interesse auf hohem Niveau liegt. Innerhalb der zehn interessantesten Themen für Schülerinnen finden sich zwei Kontexte mit astronomischem Bezug bzw. solche welche astronomische Inhalte aufnehmen können. Dies betrifft die Frage nach der Schwerelosigkeit sowie nach bislang ungeklärten Naturphänomenen. Bei den Schülern trifft der direkte oder indirekte Bezug auf fünf Kontexte innerhalb der zehn beliebtesten zu (Holstermann und Bögeholz [2007, S. 77]):

- Wie sich Schwerelosigkeit anfühlt,
- die neusten Erfindungen und Entdeckungen in Naturwissenschaft und Technik,
- Phänomene, die Wissenschaftler noch immer nicht erklären können,
- Erfindungen und Entdeckungen, die die Welt verändert haben sowie
- Schwarze Löcher, Supernovae und andere spektakuläre Phänomene im Weltall.

Die Themen Raketen und Raumfahrt scheinen stark mit dem Bereich Technik assoziiert, für den übereinstimmend ein geringes Interesse seitens Schülerinnen berichtet wird.¹³

¹³Das Ergebnis hinsichtlich des hohen Interesses von Schülerinnen am Thema Weltall widerspricht früheren Untersuchungen. Der Widerspruch wird jedoch durch unterschiedliche Inhalte innerhalb des Konstruktes

Es ist bekannt, dass der Kontext schulischer Aufgaben das Interesse der Lernenden beeinflusst. Werden nun solche Kontexte für den Schulunterricht ausgewählt, die für Mädchen und Jungen gleichermaßen interessant sind, kann die eingangs dargestellte Kluft im Interesse am Fach Physik verkleinert werden. Dies könnte etwa durch Lernen anhand von authentischen Kontexten geschehen, wie sie die Astronomie bzw. Astrophysik reichlich bieten. Hier ist Unterricht abseits der üblichen Fachsystematik möglich, wobei die gesamte Breite des Faches bei der Problemlösung zum Tragen kommt, was wiederum durch Wiederholung und Anwendung des Wissens dem langfristigen Behalten zu Gute kommt. Auch hier ist der stark fächerübergreifende Charakter der Astronomie zu betonen (siehe Kapitel 2.2.1), welcher als motivationsfördernd angesehen wird. [Müller, 2006, S. 11]

Die Astronomie kann dabei, durch ihre speziellen Untersuchungsgegenstände und Methoden der Erkenntnisgewinnung, ein Gegengewicht zum überwiegend technisch ausgerichteten Physikunterricht bieten. Eigene Beobachtungen und die Ansichten kosmischer Objekte und Phänomene in den modernen Medien, können eine fruchtbare emotionale Aufgeschlossenheit schaffen, die sich schließlich auch für den Physikunterricht nutzen lässt (vgl. Lindner [2005, S. 5]).

Weltall erklärt, die sich bei früheren Untersuchungen auf Raketen und Raumfahrt beschränkten und nun Supernovae, Sterne sowie ungelöste Geheimnisse des Weltalls beinhaltet (Holstermann und Bögeholz [2007, S. 80]).

3 Auswahl astronomischer Themen

3.1 Themenfelder der astronomischen Bildung

Zum Zwecke der leichteren Orientierung sollen die Inhalte der astronomischen Bildung für diese Arbeit in Themenfelder untergliedert werden. Die Einteilung erfolgt dabei in Anlehnung an die lange und gut erprobte Herangehensweise der Behandlung astronomischer Themen. Sie eignet sich immer dann besonders gut, wenn nicht Spezialwissen, sondern die Astronomie als Ganzes im Fokus der Betrachtung steht. Man hat sich dabei stets die Frage zu stellen, wie die einzelnen Themen so abgebildet werden können, ohne dabei einerseits die Fachsystematik zu verletzen und andererseits ein verständliches und zusammenhangsgemäßes Erklären zu ermöglichen.

Die Beachtung der Fachsystematik meint hier die Einhaltung einer logischen Abfolge der Themen, die eine Erarbeitung komplexerer Inhalte möglich macht. So ist etwa die Behandlung von Supernovae nur sinnvoll, wenn der Aufbau von Sternen bekannt ist und Kernreaktionen bereits behandelt wurden.

Daher wird für diese Arbeit eine Einteilung in fünf Themenfelder vorgenommen, die gewählte Einteilung ist dabei nicht in allen Fällen vollkommen überschneidungsfrei.¹⁴ Im Folgenden sollen die Themenfelder definiert, mit einigen ausgewählten Beispielen unterlegt und ihre Bedeutung im Rahmen dieser Arbeit erläutert werden.

Die Ergebnisse des folgenden Kapitels werden in die Modellentwicklung einbezogen und daher in Kapitel 6 wieder aufgegriffen.

3.1.1 Instrumente, Methoden und Beobachtungen

Das Themenfeld „Instrumente, Methoden und Beobachtungen“ umfasst die Grundlagen für die Erkenntnisgewinnung in der Astronomie. Die systematische Beobachtung entferntere Objekte, die i.d.R. einem direkten Zugriff unzugänglich sind, ist die spezifische Methode der Astronomie, wodurch sie sich von anderen Wissenschaften – etwa der Physik – abgrenzt und selbst zu einer wissenschaftlichen Disziplin wird. Dazu bedient sie sich, neben der freiäugigen Beobachtung die seit Jahrtausenden praktiziert wird, verschiedener spezieller Instrumente, die die Beobachtungen unterstützen, vereinfachen oder überhaupt erst möglich machen.

¹⁴Überschneidungsfreiheit ist im Hinblick auf die mannigfaltigen Querbezüge innerhalb des Faches sicherlich weder zu erreichen noch wird sie vom Autor als erstrebenswert angesehen.

So ist der Meridiankreis ein spezifisch astronomisches Instrument, wie auch das Teleskop – insbesondere dann, wenn sein Lichtsammelvermögen im Vordergrund steht. Die Instrumente ermöglichen die Erforschung der Welt außerhalb der Erdatmosphäre, die anderen Wissenschaften verborgen bleibt.

Die Beobachtung, die quasi als typische Erkenntnismethode die Eigenständigkeit der Astronomie als Fachdisziplin begründet, ist gleichzeitig im Rahmen dieser Arbeit dasjenige Element, welches es durch tastbare Modelle zu ersetzen gilt, da sie der ins Auge gefassten Zielgruppe nicht zugänglich ist.

Instrumente, Methoden Beobachtungen:

Das Themenfeld umfasst die Beobachtung als die spezifische Erkenntnismethode der Astronomie sowie die Instrumente, die diese Form der Erkenntnisgewinnung unterstützen.

3.1.2 Bewegungen und Jahreszeiten

Bewegungen sind ein zentrales Element innerhalb astronomischer Beobachtungen. Alle Objekte sind stets in Bewegung, getrieben von der Gravitationskraft. Ihre Bewegung stabilisiert die Objekte auf bestimmten Bahnen und schafft Strukturen. Bewegungen sind ferner die Grundlage für die periodisch wiederkehrenden Ereignisse, die dem Menschen seit jeher eine Orientierung im Fluss der Zeit ermöglichten, ihn aber auch vor Rätsel – wie etwa Finsternisse – stellten, die zur systematischen Beobachtung anregten.

Innerhalb des Themenbereichs der Bewegungen kommen den Jahreszeiten, als dem sichtbarsten Zeichen der Bewegung der Erde um die Sonne, besondere Bedeutung zu. Ebenso wichtig sind die Bewegungsabläufe der Planeten und Kleinkörper um die Sonne, da sie den Aufbau des Sonnensystems determinieren.

Bewegungen und Jahreszeiten:

Das Themenfeld umfasst alle Bewegungen die zu periodischen Erscheinungen führen oder Elemente der Strukturbildung sind.

3.1.3 Bestandteile, Objekte und Modelle

Unter Bestandteilen und Objekten werden alle Objekte subsumiert, die als Einzelobjekte angesehen werden können, d.h. sie lassen sich nicht in weitere Objekte unterteilen. Dies sind etwa Kleinkörper, Planeten und Sterne. Sterne stellen dabei gleichzeitig die Obergrenze der Klasse der Objekte dar. Eine Galaxie etwa kann zwar als ein eigenständiges Objekt angesehen werden, sie ist jedoch wiederum aus kleineren Objekten aufgebaut und stellt damit bereits eine Struktur dar. So wird auch das Sonnensystem nicht als Objekt angesehen, da seine Bestandteile wiederum Objekte, im hier genutzten Sinn, darstellen. Da der Astronomie der direkte Zugang zu ihren Untersuchungsobjekten verwehrt bleibt und ihre wahre

Natur damit oft unklar ist, bedient sie sich der theoriegeleiteten Modellbildung. Zu verstehen, dass unsere Beschreibungen von Planeten und Sternen auf Modellen fußen und die Realität nicht vollumfänglich und exakt abbilden, kann den Lernenden die Arbeitsweise der modernen Naturwissenschaften näherbringen. Ebenso bietet die Nutzung von Tastmodellen, die Zusammenhänge stark vereinfacht darstellen, einen Anknüpfungspunkt, um auch auf die Nutzungsweisen und Einschränkungen physikalisch-astronomischer Modelle in der Forschung hinzuweisen.

Bestandteile, Objekte und Modelle:

Bestandteile und Objekte sind diejenigen Grundbausteine des Weltalls, die selbst nicht weiter in Einzelobjekte zerlegbar sind. Die Komplexen unter ihnen werden durch Modelle beschrieben, die aus Theorien abgeleitet wurden.

3.1.4 Strukturen und Anordnungen

Hierarchisch gesehen oberhalb der Bestandteile und Objekte, findet sich die Kategorie der Strukturen und Anordnungen. Sie fügen sich i.d.R. unter dem Einfluss der Gravitation – als dominierende Kraft auf großen Entfernungen – aus Objekten zusammen. Ihre Stabilität wird ihnen durch die Bewegung ihrer Bestandteile verliehen. Ein Beispiel ist etwa unser Planetensystem. Strukturen können jedoch auch selbst wiederum Bestandteil einer größeren Struktur sein. So ist das Sonnensystem Teil der Milchstraße, die selbst als Struktur anzusehen ist, jedoch wiederum Teil einer ganzen Galaxiengruppe ist.¹⁵

Strukturen formen nicht nur das Weltall um uns herum, sondern finden auch Ausdruck in der Herangehensweise des Menschen an die Astronomie selbst. So gliedern Strukturen die Fachsystematik der Astronomie ebenso wie sie sich in den Lehrplänen wiederfinden. Die schulische Behandlung beginnt häufig mit der Struktur des Sonnensystems und wandert hinaus in den Bereich der Galaxien, bis hin zu den Superhaufen als größten bekannten Strukturen des Kosmos.

Strukturen und Anordnungen:

Strukturen und Anordnungen werden aus Objekten gebildet und zeichnen sich durch ihre relative Stabilität über größere Zeiträume¹⁶ aus. Sie bilden sich unter dem Einfluss der Gravitation und werden durch Bewegung stabilisiert.

3.1.5 Entwicklung

Das Themenfeld „Entwicklung“ umfasst alle Aspekte der zeitliche Änderung der Beschaffenheit von Objekten und Strukturen. Dieser Rubrik kommt im Zusammenhang mit dem

¹⁵An dieser Stelle zeigt sich eindrucklich der Übergang von einer Kategorie zur nächsten, während man den Blick von den kleinen zu den größeren Strukturen wandern lässt.

¹⁶Mit Zeiträumen sind hier nicht astronomische, sondern solche gemeint, die von einem einzelnen Menschen überblickt werden können.

typischen Physikunterricht eine besondere Bedeutung zu. So betrachtet die Physik ihre Untersuchungsobjekte oft statisch. Sie sind existent, erfahren im Laufe der Zeit jedoch keinen Entwicklungsprozess (vgl. Schwarz [2010]).

Zwar ist der Astronomie eine Untersuchung von Prozessen in den allermeisten Fällen direkt nicht möglich, jedoch erlaubt die Fülle von Objekten in unterschiedlichsten Entfernungen den Vergleich verschiedener Entwicklungszustände und damit Rückschlüsse auf die durchlaufenen Entwicklungswege. Ein extremes Beispiel ist hier der Vergleich von Entwicklungszuständen von Galaxien oder Galaxienhaufen. Der betrachtete Zeitraum kann hier einige Milliarden Jahre umfassen und betrifft die großräumigsten Strukturen im Universum. Aber auch die Entstehung und Entwicklung von Planeten, als Objekte die der Erfahrung des Menschen deutlich näher sind, wird auf diese Weise behandelt. So lassen sich etwa Venus, Erde und Mars mit ihren heutigen Umgebungsbedingungen vergleichen und die Gründe für die höchst unterschiedliche Entwicklung, dieser sonst recht ähnlichen Planeten, untersuchen.

Die Bedeutung für das Weltbild der Lernenden ergibt sich nun aus der Erkenntnis daraus, dass es sich auch bei der Erde keineswegs um ein vollkommen statisches Objekt handelt, sondern dass sie entstanden ist, sich entwickelte und sich auch weiterhin entwickeln wird. Dabei rückt auch der Einfluss des Menschen in den Fokus, der den weiteren Entwicklungsprozess mitbestimmt.

Entwicklung:

Die Kategorie Entwicklung umfasst alle Prozesse, die eine nicht periodische Änderung von Struktur oder Beschaffenheit von Objekten oder Anordnungen im zeitlichen Verlauf bewirken.

3.2 Lehrplananalyse

Um aus der – insbesondere in den letzten Jahrzehnten – stark gestiegenen Stoffmenge innerhalb der Astronomie diejenigen Inhalte auszuwählen, welchen eine besondere schulische Relevanz zukommt, wird eine Analyse von Schullehrplänen vorgenommen.

Mit der Analyse der Lehrpläne kann nicht direkt auf die tatsächlich behandelten Inhalte im Unterricht zurückgeschlossen werden. Jedoch nehmen Lehrpläne eine gewisse Steuerungsfunktion wahr, weshalb sie wertvolle Einblicke in Schwerpunkte schulischer Arbeit geben können.

3.2.1 Untersuchte Lehrpläne

Für die Analyse wurden sieben Lehrpläne¹⁷ aus den Bundesländern Thüringen, Sachsen-Anhalt, Sachsen sowie Mecklenburg-Vorpommern herangezogen. Dabei wurde mit dem Lehrplan für Thüringer Gymnasien von 1999 ein Lehrplan einbezogen, der zum Untersuchungszeitpunkt Mitte 2011 bereits außer Kraft getreten war. Auch sind mit den Lehrplänen von Sachsen-Anhalt zwei Dokumente untersucht worden, die sich noch in der Erprobungsphase befanden. Da bei der Weiterentwicklung von Lehrplänen gewöhnlich die fachlichen Inhalte nur kleineren Änderungen unterzogen werden, ist jedoch nicht davon auszugehen, dass durch den Wechsel der Lehrpläne erhebliche Unterschiede bei den behandelten Themen zu Tage treten.

Um einen Vergleich neuer kompetenzorientierter Lehrpläne mit den Vorgängerversionen zu ermöglichen, wird auch der Lehrplan des Landes Thüringen aus dem Jahr 1999 analysiert. Es ist davon auszugehen, dass einige Inhalte die in der verkürzten Darstellung des Nachfolgers nicht mehr explizit genannt werden, weiterhin im Unterricht behandelt werden. Die Einbeziehung des außer Kraft getretenen Lehrplanes soll so ein realistischeres Bild des tatsächlichen inhaltlichen Spektrums liefern.

3.2.2 Methodik

Bei der inhaltlichen Analyse der Lehrpläne wird auf ein Verfahren zurückgegriffen, welches sich an der strukturierten Inhaltsanalyse (im folgenden mit StIA abgekürzt) orientiert. Bild 3.1 zeigt die vereinfachte Struktur der verwendeten Analysemethode nach Mayring [2010, S. 92ff.]. Im Rahmen dieser Analyse wird auf weitergehende quantitative Auswertungen

¹⁷Thüringer Kultusministerium [2009]
Thüringer Kultusministerium [1999a]
Thüringer Kultusministerium [1999b]
Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt [2003]
Kultusministerium Sachsen-Anhalt [2009]
Sächsisches Staatsministerium für Kultus [2004]
Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern [2004]

Tabelle 3.1: Für die Lehrplananalyse herangezogene Lehrpläne (Stand 2011).

Bundesland	Schulform	Jahr	Bemerkung
Thüringen	Gymnasium	2009 ¹⁸	
Thüringen	Gymnasium	1999	außer Kraft
Thüringen	Regelschule	1999	
Sachsen-Anhalt	Gymnasium	2003	
Sachsen-Anhalt	Sekundarschule	2009	Erprobungsfassung
Sachsen	Gymnasium	2004	
Mecklenburg-Vorpommern	alle Schulformen	2004	

verzichtet. Dies bedeutet u.a., dass einer einmaligen Nennung der gleiche Stellenwert wie einer ausführlichen Behandlung zukommt.

Nachfolgend soll die jeweilige Umsetzung der einzelnen Schritte der strukturierten Inhaltsanalyse kurz dargestellt werden.

Bestimmung der Analyseeinheit (1. Schritt der StIA)

Als Kodiereinheit wird das Vorkommen eines astronomischen Begriffes definiert. Dabei ist eindeutig auch ein Vorkommen als reines Stichwort – außerhalb des Fließtextes – als Fundstelle zu werten. Erläuternde Hinweise werden nicht als eigene Fundstelle gewertet. Sie dienen lediglich der weiteren Zuordnung zu den Themenfeldern (siehe Schritt 4 der StIA).

Da auf eine quantitative Auswertung verzichtet wird, ist die Länge der Kontexteinheit für die Auswertung nicht relevant. Auf eine Aufspaltung der Einheiten, ab einer bestimmten Länge, kann daher verzichtet werden. Damit endet eine Kontexteinheit mit dem Auftreten des nächsten astronomischen Begriffes, sofern auf diesen nicht lediglich verwiesen wird. Die Auswertung aller Lehrpläne erfolgt ohne das eine besondere Reihenfolge eingehalten wird.

Zusammenstellung des Kategoriensystems (2. und 3. Schritt der StIA)

Bei der vorliegenden Analyse sollen verschiedene Lehrpläne daraufhin untersucht werden, welche inhaltlich-thematischen Schwerpunkte in ihnen vorkommen. Daher wird das Verfahren der inhaltlichen Strukturierung (Strukturdimension) gewählt.

Die einzelnen Fundstellen werden wie folgt eingeteilt und bezeichnet:

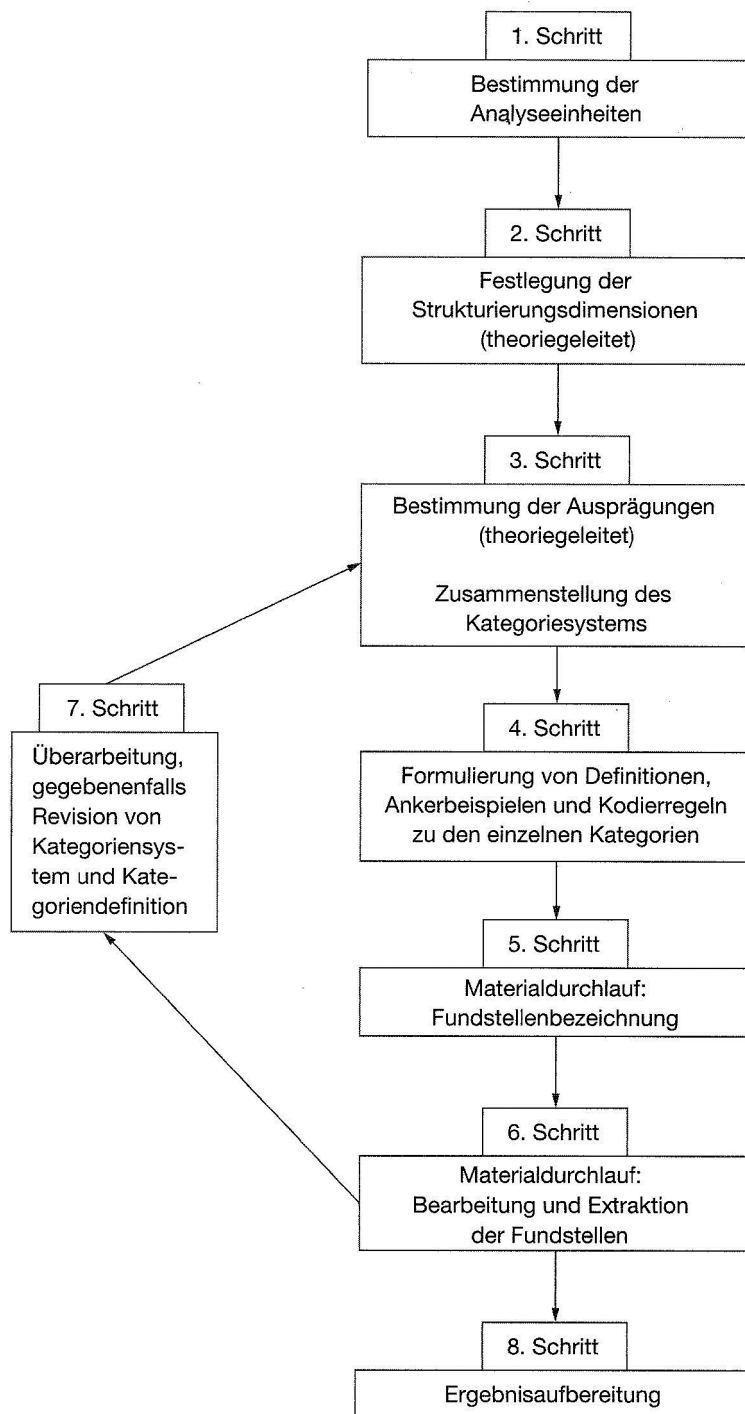


Abbildung 3.1: Schema der strukturierten Inhaltsanalyse (Quelle: Mayring [2010]).

1. Bundesland

- Thüringen (T)
- Sachsen-Anhalt (SA)
- Sachsen (S)
- Mecklenburg-Vorpommern (MV)
- Bayern (B)

2. Schulform

- Gymnasium (G)
- Sekundar- und Regelschule (R)

3. Themenfeld

- Instrumente, Methoden und Beobachtungen (M)
- Bewegungen und Jahreszeiten (B)
- Bestandteile, Objekte und Modelle (O)
- Strukturen und Anordnungen (S)
- Entwicklung (E)
- ohne Zuordnung (oZ)

Die Zuweisung einer Fundstelle vom Themenfeld „ohne Zuordnung“ bedeutet dabei keinesfalls eine Abwertung der betreffenden Fundstelle, sondern zeigt lediglich, dass sich diese spezielle Fundstelle nicht in das klassische Raster der astronomischen Themenfelder einfügen lässt. Darunter fallen jedoch auch besonders bedeutende Aspekte, wie die Herausbildung eines astronomischen Weltbildes. Es sei daran erinnert, dass dieser Themenbereich in der vorliegenden Arbeit von großer Bedeutung ist. Entsprechend muss auch denjenigen Fundstellen, welche dieser vermeintlichen Restkategorie zugeteilt wurden, die gleiche Aufmerksamkeit zukommen.

Formulierung von Definitionen, Ankerbeispielen und Kodiereregeln (4. Schritt der StIA)

Die Zuordnung der Lehrpläne zu den Bundesländern ist eindeutig. Ebenso die Zuteilung zu den Schulformen, mit Ausnahme von Mecklenburg-Vorpommern, wo der Lehrplan Astronomie Anwendung auf alle Schulformen findet. Da im Rahmen dieser Analyse jedoch keine Differenzierung nach Schulformen vorgenommen wird, hat die Angabe der Schulform überwiegend informellen Charakter. Gleiches gilt für die Unterscheidung zwischen Pflicht- und Wahlpflichtunterricht. Die Zuteilung der aufgefundenen Inhalte erfolgt zu den Inhaltsfeldern, wie sie im Kapitel 3.1 definiert wurden. Weist eine Kodiereinheit Übereinstimmungen mit mehr als einem Inhaltsfeld auf, so wird dieses gewählt, dem die Kodiereinheit überwiegend entspricht. Werden zwei oder mehr Inhaltsfelder in gleichem Maße angesprochen, so wird die Kodiereinheit für alle Inhaltsfelder als eigenes Vorkommnis gewertet.

Materialdurchlauf (5. und 6. Schritt der StIA)

Die Bezeichnung der Fundstellen leitet sich aus dem 2. und 3. Schritt der Inhaltsanalyse ab. Die Fundstellen sind innerhalb der Lehrpläne und ihrer jeweiligen Themenfelder durchnummeriert, die Nummerierung muss dabei nicht der Reihenfolge des Auftretens im Lehrplan entsprechen. Die verschiedenen Lehrpläne für das Gymnasium des Landes Thüringen sind zusätzlich durch die angehängte Jahreszahl (09, 99) zu unterscheiden. Die Fundstelle SA.R.O.15 ist demnach wie folgt zu lesen: 15. Fundstelle des Themenfeldes Bestandteile, Objekte und Modelle im Lehrplan für Regelschulen des Landes Sachsen-Anhalt.

Auszugsweise seien an dieser Stelle (3.2) die Anzahl der Fundstellen pro Lehrplan und Inhaltsfeld dargestellt. Die vollständigen Fundstellennachweise finden sich im Anhang A.1.

Auffällig ist die große Anzahl von Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen. Bezüglich der Themenfelder weist der Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen eine starke Orientierung zum Themenfeld Methoden auf (42% aller Fundstellen). Auch die Anzahl Fundstellen, die nicht zugeordnet werden können, ist mit 38% sehr hoch. Eine ähnliche Häufung, von nicht zuordnungsfähigen Inhalten, zeigt sich auch bei den Lehrplänen des Landes Sachsen-Anhalt für die Sekundarschule (24%) und für Gymnasien (19%).

Tabelle 3.2: Anzahl der Fundstellen nach Lehrplan und Inhaltsfeld.

Inhaltsfeld	Anzahl der Fundstellen	Anteil am Lehrplan
Thüringen – Gymnasium 2009		
Methoden	27	42 %
Bewegungen	5	8 %
Objekte	5	8 %
Strukturen	2	3 %
Entwicklung	1	2 %
ohne Zuordnung	24	38 %
Summe	64	
Thüringen – Gymnasium 1999		
Methoden	12	21 %
Bewegungen	14	24 %
Objekte	21	36 %
Strukturen	3	5 %
Entwicklung	5	9 %
ohne Zuordnung	3	5 %
Summe	58	
Thüringen – Regelschule		
Methoden	10	20 %
Bewegungen	13	26 %
Objekte	18	36 %
Strukturen	4	8 %
Entwicklung	3	6 %
ohne Zuordnung	2	4 %
Summe	50	
Sachsen-Anhalt – Sekundarschule		
Methoden	12	18 %
Bewegungen	11	16 %
Objekte	15	22 %
Strukturen	8	12 %
Entwicklung	5	7 %
ohne Zuordnung	16	24 %
Summe	67	

Anzahl der Fundstellen nach Lehrplan und Inhaltsfeld. – Fortsetzung

Inhaltsfeld	Anzahl der Fundstellen	Anteil am Lehrplan
Sachsen-Anhalt – Gymnasium		
Methoden	23	14 %
Bewegungen	22	14 %
Objekte	51	31 %
Strukturen	21	13 %
Entwicklung	15	9 %
ohne Zuordnung	30	19 %
Summe	162	
Sachsen – Gymnasium		
Methoden	8	25 %
Bewegungen	4	13 %
Objekte	8	25 %
Strukturen	4	13 %
Entwicklung	5	16 %
ohne Zuordnung	3	9 %
Summe	32	
Mecklenburg-Vorpommern – alle Schulformen		
Methoden	18	29 %
Bewegungen	10	16 %
Objekte	17	27 %
Strukturen	8	13 %
Entwicklung	6	10 %
ohne Zuordnung	4	6 %
Summe	63	

Revision des Kategoriensystems (7. Schritt der StIA)

Da sich das aufgestellte Kategoriensystem als zweckmäßig erwiesen hat, ist eine Anpassung an dieser Stelle nicht notwendig.

Ergebnisaufbereitung (8. Schritt der StIA)

Nach dem erfolgten Materialdurchlauf zur Fundstellenbezeichnung wird pro Inhaltsfeld und Lehrplan zunächst eine erste Komprimierung vorgenommen. Ziel ist es dabei, mehrfach vorkommende Inhalte zusammenzufassen. Mehrfache Inhalte finden sich insbesondere dann,

wenn ein Lehrplan gleichzeitig den Pflicht- wie auch den Wahlpflichtbereich eines Faches abdeckt. Die Anzahl der Fundstellen pro Lehrplan und Inhaltsfeld nach der Komprimierung ist in Tabelle 3.3 dargestellt. Der ausführliche Fundstellennachweis findet sich in Anhang A.2.

Der stärkste Rückgang bei der Anzahl der individuellen Fundstellen zeigt sich beim Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (109 von ehemals 162 Fundstellen). Weitere Auffälligkeiten ergeben sich an dieser Stelle nicht.

Tabelle 3.3: Anzahl der Fundstellen nach Lehrplan und Inhaltsfeld nach der Komprimierung.

Inhaltsfeld	Anzahl der Fundstellen	Anteil am Lehrplan
Thüringen – Gymnasium 2009		
Methoden	24	39 %
Bewegungen	5	8 %
Objekte	5	8 %
Strukturen	3	5 %
Entwicklung	1	2 %
ohne Zuordnung	24	39 %
Summe	62	
Thüringen – Gymnasium 1999		
Methoden	12	21 %
Bewegungen	14	24 %
Objekte	21	36 %
Strukturen	3	5 %
Entwicklung	5	9 %
ohne Zuordnung	3	5 %
Summe	58	
Thüringen – Regelschule		
Methoden	9	18 %
Bewegungen	13	27 %
Objekte	18	37 %
Strukturen	4	8 %
Entwicklung	3	6 %
ohne Zuordnung	2	4 %
Summe	49	

Anzahl der Fundstellen nach Lehrplan und Inhaltsfeld nach der Komprimierung. – **Fortsetzung**

Inhaltsfeld	Anzahl der Fundstellen	Anteil am Lehrplan
Sachsen-Anhalt – Sekundarschule		
Methoden	11	21 %
Bewegungen	9	17 %
Objekte	11	21 %
Strukturen	6	11 %
Entwicklung	3	6 %
ohne Zuordnung	13	25 %
Summe	53	
Sachsen-Anhalt – Gymnasium		
Methoden	15	14 %
Bewegungen	18	17 %
Objekte	29	27 %
Strukturen	15	14 %
Entwicklung	11	10 %
ohne Zuordnung	21	19 %
Summe	109	
Sachsen – Gymnasium		
Methoden	6	21 %
Bewegungen	4	14 %
Objekte	8	28 %
Strukturen	4	14 %
Entwicklung	4	14 %
ohne Zuordnung	3	10 %
Summe	29	
Mecklenburg-Vorpommern – alle Schulformen		
Methoden	15	27 %
Bewegungen	10	18 %
Objekte	14	25 %
Strukturen	8	14 %
Entwicklung	5	9 %
ohne Zuordnung	4	7 %
Summe	56	

Nach der Reduktion der Lehrpläne folgt die endgültige Auswertung. Dazu werden die Fundstellen in einer Zusammenschau analysiert. Dies geschieht gegebenenfalls unter Bildung von

Oberbegriffen bzw. Verallgemeinerungen, wenn ähnliche Inhalte zusammengefügt werden, die sich in ihrer Beschreibung aber nicht in ihrem tatsächlichen Inhalt unterscheiden. Die Tabellen mit den vollständigen Fundstellennachweisen finden sich in Anhang A.3.

Für die weitere Auswertung sind diejenigen Inhalte relevant, die in einem signifikanten Anteil aller Lehrpläne vorkommen. Entsprechend sollen in der folgenden Auswertung nur solche Inhalte betrachtet werden, die in mehr als 50% der Lehrpläne, d.h. in vier Lehrplänen oder mehr vorkommen.

3.2.3 Schnittmenge der Lehrpläne

Die auf die geschilderte Weise gewonnenen Fundstellen repräsentieren die wichtigsten Inhalte der Lehrpläne zum Fach Astronomie. Diese Schnittmenge aus sieben Lehrplänen soll nun, nach Themenfeldern sortiert, wiedergegeben werden.

Instrumente, Methoden und Beobachtungen

Im Themenfeld „Instrumente, Methoden und Beobachtungen“ werden insgesamt acht Inhalte von mehr als vier Lehrplänen genannt. Hervor tritt dabei der inhaltliche Bereich der optischen Beobachtungsinstrumente, was ihren Aufbau, Einsatz, Vergleich und ihre Abbildungsfehler mit einschließt. Dieses Thema wird in allen sieben Lehrplänen aufgegriffen, was ihn auch in der Gesamtbetrachtung über alle Inhaltsfelder hinweg einzigartig macht.

Ein weiterer Inhalt mit einer sehr hohen Anzahl von Nennungen in den Lehrplänen ist die Vorbereitung, Durchführung und Protokollierung von eigenen Beobachtungen mit insgesamt sechsmaligem Vorkommen. Dies ist in sofern wenig verwunderlich, als dass hierbei die wesentliche Erkenntnismethode der Astronomie behandelt wird.

Die Inhalte mit vier oder mehr Nennungen sind (mit der Angabe der Anzahl des Vorkommens):

- Optische Teleskope (7)
- Beobachtungen (vorbereiten, durchführen und protokollieren) (6)
- Gegenstandsbestimmung der Astronomie (5)
- Scheinbare Himmelskugel und Horizontsystem (5)
- Etappen der Entwicklung der Astronomie (4)
- Nichtoptische Astronomie (4)
- Das elektromagnetische Spektrum (4)
- Sternbilder (4)

Bewegungen und Jahreszeiten

Das Themenfeld „Bewegungen und Jahreszeiten“ weist insgesamt 12 Inhalte auf, die in den Lehrplänen viermal oder häufiger genannt werden. Besonders hervor treten hier die grundlegenden physikalischen Gesetze, die für die Bewegungen astronomischer Objekte und die Bildung von Strukturen grundlegend sind – die Keplerschen Gesetze und das Gravitationsgesetz. Die häufigsten Inhalte dieses Themenfeldes sind:

- Keplersche Gesetze (6)
- Gravitationsgesetz (6)
- Rotation der Erde (5)
- Revolution der Erde (5)
- Scheinbare und wahre Bewegung des Mondes (5)
- Mondphasen (5)
- Finsternisse (5)
- Scheinbare Bewegung der Planeten (5)
- Wahre Bewegung der Planeten (5)
- Bedeutung der Zeitmessung und Entstehung des Kalenders (4)
- Gebundene Rotation des Mondes (4)
- Gezeiten (4)

Bestandteile, Objekte und Modelle

In diesem Inhaltsfeld wurden insgesamt 15 Themen identifiziert, die in mehr als vier Lehrplänen vorkommen. Sechs Nennungen entfallen auf die Inhalte zur Einteilung der Planeten (in terrestrische und jupiterartige), zu deren Oberflächen und Atmosphären, zu solar-terrestrischen Beziehungen sowie zur Energiefreisetzung in der Sonne durch Kernfusion. Die ausgewählten Inhalte dieses Themenfeldes sind:

- Einteilung der Planeten (erd- und jupiterartige) (6)
- Oberflächenformen und Atmosphären der Planeten (6)
- Solar-terrestrische Beziehungen (6)
- Energiefreisetzung durch Kernfusion (6)
- Physikalische Daten des Mondes (5)
- Oberflächenformen des Mondes (5)

- Aufbau der Sonne (5)
- Sonnenaktivität (5)
- Physikalische Eigenschaften der Planeten (4)
- Satelliten anderer Planeten (4)
- Kleinkörper im Sonnensystem (4)
- Energietransport (der Sonne) (4)
- Aus Farben und Spektren hergeleitete Eigenschaften von Himmelskörpern (4)
- Zustandsgrößen der Sterne (4)
- HRD als Zustandsdiagramm (4)

Strukturen und Anordnungen

Das Inhaltsfeld „Strukturen und Anordnungen“ umfasst vier Themen, deren Auftreten eine signifikante Häufung aufweist. Insbesondere die Behandlung der Struktur des Sonnen- und Milchstraßensystems wird in jeweils sechs Lehrplänen häufig gefordert.

- Struktur des Sonnensystems (6)
- Das Milchstraßensystem (6)
- Andere Galaxien (4)
- Scheinbare Helligkeit (als Entfernungsmaß) (4)

Entwicklung

Die Fundstellen zum Themenfeld „Entwicklung“ konnten insgesamt auf nur acht Inhalte reduziert werden. Es weist damit von allen Inhaltsfeldern die geringste Zahl individueller Inhalte auf. Von diesen acht Inhalten werden nur drei Inhalte in vier oder mehr Lehrplänen benannt. Dies sind:

- Sternentwicklung (6)
- Ursprung und Entwicklung des Universums (6)
- HRD als Entwicklungsdiagramm (4)

Ohne Zuordnung

Insgesamt konnten 33 Inhalte keinem Inhaltsfeld zugeordnet werden. 25 dieser Inhalte lassen sich zu fünf Kategorien bündeln. Es werden behandelt:

- Raumfahrt
- Geschichte der Astronomie
- Das Leben
- Makro- und Mikrokosmos
- Umweltprobleme und nachhaltiges Wirtschaften

Die übrigen acht Inhalte lassen sich zu keiner Kategorie zusammenfassen. Lediglich zwei Inhalte treten durch ihr gehäuftes Auftreten besonders hervor. Dies sind:

- Weltbilder (6)
- Außerirdisches Leben (5)

Insbesondere auf das Thema Weltbilder ist hier nochmals gesondert zu verweisen, da ein Beitrag zur Herausbildung eines Weltbildes – welches der modernen astronomischen Forschung genügt und das Bewusstsein für die Stellung des Menschen in seiner Umwelt schärft – ein zentrales Anliegen dieser Arbeit ist.

Auch die Frage nach außerirdischem Leben spiegelt gleich drei der wesentlichen Aspekte eines modernen Astronomieunterrichts wider. Zum einen ist dies der fächerübergreifende Ansatz, der sich realisieren lässt, indem man der Frage nachgeht, was die Voraussetzungen für die Entwicklung und den Bestand von Leben sind. Zum anderen ist die Suche nach außerirdischem Leben wiederum im Hinblick auf die Auswirkungen auf das gegenwärtige Weltbild zu sehen. Sofern es der Astronomie gelingt, auch nur Spuren von Leben nachzuweisen, wäre dies der nächste revolutionäre Umbruch im Weltbild der gesamten Menschheit, der durch die astronomische Forschung hervorgerufen würde (vgl. Zimmermann [2002, S. 103 f.]). Als dritter Punkt ist noch der motivierende Aspekt bei der Behandlung der Möglichkeiten von außerirdischem Leben zu berücksichtigen.

3.2.4 Astronomie als Bestandteil anderer Schulfächer

Neben eigenständigem Astronomieunterricht finden sich astronomische Inhalte auch in den Lehrplänen weiterer Fächer. In der Regel betrifft dies am deutlichsten den Physikunterricht. In Bayern existiert das Modell einer „Lehrplanalternative Astrophysik“. Als in sich geschlossener Astrophysik-Kurs für die Oberstufe wird darin ein inhaltliches Spektrum behandelt, welches im Wesentlichen den bereits vorgestellten Ergebnissen der Lehrplananalyse

entspricht.¹⁹ Auf eine gesonderte Darstellung des Inhaltes wird daher verzichtet. Stattdessen wird beispielhaft für die übrigen Bundesländer der Physiklehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen für das Gymnasium auf ein Vorkommen astronomischer Inhalte untersucht.

Im Bereich der Sekundarstufe I²⁰ finden sich nur wenige Bezüge zur Astronomie. Diese beschränken sich auf grundlegende Phänomene wie die Jahreszeiten und die Lichtgestalt des Mondes sowie optische Instrumente:

- den Sonnenstand als eine Bestimmungsgröße für die Temperatur auf der Erdoberfläche erkennen (S. 29)
- Temperatur und Energie: Sonnenstand (S. 34)
- Sonne – Temperatur – Jahreszeiten: Die Sonne – unsere wichtigste Energiequelle (S. 34)
- Mondphasen (S. 34)
- Sonnen- und Mondfinsternis (S. 34)
- Optische Instrumente, Farbzerlegung des Lichtes: Fernrohr (S. 35)
- Mit optischen Instrumenten „Unsichtbares“ sichtbar gemacht, Teleskope und Spektroskope (S. 35)

Zahlreicher sind Themen mit astronomischen Bezügen in der Sekundarstufe II.²¹ Die Themen werden dabei teilweise als möglicher Kontext vorgeschlagen und sind daher nicht als verbindliche Inhalte zu verstehen.

- Flug in den Weltraum (S. 23)
- Astronomische Beobachtungen (S. 23)
- Newton'sches Gravitationsgesetz (S. 23)
- Änderungen in den Vorstellungen zu Bewegungen und zum Sonnensystem beim Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit (S. 23)
- Kepler'sche Gesetze und des Gravitationsgesetzes (S. 24)
- Veränderungen im Weltbild und in der Arbeitsweise der Naturwissenschaften, die durch die Arbeiten von Kopernikus, Kepler, Galilei und Newton initiiert wurden (S. 24)
- Sinn aktueller Forschungsprogramme (z.B. Raumfahrt, Mobilität) (S. 25)
- Erforschung des Mikro- und Makrokosmos (S. 32)

¹⁹Vgl. Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München [2009]

²⁰Vgl. Ministerium für Schule und Weiterbildung [2008]

²¹Vgl. Ministerium für Schule und Weiterbildung [2013]

- Sternspektren und Fraunhoferlinien (S. 32)
- Spektraltafeln des Sonnenspektrums, in der Sonnen- und Erdatmosphäre vorhandene Stoffe (S. 33)
- Relativitätstheorie: Höhenstrahlung, Satellitennavigation (S. 36)
- Modell zur Wirkung von massebehafteten Körpern auf die Zeitmessung sowie die Krümmung des Raums (S. 37)

Auch die nordrhein-westfälischen Lehrpläne decken sich, unter Berücksichtigung der starken Kürzungen gegenüber einem eigenen Schulfach Astronomie, mit den bisherigen Erkenntnissen der Lehrplananalyse. Ausgehend von der Bedeutung der Sonne für das Leben werden anschließend Mondphasen und Finsternisse behandelt. Optische Instrumente der Astronomie passen sich in den Verlauf des Physikunterrichts ein.

In der Sekundarstufe II werden die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten für Bewegungen und Strukturbildung behandelt. Astronomische Weltbilder und deren Wandel bringt geschichtliche Aspekte auf die Tagesordnung. Astrophysikalische Inhalte wie die Spektralanalyse und insbesondere Themen der modernen Physik (Höhenstrahlung und Relativitätstheorie), stellen gegenüber den reinen Astronomielehrplänen eine Auffälligkeit dar. Sie liegen im Grenzgebiet zwischen Physik und Astronomie und lassen sich kaum sinnvoll der ein oder anderen Seite zuordnen.

Zusammenfassend lässt der Blick in den Physiklehrplan sagen, dass sich hier nur solche Inhalte wiederfinden lassen, die bereits aus den Lehrplänen für Astronomie als besonders bedeutsam extrahiert wurden. Damit besitzen die Ergebnisse dieser Arbeit auch für den Schulunterricht solcher Bundesländer Relevanz, in denen kein gesonderter Astronomieunterricht erteilt wird.

4 Vermittlungszugänge für Blinde und Sehbehinderte

Das nachfolgende Kapitel soll die Frage beantworten, welche Sinne des Menschen zur Kompensation des Sehannes herangezogen werden können. Dies soll insbesondere aus Sicht astronomischer Inhalte geschehen. Dazu werden zunächst diejenigen wahrnehmungsphysiologischen Grundlagen dargelegt, die unabhängig von der Art des Sinneseindruckes gültig sind. Die folgende Betrachtung der einzelnen Sinne beschränkt sich nicht ausschließlich auf den Tastsinn, da auch weitere Sinne angesprochen werden sollen, die als Übertragungskanäle nutzbar sind. Dabei zielt dieses Vorgehen zum einen auf die Erschließung einer möglichst großen Breite bei den angesprochenen Sinnen ab, wie sie unter pädagogischen Gesichtspunkten etwa bereits von Comenius (1592 – 1670) gefordert wurde und wie sie heute noch ihren berechtigten Platz in der modernen Didaktik inne hat. Zum anderen sollen die entstehenden Modelle in ihren wesentlichen Eigenschaften den Originalen möglichst ähnlich sein, was die Forderung nach der Nutzung weiterer Sinneskanäle auch aus modelltheoretischer Sicht bekräftigt (siehe Kapitel 5.4.1 und 5.4).

4.1 Formen physischer Wahrnehmung

4.1.1 Wahrnehmungsphysiologische Grundlagen

Alle Sinneseindrücke des Menschen unterliegen dem Weber-Fechner-Gesetz bzw. der Stevensschen Potenzfunktion. Aus dem Weber-Fechner-Gesetz folgt, dass die empfundene Stärke des Sinneseindruckes proportional zum Logarithmus des physikalischen Reizes ist. Die logarithmische Wahrnehmung ermöglicht es uns, Sinneseindrücke über sehr weite Bereiche wahrzunehmen, beispielsweise kann unser Auge Leuchtdichten über mehr als 10 Zehnerpotenzen sinnvoll in Bilder umsetzen. [Eysel, 2007, S. 379]

Weber-Fechnersches-Gesetz und Stevenssche Potenzfunktion

Erstmals wurde 1834 durch den Mediziner Ernst Heinrich Weber (1795 – 1878) aufgezeigt, dass die Wahrnehmungsschwelle zweier Reize proportional zur Größe des Vergleichsreizes ist. Muss etwa eine Masse von 1000 g um 100 g vergrößert werden (d.h. um 10 %), um eine Reizzunahme erkennen zu können, so ist bei einer Masse von 2000 g eine Vergrößerung auf

2200 g erforderlich (d.h. wiederum um 10 %), damit auch dieser Reizunterschied von der Versuchsperson wahrgenommen werden kann. Dies ist das Webersche Gesetz, welches sich mathematisch darstellen lässt als

$$k = \frac{\Delta R}{R}. \quad (4.1)$$

Der Faktor k wird als Weber-Konstante bezeichnet. Sie ist für unterschiedliche Reizintensitäten konstant, besitzt jedoch für alle Sinnesorgane einen eigenen Wert. ΔR ist die Reizänderung und R ist der vorangegangene Reiz. [Handwerker und Schmelz, 2007, S. 288]

Der Physiker Gustav Theodor Fechner (1801 – 1887) erweiterte das Webersche Gesetz 1860. Er nahm an, dass die Unterscheidungsschwelle nicht nur ein fester Prozentsatz der Reizstärke ist. Man ging davon aus, dass die Unterschiedsschwellen jeweils die gleiche Empfindung beim Betrachter auslösen und somit ein Maß für die Erlebnisintensität sind. Daraus ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Reizstärke S und der Empfindungsstärke E :

$$E = c \cdot \lg S. \quad (4.2)$$

Die Konstante c ist wiederum eine von der Art des Reizes abhängige Konstante. Sie heißt hier Fechner-Konstante. Abb. 4.1 stellt den Zusammenhang grafisch dar.

Die Zusammenführung der Gesetze von Weber und Fechner führten schließlich zum Weber-Fechner-Gesetz (vgl. Schmidt und Schmidt-Thews [1997, S. 290 f.]):

$$\Delta E = c \cdot \lg \frac{R}{R_0}. \quad (4.3)$$

Einen überzeugenden Beleg für die Gültigkeit dieses Gesetzes liefern die Schätzungen von Sternhelligkeiten, wie sie bereits von den Astronomen der Antike angewandt wurden. Die klassische Einteilung nach Hipparchos (um 150 v.Chr.) unterteilt die Sterne in sechs Klassen. Die der 1. Magnitude sind die hellsten, während jene der 6. Größenklasse gerade noch mit bloßem Auge sichtbar sind. Dabei gilt, dass ein Stern 2. Größe deutlich erkennbar dunkler ist, als ein Stern der 1. Größe. Ein Stern 3. Größe erscheint wiederum um den gleichen Betrag dunkler usw. Die Verwendung moderner Fotometer zeigte schließlich, dass ein Stern 1. Größe eine Strahlungsintensität von etwa 10 nW/m^2 aufweist, während solche der 6. Größe um einen Faktor 100 dahinter zurückbleiben.

Überträgt man diese Erkenntnisse auf das Weber-Fechner-Gesetz, so lässt sich dessen Konstante c bestimmen. Die Wahrnehmung E ist dabei gegeben durch die Helligkeitseinteilung m in 6 Stufen (vgl. Beckmann [2011, S. 115]):

$$E = \Delta m = m_1 - m_2 = -5. \quad (4.4)$$

Bei bekanntem Intensitätsverhältnis von 100:1 ergibt sich daraus:

$$-5 = c \cdot \lg 100 \Rightarrow c = -2,5. \quad (4.5)$$

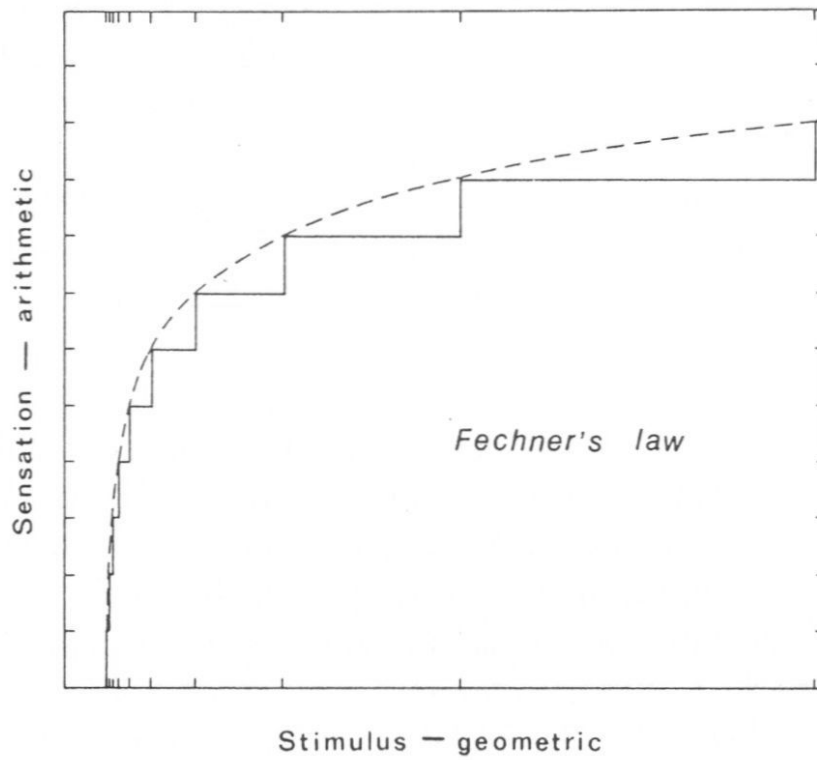


Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen physikalischem Reiz und Empfindung nach Fechner (Quelle: Stevens [1975, S. 8]).

Dieser Zusammenhang lässt sich auch mittels eines einfachen Experimentes mit Leuchtdioden nachvollziehbar gestalten, wie es von Heimerl [1995] dargestellt wird. So müssen die Stromflüsse zweier benachbarter LEDs sich jeweils um einen Faktor 2,5 unterscheiden, um immer gleiche Helligkeitsunterschiede wahrnehmen zu können.

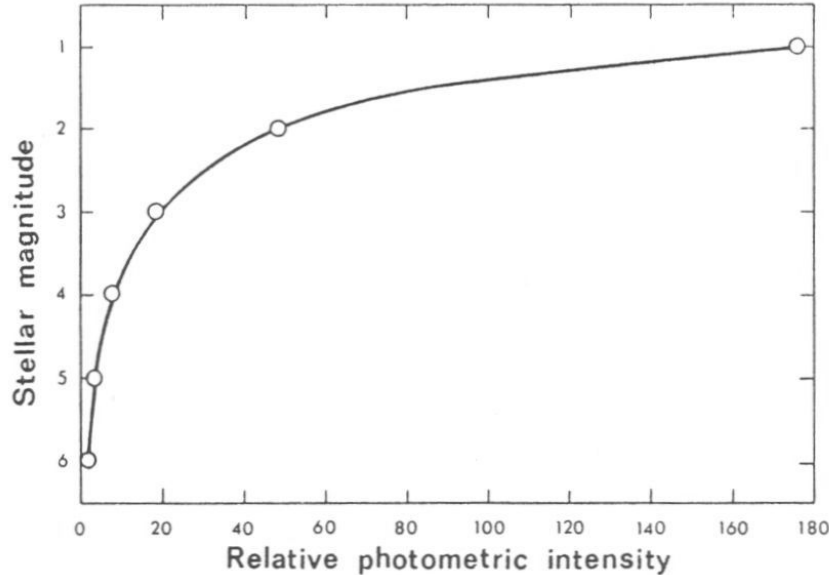


Abbildung 4.2: Beurteilung der Leuchtkraft von Sternen mittels visueller Beobachtung (Stellar magnitude) und fotometrische Helligkeit – basierend auf über 20 000 Beobachtungen (Quelle: Stevens [1975, S. 11]).

Da das Weber-Fechner-Gesetz eine Aussage über Unterschiedsschwellen trifft, können hierbei keine quantitativen Aussagen über unterschiedliche Reize getroffen werden. Stevens [1975] setzte auf eine direkte Schätzung der Wahrnehmungsintensität, um diesen Mangel zu beheben und nutzte eine kontinuierliche Skala. Er fand, dass Reizintensität und Empfindungsstärke über eine Potenzfunktion verknüpft sind.

$$E = b(R - R_0)^n \quad (4.6)$$

Hier ist wiederum b eine Konstante zur Skalierung, R die Reizintensität, R_0 die Reizschwellenintensität ab der ein Reiz wahrgenommen wird und n der Rezeptorspezifische Exponent.

Bei Stevens-Konstanten unterhalb von 1 wird eine Zunahme des Reizes als immer unbedeutender wahrgenommen, wie es sich etwa bei der Lichtintensität darstellt. Es kann jedoch auch der umgekehrte Fall eintreten. Bei $k > 1$ steigt die Intensität der Empfindung überproportional zum Reiz an. Dies ist etwa bei der Schmerzwahrnehmung bei elektrischen Schocks der Fall (vgl. Abb. 4.3). [Spering und Schmidt, 2009, S. 7]

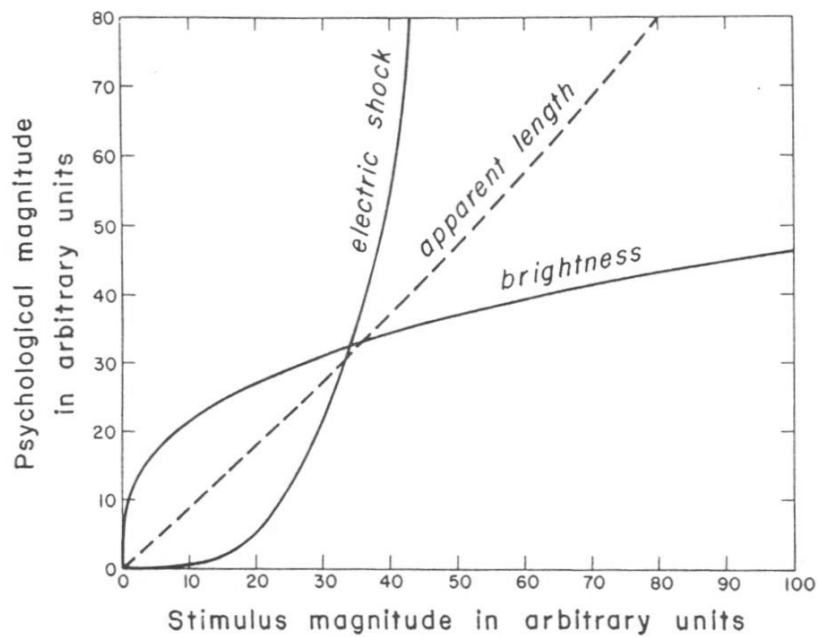


Abbildung 4.3: Vergleich zwischen den Empfindungen zu elektrischen Schocks (Stevens-Konstante $n=3,5$), zur scheinbaren Länge einer Linie ($n=1,1$) und zur Helligkeit ($n=0,33$) – lineare Skalierung der Achsen (Quelle: Stevens [1975, S. 16]).

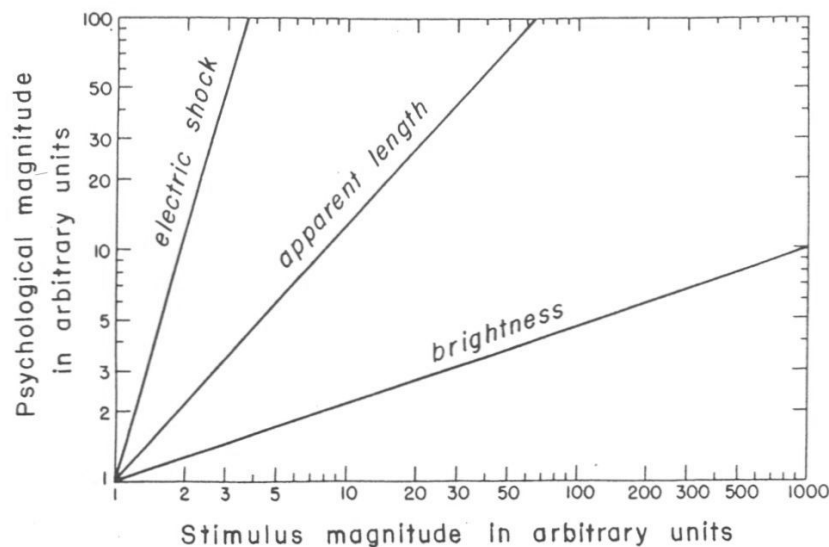


Abbildung 4.4: Vergleich zwischen den Empfindungen zu elektrischen Schocks (Stevens-Konstante $n=3,5$), zur scheinbaren Länge einer Linie ($n=1,1$) und zur Helligkeit ($n=0,33$) – doppelt logarithmische Skalierung der Achsen (Quelle: Stevens [1975, S. 17]).

Während n für die Helligkeit oder den Schalldruck kleiner 1 ist, nimmt der Exponent für das Temperaturempfinden einen Wert nahe 1 an (abhängig davon, ob ein direkter Kontakt zu einer Oberfläche oder etwa eine kleine oder großflächige Bestrahlung vorliegt). Damit ist die Wahrnehmung in diesem speziellen Fall etwa linear zum physikalischen Reiz. [Stevens, 1975, S. 15]

Für die Wahrnehmung von Helligkeiten, wie sie etwa bei der Schätzung der Sternhelligkeiten zum Tragen kommt, entspricht die Sinneswahrnehmung entsprechend den Erkenntnissen von Stevens im Wesentlichen jener, die mit dem logarithmischen Zusammenhang nach Fechner hergeleitet wurde. Fechners Gesetz kann in diesem und ähnlichen Fällen (etwa der Wahrnehmung süßen Geschmacks) mit Recht als Spezialfall der Stevensschen Potenzfunktion angesehen werden. Tabelle 4.1 führt eine Reihe relevanter physikalischer Stimulationen und die zugehörigen Exponenten der Stevens-Konstante auf.

Sensorische Adaption

Wird ein Reiz über einen gewissen Zeitraum kontinuierlich ausgeübt, wie etwa beim Betasten eines warmen Gegenstandes, ist eine weitere physiologische Besonderheit bei der Reizwahrnehmung zu beachten – die sensorische Adaption. Für das Beispiel der Temperaturempfindung bewirkt sie, trotz konstanter Temperatur des zu untersuchenden Gegen-

Tabelle 4.1: Auswahl von Stevens-Konstanten verschiedener physikalischer Reize (nach Stevens [1975, S. 15]).

Empfindung	Beschreibung	Exponent
Helligkeit	5°-Objekt	0,33
Helligkeit	Punktquelle	0,50
Helligkeit	kurzes Aufblitzen (Flächenquelle)	0,50
Helligkeit	kurzes Aufblitzen (Punktquelle)	1,00
Geruch	Heptan	0,60
Kälte	Kontakt mit Metall am Arm	1,00
Wärme	Kontakt mit Metall am Arm	1,60
Wärme	kleinflächige Bestrahlung der Haut	1,30
Wärme	großflächige Bestrahlung der Haut	0,70
Wärme	Kontakt mit Metall am Arm	1,60
Rauigkeit (taktil)	Reibung an Schmirgelpapier	1,50
Härte (taktil)	Druckausübung auf Gummi	0,80
Druck	Druck auf die Handfläche (statisch)	1,10
Schwere	Anheben von Gewichten	1,45
Winkelbeschleunigung	5-sekündige Rotation	1,40
Dauer	Stimulation durch weißes Rauschen	1,10

standes, ein allmähliches Nachlassen der Empfindung. Dabei handelt es sich – entgegen früher Vorstellungen etwa im Bezug auf die Adaption bei visuellen Reizen – nicht um eine Ermüdungserscheinung der angesprochenen Sinneszellen. Vielmehr erfolgt die Adaption als Neukalibrierung zur Anpassung an die Umwelt, mit dem Ziel der größtmöglichen Effizienz bei der Wahrnehmung. [Spering und Schmidt, 2009, S. 12 f.]

Der Verlauf eines Adaptionsvorganges lässt sich etwa mittels Tierversuchsexperimenten bestimmen (Abb. 4.5). Die gewonnenen Resultate lassen sich in ihrer wesentlichen Aussage auf den Menschen übertragen. So ist die Anpassung an eine dunkle Umgebung beim Menschen nach etwa 30 Minuten abgeschlossen. [Handwerker und Schmelz, 2007, S. 289]

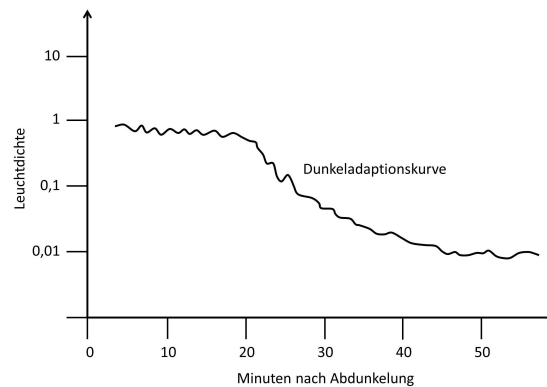


Abbildung 4.5: Dunkeladaptionkurve einer konditionierten Taube – Dem Tier wurde die Möglichkeit gegeben, einen dargebotenen Reiz durch Picken auf einen Taster zu verkleinern oder zu vergrößern (nach Schmidt und Schmidt-Thews [1997, S. 209]).

Es ist demnach zu unterscheiden, ob ein Reiz kontinuierlich dargeboten wird – wie etwa ein warmer Gegenstand – oder ob der Reiz nur kurzzeitig wahrnehmbar ist, wie etwa das Aufblitzen einer Lichtquelle.

4.1.2 Tastsinn

Die Sinneszellen für Berührungen oder Druck sind mit einer Gesamtzahl von ca. 700 000 sehr zahlreich, jedoch ungleichmäßig über die Körperoberfläche verteilt. Die größten Häufungen finden sich an den Fingerspitzen, den Lippen und der Zunge. Die Reizschwelle, die zu einer Empfindung führt, liegt bei durchschnittlich $1 - 2 \text{ g/mm}^2$. Dieser Wert ist jedoch vom Ort auf der Hautoberfläche sowie der Temperatur der Haut abhängig. So sinkt die Empfindlichkeit der Haut bei geringer Temperatur. [Suhrweiler, 1966a, S. 18 f.]

Das örtliche Unterscheidungsvermögen, d.h. der kleinste Abstand zweier gleichartiger Reize, die noch als voneinander getrennt empfunden werden, ist ebenso von der untersuchten

Körperstelle abhängig. Sie variiert zwischen wenigen Millimetern (1 – 4 mm) z.B. an den Fingerspitzen und mehreren Zentimetern (40 – 60 mm) im Bereich der Oberschenkel oder Oberarme (siehe Suhrweiler [1966a, S. 17] sowie Sherrick und Cholewiak [1986, S. 23 f.]). An dieses mögliche Auflösungsvermögen passt sich auch die Brailleschrift an, deren Punktabstand bei den üblichen Schreibmaschinen und Druckern bei 2,3 mm liegt. [Aldrige, 2000] Bei Blinden ist von einem verfeinerten Wahrnehmungsvermögen im taktilen Bereich aus-

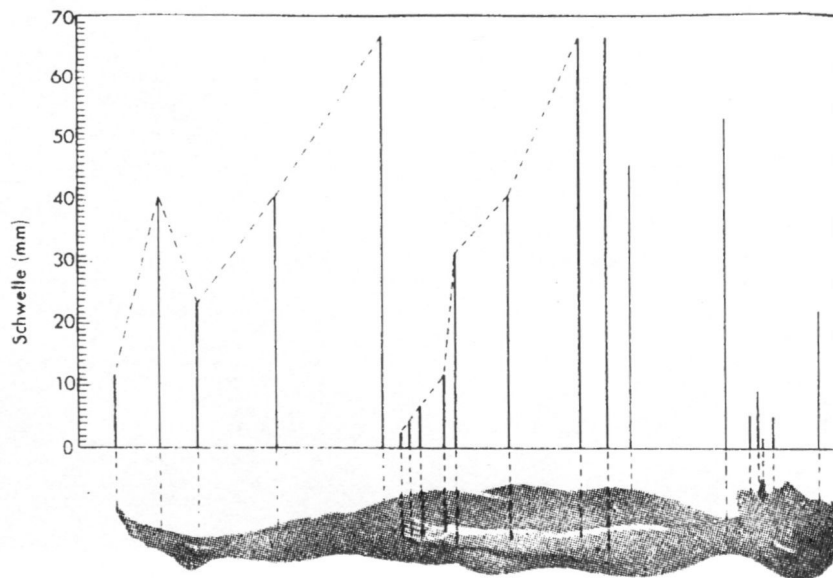


Abbildung 4.6: Auflösungsvermögen des Tastsinns an verschiedenen Körperstellen (Quelle: Suhrweiler [1966a, S. 17]).

zugehen, was auf das besonders ausgeprägte Training der Sinnesorgane zurückzuführen ist. Vergleicht man dagegen die Leistungen Blinden mit denen von Sehenden, so zeigen sich für die linke Hand keinerlei bedeutende Unterschiede (Suhrweiler [1966b]). Es muss dabei jedoch stets zwischen Früh- und Späterblindeten bzw. zwischen Menschen mit und ohne Braillekenntnissen unterschieden werden, da sich hier eine starke Differenzierung bei der individuellen Ausprägung des Tastsinnes zeigt (Laufenberg und Löttsch [1995]).

Die Anforderungen an tastbare Grafiken sowie die Beschriftungen von Modellen, die sich aus den Besonderheiten des Tastsinnes und allgemeineren Überlegungen zur Gestaltung ergeben, sind in Kapitel 5.2 näher ausgeführt.

4.1.3 Gehör

Das Gehör wandelt winzige Druckschwankungen im Innenohr in Signale um, die vom Nervensystem weitergeleitet und schließlich interpretiert werden. Im Innenohr wird die ankomm-

mende Schallwelle dabei frequenzabhängig aufgespreizt und durch die äußeren Haarzellen verstärkt. Der Intensitätsumfang, zwischen Hörschwelle und dem Schmerzempfinden, umfasst den Bereich von 10^{-16} W/m^2 bis hin zu 10^{-4} W/m^2 und damit 12 Zehnerpotenzen. Um unnötig große Zahlenwerte zu vermeiden und die logarithmische Dämpfung der Sinneswahrnehmung abzubilden, verwendet man statt der Schallintensität I meist den Schalldruckpegel L mit der Einheit Dezibel (dB), die in logarithmischer Beziehung zueinander stehen (Zenner [2001, S. 317 f.]):

$$L = 10 \log \frac{I_x}{I_0}. \quad (4.7)$$

Die Lokalisation von Schallquellen geschieht anhand der zeitlichen Verzögerung, mit der die Schallwelle an den Ohren ankommt. Dabei gelingt die Lokalisierung von Dauertönen hoher Frequenz schlechter, als bei allgemeinen Geräuschen. Am leichtesten geht die Richtungsbestimmung bei kurzen Knack-Lauten vonstatten, wie sie etwa von einer tickenden Uhr verursacht werden (Campenhausen [1981b, S. 153]). Dabei können Laufzeitunterschiede von bis zu $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ erkannt werden, was einer Abweichung von 3° von der Mittellinie entspricht. Die Unterscheidung, ob der Schall von oben, unten, vorn oder hinten kommt, kann nicht anhand von Laufzeit- oder Intensitätsunterschieden gelingen. Sie wird vielmehr durch die Form der Ohrmuschel bewerkstelligt, die eine richtungsabhängige Veränderung des Schallsignals bewirkt und ist damit deutlich komplexer (Zenner [2001, S. 340]).

Das Auflösungsvermögen des Gehörs für Frequenzunterschiede hängt vom Schalldruck sowie der Frequenz des Reizes ab. Generell ist der Schwellenreiz bei größerem Schalldruck kleiner, d.h. eine Änderung der Frequenz wird schneller bemerkt. Für Frequenzen um 500 Hz liegt die Reizschwelle bei etwa 2 bis 5 Hz, sie bleibt bis etwa 2000 Hz auf diesem Niveau. Oberhalb von 2000 Hz steigt die Reizschwelle mit zunehmender Frequenz an, sodass beispielsweise bei Frequenzen um 10 000 Hz ein ΔF von 50 Hz notwendig ist, um eine Änderung der Wahrnehmung hervorzurufen. [Scharf und Buus, 1986, S. 55 f.]

Im Vergleich zu anderen Sinnesleistungen zeigt die Tonhöhenempfindung damit ein erstaunliches Auflösungsvermögen. Die Fechner-Konstante (vgl. Formel 4.2) wird von Dittmann und Schneider [1993, S. 266] mit 1,001 angegeben. Dadurch kann etwa die vom Dopplereffekt hervorgerufene Frequenzänderung einer mit 1 000 Hz schwingenden Stimmgabel wahrgenommen werden, wenn diese sich mit einer Geschwindigkeit von $34 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ relativ zur Testperson bewegt.

Mit zunehmendem Alter tritt ein teilweiser Verlust des Hörvermögens, bzw. eine Verschiebung der Wahrnehmungsschwellen, zu immer höheren Schalldrücken ein. Der Hörverlust ist bei hohen Frequenzen deutlich ausgeprägter, als bei niedrigen. Bis zu einer Frequenz von 4000 Hz ist die Beeinträchtigung meist nicht größer als 20 dB. Hohe Frequenzen, etwa von 12 000 Hz zeigen jedoch einen starken Rückgang des Hörvermögens von im Mittel 40 dB bei einem Alter von etwa 50 Jahren. [Scharf und Buus, 1986, S. 34]

Aus den aufgeführten Besonderheiten des Gehörs ergeben sich folgende Voraussetzungen, die bei der Umsetzung von Inhalten in Töne berücksichtigt werden müssen:

- Die Tonhöhe muss dem Hörvermögen der Zielpersonen angepasst sein.
- Ist die Richtungsbestimmung eines Tons von Bedeutung, muss die Tonhöhe und Tonart (Dauerton/Impuls) angemessen gewählt werden.
- Die Tonortung sollte auf Kopfhöhe erfolgen.
- Wird die Tonhöhe als Informationsträger genutzt, muss das frequenzabhängige Auflösungsvermögen berücksichtigt werden.

4.1.4 Wärmeempfinden

Der Mensch verfügt im Bereich des Wärmeempfindens über zwei Arten von Sinneszellen, die unterschiedliche Temperaturbereiche abdecken. Während die sogenannten Kälterezeptoren im Temperaturbereich von ca. 10 °C – 34 °C ansprechen, liefern die Wärmerezeptoren Sinneseindrücke zwischen 30 °C und 45 °C (vgl. Handwerker [2001, S. 244]). Unterhalb von 10 bzw. oberhalb von 45 °C geht die Wahrnehmung in Schmerzempfindungen über (Campenhausen [1981b, S. 121]).

Dabei kommen die Kälterezeptoren mit etwa 250 000 deutlich häufiger vor, als solche für Wärme mit nur etwa 30 000 Sinneszellen (Suhrweiler [1966a]). Die unterschiedliche Dichte der Rezeptoren ist für einige Körperstellen in Tabelle 4.2 wiedergegeben.

Tabelle 4.2: Dichte der Wärme- und Kälterezeptoren pro cm² Hautoberfläche (Quelle: Campenhausen [1981b, S. 120]).

Körperteil	Kaltpunkte pro cm ²	Warmpunkte pro cm ²
Stirn	6,75	0,62
Nase	10,5	1
Brust	9	0,3
Oberarm	5,7	0,3
Unterarm	6	0,4
Handrücken	7,4	0,54
Oberschenkel	4,85	0,39

Durch die oben gegebenen Informationen ist ein grober Rahmen für die Nutzung der Temperatur zur Informationsvermittlung gesteckt. Liegt die Temperatur eines Objektes im Bereich

der Oberflächentemperatur der Haut, wird dieses weder als kalt noch als warm identifiziert. Diese neutrale Nullpunkttemperatur liegt bei ca. 33°C , variiert jedoch mit verschiedenen Stellen der Haut, dem Gesundheitszustand der Person, dem Geschlecht und sogar der Tageszeit. Innerhalb eines Temperaturbereiches von $\pm 5^{\circ}\text{C}$ um diese Nullpunkttemperatur können langsame Änderungen der Temperatur nicht wahrgenommen werden (Sherrick und Cholewiak [1986, S. 30]).

Die Empfindungsstärke hängt ferner von der Größe der Kontaktfläche ab. So wird eine Münze, deren Kante in Kontakt mit der Haut gebracht wird, als deutlich weniger warm oder kalt empfunden, als wenn sie mit ihrer gesamten Fläche auf die Haut gelegt wird (Campenhausen [1981a, S. 20]). Die Ergebnisse variieren dabei wiederum mit der Stelle der Haut, die dem Reiz ausgesetzt wird (vgl. Sherrick und Cholewiak [1986, S. 31 f.]). Auch für die sensorische Adaption ergibt sich ein Zusammenhang mit der Kontaktfläche. So ist für sehr kleine Bereiche von 1 – 2 mm eine wesentliche größere Temperaturspanne nachgewiesen worden, in der eine vollständige Adaption stattfinden kann (Sherrick und Cholewiak [1986, S. 33]). Auch das generelle Auflösungsvermögen des Wärmeempfindens bleibt deutlich hinter den übrigen Sinnen zurück. Es hängt wiederum von der Intensität der Stimulation ab und liegt im Bereich von einigen cm^2 .

Aus den geschilderten Besonderheiten des Wärmeempfindens lassen sich folgende Voraussetzungen formulieren, die für eine erfolgreiche Informationsvermittlung erfüllt sein müssen:

- Die Temperatur des Informationsträgers liegt innerhalb des Erfassungsbereiches der Wärmerezeptoren.
- Die Temperatur des Objektes liegt außerhalb der Nullpunkttemperatur der Haut.²²
- Das Objekt ist ausreichend groß, um als warm wahrgenommen werden zu können.
- Die Einschränkungen bei der Lokalisierung durch das Auflösungsvermögen werden beachtet.

²²Sofern es nicht als kalt oder neutral erscheinen soll.

4.2 Vorüberlegungen zur geeigneten Methodenauswahl zur Vermittlung astronomischer Inhalte

Die vorangegangenen Überlegungen zur Physiologie des Menschen und den psychophysischen Gesetzmäßigkeiten, die seine Wahrnehmungen determinieren, sollen nun auf das Erstellen astronomischer Modelle angewandt werden.

Grundsätzlich dominiert aus fachdidaktischen Überlegungen zur Umsetzung von Inhalten in Modelle (vgl. Kapitel 5.4) heraus der Wunsch, die wesentlichen Eigenschaften eines bestimmten Phänomens möglichst direkt im Modell abzubilden. Ist das wesentliche Kennzeichen eines Phänomens etwa eine bestimmte Temperatur bzw. eine Temperaturdifferenz zu einem Referenzwert, so ist es wünschenswert, dies auch im Modell durch die Nutzung des Wärmeempfindens darzustellen.

Da sich die Astronomie – oder im engeren Sinne vielmehr die klassische Astronomie – auf die Beobachtung der Objekte im sichtbaren Licht stützt, muss jedoch vor allem an dieser Stelle ein adäquater Ersatz geschaffen werden. Die klassische Lösung ist die Kompensation mittels des Tastsinnes. Hier kann einerseits auf einen reichhaltigen Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden, andererseits ist die Umsetzung technisch oft deutlich weniger anspruchsvoll, als dies beim Rückgriff auf andere Sinneskanäle der Fall wäre.

Auch bei den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modellen und ergänzenden Medien wird der Tastsinn häufig angesprochen. Bei den Begleitmedien in Form von Anleitungen bzw. tastbaren Darstellungen stehen hierbei die Robustheit, die Reproduzierbarkeit und der geringe Aufwand bei der Produktion im Vordergrund. Bei der Erstellung von Texten ist der äußere Rahmen durch die Standardisierung der Brailleschrift bereits gegeben, während bei der Herstellung von tastbaren Grafiken die o.g. Möglichkeiten des Tastsinnes beachtet werden müssen. Bei der Einbindung von Beschriftungen in tastbare Grafiken ist die Einhaltung von Mindeststandards bei der Erkennbarkeit der Schriftzeichen zu gewährleisten, da diese durch Tiefziehverfahren in ihrer Ausprägung beeinträchtigt werden können.

Kommen Sinneskanäle wie der für Wärme bei der Umsetzung in ein Modell zum Tragen, sind selbstverständlich die Beschränkungen der Sinneszellen auf bestimmte Temperaturbereiche sowie die sensorische Adaption zu berücksichtigen. Dies bedeutet eine deutliche Einschränkung der Bandbreite an nutzbaren Temperaturen, sodass etwa eine größere Zahl von unterschiedlich heißen Sternen nicht darstellbar ist. Die Minimal- und Maximalwerte des Ansprechvermögens der Sinneszellen sowie das Auflösungsvermögen und die sensorische Adaption, machen in diesem Beispiel eine möglichst direkte Umsetzung des physikalischen Phänomens in ein Modell unmöglich. Ein fein aufgelöstes HRD mit verschiedenen warmen Sternen, ließe sich auf diesem Wege demnach nicht erstellen.

Sollen verschiedenartige Modelle innerhalb einer Gesamtdarstellung präsentiert werden, so ist es wünschenswert, ein Phänomen bzw. einen bestimmten Aspekt in allen Modellen über den gleichen Sinneskanal zu vermitteln. Sofern dies nicht realisiert werden kann, ist aus

fachdidaktischer Sicht auf die Abweichungen von dieser Regel gesondert hinzuweisen (vgl. Kapitel 5.4). So sollte die Temperatur eines Sterns im Modell nicht einmal mit der Temperatur und ein anderes Mal mit der geometrischen Größe der Modellsterne dargestellt werden. Eine Ausnahme bildet die Übertragung der Informationen vom gegenständlichen Modell zur tastbaren Darstellung bzw. dem tastbaren Diagramm, wo die Vermittlungsmethoden generell auf den taktilen Bereich reduziert werden.

Nicht alle Aspekte eines Phänomens, die der direkten Wahrnehmung der Zielgruppe verborgen bleiben, müssen zwangsläufig durch eine Ersatzgröße dargestellt werden. Betrachtet man etwa magnetische Phänomene, so sind diese dem Menschen zwar nicht unmittelbar zugänglich, der Gebrauch von Magneten bzw. magnetisierbarem Material zu deren Nachweis ist jedoch allgemein bekannt. So kann mittels eines einfachen Hilfsmittels wie einem Magneten die unzugängliche Größe (magnetische Flussdichte) in eine zugängliche Größe (Kraftwirkung) umgesetzt werden, ohne dass diese Umsetzungsleistung durch das Modell vollbracht werden müsste. Zu beachten sind hier wiederum die wahrnehmungsphysiologischen und psychologischen Besonderheiten, im Beispiel die der Wahrnehmung von Kräften.

Generell werden durch Training verbesserte Sinnesleistungen – wie sie etwa beim Tastsinn nachgewiesen sind – bei der Planung der Modelle und Diagramme nicht berücksichtigt. Der Informationsgehalt soll auch für untrainierte Betrachter vollständig zu erfassen sein. Dies geschieht zum einen im Hinblick auf die Unkenntnis der Wahrnehmungsleistungen innerhalb der Zielgruppe. Zum anderen ist bislang weitgehend ungeklärt, was Trainingseffekte bei selten genutzten Sinneskanälen, wie der Wärmeempfindung, im Detail bewirken.

5 Vorbetrachtungen zur Modellentwicklung

Bei der Entwicklung von Modellen für Sehbehinderte – unabhängig davon, ob es sich um astronomische oder andere Modelle handelt – sind gewissen Rahmenbedingungen einzuhalten. Dies betrifft sowohl die Verknüpfung wahrnehmungsphysiologischer Aspekte im ihrem Zusammenwirken mit dem Modell, als auch theoretische Überlegungen zu Modellen im Allgemeinen. An dieser Stelle sollen daher die wesentlichen Betrachtungen dargestellt werden, die der Entwicklung konkreter Modelle vorausgegangen sind.

Die Brailleschrift kommt immer dort zum Einsatz, wo elektronische Dokumente nicht zur Verfügung stehen. Dies ist etwa bei den Beschriftungen tastbarer Darstellungen der Fall, wo der Zugriff auf Achsenbeschriftungen usw. unmittelbar möglich sein soll. Daran schließen sich direkt Überlegungen zur Gestaltung tastbarer Darstellungen an, für deren Größe und die Art der Beschriftungen Konventionen existieren, die einzuhalten sind.

In Abschnitt 5.3 soll kurz die Auswahl der Inhalte für die Umsetzung in die Modelle begründet werden, bevor im Abschnitt 5.4 die grundsätzlichen Anforderungen an Modelle dargelegt werden.

5.1 Brailleschrift

Bei der Gestaltung von Beschriftungen an Modellen, Messgeräten und in Diagrammen wurden die allgemeinen Grundsätze zur Gestaltung von Brailleschrift (insbesondere Kurzschriftregeln) sowie die Konventionen der Mathematikschrift beachtet, wie sie in Heuer u. a. [2005] sowie Betz [2010] dargestellt sind.

An dieser Stelle soll lediglich ein Kurzüberblick über die Besonderheiten bei der Verwendung von Kurzschrift und Mathematikschrift gegeben werden. Die konkrete Umsetzung von Text und Beschriftung in Brailleschrift findet sich im jeweiligen Unterkapitel (Begleitmaterial und tastbare Darstellungen) der einzelnen Modelle.

Zum Einsatz kommt zunächst die Vollschrift, basierend auf dem üblichen 6-Punkt-System, die – soweit dies notwendig ist – durch Kürzungen bei Lautgruppen zur Kurzschrift reduziert wird. Darin werden ganze Lautgruppen wie „ich“ oder „ein“ jeweils durch ein einziges Zeichen ersetzt, was zu einer deutlichen Reduktion des Zeichenumfanges führt und gleichzeitig die Lesegeschwindigkeit des Betrachters erhöhen kann.

Für ein einzelnes Braillezeichen werden die Punkte vertikal von oben nach unten und links nach rechts durchnummeriert, um eine eindeutige Zuordnung zu erhalten (siehe Abb. 5.1). Der übliche Zeichensatz umfasst an Zahlzeichen die Ziffern 0 bis 9, sowie einen Gliederungs-

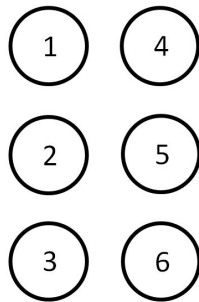


Abbildung 5.1: Zählung der Braillepunkte im 6-Punkt-System.

punkt und das Komma. Damit allein ist die Darstellung mathematischer Berechnungen noch nicht möglich. Eine Erweiterungsmöglichkeit besteht in der Verwendung der Mathematikschrift, wie sie etwa von Betz [2010] beispielhaft dargestellt wird. Dabei wird den 64 möglichen Zeichen durch die Verwendung von Ankündigungszeichen eine andere Bedeutung zugewiesen. Die Gültigkeit derartiger Kennzeichen gilt, bis ein weiteres Kennzeichen oder ein Leerzeichen folgt, welches seine Bedeutung aufhebt. Es werden dabei sämtliche Zahlen und auch Buchstaben mit einem Ankündigungszeichen versehen. Dies betrifft auch die lateinischen Kleinbuchstaben, die im normalen Text keines weiteren erklärenden Zusatzes bedürfen.

Im Rahmen dieser Arbeit besonders relevant sind die Sonderzeichen für die Potenzschreibweise und die Darstellung griechischer Buchstaben. Sollen griechische Buchstaben zum Einsatz kommen – wie es etwa bei der Bayer-Bezeichnung der hellsten Sterne eines Sternbildes gebräuchlich ist – muss dies durch ein entsprechendes Ankündigungszeichen eingeleitet werden. Das Kennzeichen besteht aus den Punkten 2 und 3 für griechische Kleinbuchstaben. Tabelle 5.1 gibt das entsprechende Zeichen in Brailleschrift sowie einige einfache Beispiele für die Anwendung wieder.

Für die Darstellung von Potenzen existiert ebenfalls ein eigenes Zeichen (Punkte 3, 4 und 6). Es steht stets bündig zur Basis und zum Exponenten. Im Unterschied zur Schwarzschrift ist die resultierende Darstellung in der Mathematikschrift nicht mit der eines hinteren oberen Indizes identisch.

Handelt es sich bei dem Exponenten um eine Zahl, so wird diese – um ihre Stellung nochmals hervorzuheben – als tiefgestellte Zahl geschrieben. Dabei werden die Braillepunkte des Zahlzeichens, die im übrigen abgesehen von ihrem Ankündigungszeichen den Buchstaben A bis J entsprechen, jeweils um eine Zeile nach unten verschoben. Dies ist möglich, da die

Tabelle 5.1: Beispiele zur Darstellung griechischer Buchstaben in Braille.

Beschreibung	Zeichen
Ankündigungszeichen für griechische Kleinbuchstaben	
α	
β	
γ	
γ Cas	

Braillepunkt 3 und 6 bei keinem der Zahlzeichen belegt sind. Das Ankündigungszeichen für Zahlen entfällt in diesem Fall für den Exponenten (siehe Tab. 5.2).

Einheiten werden ebenfalls von einem eigenen Sonderzeichen angekündigt und nicht als reiner Buchstabe einer Zahl angehängt. Dem Ankündigungszeichen folgen, ohne Leerzeichen, immer lateinische Kleinbuchstaben (siehe Tab. 5.2). [Betz, 2010, S. 4]

Bei der Einbindung von Brailleschrift, etwa in tastbare Darstellungen, ist der große Platzbedarf zu berücksichtigen. Insbesondere bei Diagrammen lassen sich umfangreichere Achsenbeschriftungen nur schwer positionieren, ohne Schwierigkeiten bei der Zuordnung zu provozieren. So sind zum Teil Kürzungen notwendig, wo noch bei der Verwendung von Schwarzschrift auf solche verzichtet werden konnte. Als Beispiel sei hier nur die Beschriftung der Darstellung zum Modell „tastbare Hauptreihensterne“ genannt, wo die Temperaturangabe aus Platzgründen in 1 000 K-Schritten erfolgen muss (siehe Abschnitt 6.1.5).

Tabelle 5.2: Ausgewählte Beispiele zur Umsetzung mathematischer Ausdrücke mittels Braille-Mathematikschrift.

Beschreibung	Zeichen
Ankündigungszeichen für Potenzschreibweise	
a^{10}	
5^{10}	
7	
tiefgestellte 7	
Ankündigungszeichen für physikalische Einheit	
kg	
m^2	

5.2 Gestaltung tastbarer Abbildungen

Grafische Darstellungen nehmen in didaktischen Überlegungen generell eine bedeutsame Stellung ein, unabhängig davon, ob es sich um sehbehinderten, allgemeine oder Fachdidaktik handelt. Sie ergänzen und veranschaulichen das geschriebene Wort und bilden Brücken zwischen der Wirklichkeit und den gedachten Modellen. Neben grundlegenden Anforderungen, wie etwa Übersichtlichkeit, sind an tastbare Darstellungen, wie sie auch im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommen, erweiterte Anforderungen zu stellen.

In der Literatur werden drei Typen von Abbildungen dargestellt, die sich im Grad der selbstständigen Erschließungsmöglichkeit durch eine blinde Person unterscheiden. Bei Typ 1 sind die Informationen der Abbildung in ihrer Gesamtheit für den Betrachter vollständig zugänglich, auch ohne dass eine Assistenz in Anspruch genommen wird. Typ 2 liegt vor, wenn die blinde Person alle Informationen aufnehmen kann, sofern sie auf die Assistenz eines Sehenden zurückgreift, dabei ist zunächst eine genügende Zahl von Objekten unmittelbar zugänglich, sodass bereits eine mehr oder weniger genaue Orientierung durch den blinden Betrachter allein möglich ist. Bei Tastabbildungen vom Typ 3 kann die Gesamtheit der Informationen nur teilweise entnommen werden. Dabei sind einige Objekte tastbar, während andere, bedingt durch objektive oder subjektive Gründe, nicht tastbar sind. Die genannte Einteilung ist in ihren Grenzen nicht in jedem Fall eindeutig und weiterhin stark von der individuellen Erfahrung und den Möglichkeiten des Nutzers beeinflusst. [Laufenberg und Löttsch, 1995, S. 14 f.]

Bei der Herstellung tastbarer Abbildungen kommen im Wesentlichen zwei Verfahren zum Einsatz. Dies sind das Tiefzieh- und das Schwellkopierverfahren. Beide Verfahren unterscheiden sich erheblich in ihrem Herstellungsaufwand sowie ihren Ausdrucksmöglichkeiten.

Für das Schwellkopierverfahren wird i.d.R. eine auf dem Computer erstellte Grafik auf Spezialpapier ausgedruckt. Das Papier wird danach beleuchtet, wobei sich die geschwärzten Flächen stärker erwärmen und anschwellen. Die Höhe der Erhebungen lässt sich nur wenig beeinflussen und bleibt insgesamt deutlich hinter anderen Verfahren zurück. Hervorzuheben ist allerdings der verhältnismäßig geringe Herstellungsaufwand.

Mittels Tiefziehverfahren können dagegen größere Höhenunterschiede realisiert werden. Auch ist die Überlagerung von flächigen und linienhaften Abbildungsbestandteilen möglich. Gleichzeitig ist der Aufwand für die Erstellung der Vorlage deutlich größer und praktisch nur durch Handarbeit zu bewerkstelligen. [Laufenberg und Löttsch, 1995, S. 15]

Das Format tastbarer Abbildungen ist nicht nur aufgrund wirtschaftlicher und technischer Überlegungen begrenzt. Ist die Erfassung des Objektes mit beiden Händen erwünscht (die sogenannte Beidhandzone, bzw. der Handtastraum) beschränkt sich die nutzbare Fläche auf einen Bereich von ca. 40 cm · 30 cm direkt vor der Person, ohne dass diese ihre Sitzposition verändern müsste. Der Armtastbereich, in dem einhändiges Tasten möglich ist (Einhandzone) erweitert diesen Bereich auf etwa 40 cm · 100 cm im Querformat. Bei Heranwachsenden sind diese Bereiche u.U. deutlich kleiner. [Beyer, 1995, S. 33] Das eigentliche Ertasten des

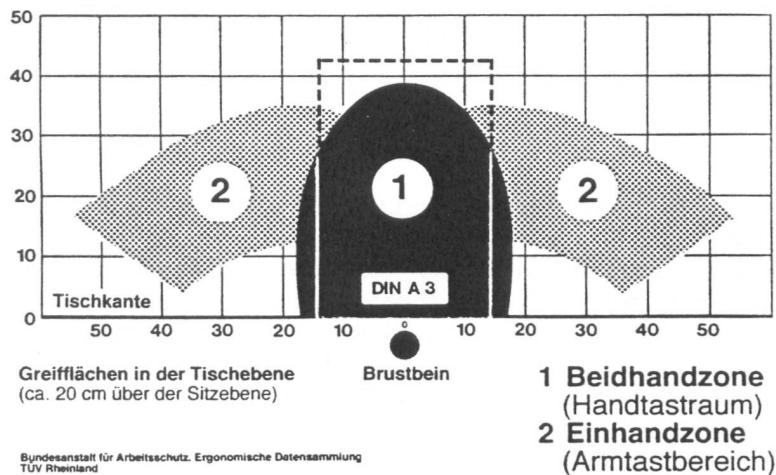


Abbildung 5.2: Tastraum einer Erwachsenen Person (Quelle: Beyer [1995, S. 33]).

Inhaltes geschieht i.d.R. beidhändig. Dabei übernehmen die Zeigefinger eine führende Rolle, wobei durchaus auch weitere Finger aktiv am Tastprozess beteiligt sein können. Es lassen sich beim Tastvorgang zwei Phasen unterscheiden. Die erste Phase ist das orientierende Tasten, in der die Ausdehnung der Darstellung festgestellt sowie die Anzahl und Anordnung von Einzelobjekten geprüft wird. In der zweiten Phase, dem erkennenden Tasten, werden danach die aufgefundenen Bestandteile im Detail untersucht. [Laufenberg und Löttsch, 1995, S. 14]

Die Qualität tastbarer Darstellungen für Blinde lässt sich anhand von Kriterien beurteilen, wie sie von Laufenberg und Löttsch [1995, S. 16 f.] sowie Fromm [1995, S. 28] dargestellt werden. Die nachfolgend aufgeführten Kriterien stellen eine Auswahl dar.

Taktile Darstellungen zeichnen sich generell durch eine blindengerechte Gestaltung aus. Damit sind unter anderem die o.g. technischen Umsetzungsmöglichkeiten oder die weiter unten aufgeführten Überlegungen zu den Abmessungen gemeint. Allgemein gilt, dass Abbildungen eindeutige taktile Wahrnehmungen ermöglichen müssen, d.h. die Darstellung ist auf das Wesentliche beschränkt, die typischen Merkmale sind hervorgehoben und die Konturen klar. Linien werden in Darstellungen nur dann verwendet, wenn der zugrundeliegende Sachverhalt selbst einen Liniencharakter aufweist. Unterschiedliche Merkmale müssen sich deutlich voneinander unterscheiden. Der individuelle Entwicklungsstand des Betrachters, im Hinblick auf seine Tastfähigkeiten, muss ebenso Berücksichtigung finden. Tastbare Darstellungen sollten ohne weiteres auch immer für Sehende ästhetisch sein.

Besonders bedacht werden muss die Einbindung von Text in eine Darstellung, etwa in Form einer Legende. Dies kann durch Setzen einer Markierung und der Platzierung des Textes in

einer Legende außerhalb der eigentlichen Darstellung geschehen. Weiterhin ist die Verwendung von Pfeilen möglich, um Raum zwischen den ausladenden Braille-Beschriftungen und der Grafik zu schaffen. Hierbei muss jedoch der Pfeil als solcher verstanden werden und der Bezug von Text und Grafik klar erkennbar sein. Auch der vollständige Verzicht auf Text innerhalb der Grafik, kann sich als förderlich erweisen, wenn die Erklärungen in einem Fließtext oder durch einen Partner bereitgestellt werden. Dadurch ergeben sich nach Laufenberg und Löttsch [1995] wiederum drei Kategorien von Tastabbildungen, die sich hinsichtlich der Art und des Umfangs von Beschriftungen unterscheiden:

- Volltext Abbildungen
- Markierte Abbildungen
- Textfreie Abbildungen

Die Ausrichtung von Diagrammbeschriftungen erfolgt grundsätzlich horizontal. Sollten die Umstände dies erfordern, kann sie hilfsweise vertikal erfolgen. Dabei verläuft die Beschriftung auf der linken Seite eines Diagramms von unten nach oben, auf der rechten Seite wird sie umgekehrt von oben nach unten verlaufend angebracht.

Fromm [1995] fordert abschließend, die erstellten Abbildungen vor ihrem eigentlichen Einsatz durch blinde Personen erproben zu lassen, um eine ausreichende Qualität gewährleisten zu können.

Neben den reinen Gestaltungsaspekten, deren teilweise subjektiver Charakter bereits angesprochen wurde, sind besonders solche Inhalte mit Schwierigkeiten behaftet, die sich auf optische Phänomene beziehen und anderweitig der Erfahrungswelt von Sehenden entspringen. Dies betrifft auch die Frage von Projektionen, wie sie im astronomischen Bereich beispielsweise bei der Betrachtung des Effektes der Parallaxe auftreten (vgl. Laufenberg und Löttsch [1995, S. 13]). Sie bedürfen der besonderen Aufmerksamkeit und ggf. auch der Ergänzung um gegenständliche Modelle.

5.3 Auswahl der Inhalte

Die Auswahl einzelner Themen, die in Modelle umgesetzt werden sollen, geschieht anhand eines dreistufigen Verfahrens. Zunächst findet die Frage der notwendigen Beobachtungstechnik und Auswertungsmethodik Berücksichtigung, weiterhin wird der schulische Astronomieunterricht herangezogen und schließlich soll auch die Nutzung verschiedener Sinneskanäle beachtet werden.

Die klassische Astronomie, die sich rein auf die Beobachtung des Sternhimmels mit dem Auge beschränkte, ist im Modell „räumliches Sternbild“ berücksichtigt. Ausgehend von der Erscheinung an der scheinbaren Himmelskugel werden die tatsächlichen Verhältnisse besprochen, deren Erfassung instrumentelle Beobachtungen erfordern.

Ein bekanntes Phänomen, welches sich bereits mit einem Fernglas (und geeignetem Filter) selbst wahrnehmen lässt, sind die Sonnenflecken als Erscheinung der Sonnenaktivität. Deutlich komplexere Beobachtungen, in Form exakter Entfernungsbestimmungen und spektroskopischer Untersuchungen, finden Eingang in das Modell „Hauptreihensterne“. Es reproduziert Erkenntnisse der modernen Astrophysik und den daraus resultierenden Erkenntnisgewinn. Schließlich werden mit dem „elektronisch-akustischen Positionswinkelmesser“ eigene astronomische Beobachtungen an der Sonne ermöglicht.

Die schulische Bedeutung der ausgewählten Modelle lässt sich anhand der Ergebnisse der Lehrplananalyse (Kapitel 3.2.3) ansehen. Das Modell „räumliches Sternbild“ betrifft zunächst das Thema der Sternbilder sowie auch die scheinbare Helligkeit als Entfernungsmaß. Die Sonnenaktivität, als ein sehr häufig anzutreffendes Thema des Themenfeldes „Bestandteile, Objekte und Modelle“ wird durch das Modell „Sonnenflecken“ abgedeckt. Das Modell „Hauptreihensterne“ findet sich mehr oder weniger direkt an vielen Stellen der Lehrpläne. Zum einen in Form der Behandlung der Zustandsgrößen von Sternen, dem Hertzsprung-Russell-Diagramm, sowohl in Form eines Zustands- wie auch Entwicklungsdiagrammes und im Zusammenhang mit stellarkosmogonischen Überlegungen. Die Durchführung eigener Beobachtungen ist schließlich eine Forderung, die sich in nahezu allen Lehrplänen findet und durch die Bereitstellung eines geeigneten Instrumentes auch für Blinde und Sehbehinderte erfüllt werden soll.

Bei der Auswahl der Themen standen lernpsychologische begründete Anforderungen nach der Nutzung möglichst unterschiedlicher Sinneskanäle im Mittelpunkt der Überlegung (vgl. Kapitel 4).

5.4 Grundlegende Anforderungen an Modelle

Bei der Modellentwicklung müssen einige grundsätzliche fachdidaktische Überlegungen berücksichtigt werden, um schließlich Modelle zu erhalten, die fruchtbringend im Unterricht eingesetzt werden können. Dabei sollen insbesondere die Ziele des Verständnisses von Modellen erreicht werden, wie sie im Abschnitt 5.4.1 dargestellt werden. Dabei sind sowohl fachliche als auch fachdidaktische Faktoren einzubeziehen. Legt man als Ziele die – abgesehen von notwendigen Elementarisierungen und den bereits aufgezeigten sehbehindertenspezifischen Methoden – richtige und vollständige Wiedergabe der grundlegenden Sachverhalte und die Vermeidung der Entstehung von Fehlvorstellungen fest, so sollten sich Modelle erstellen lassen, die für Sehende wie auch für Blinde gleichermaßen geeignet sind.

Das folgende Kapitel soll, nach einer kurzen Einführung zur Bedeutung von Modellen im Unterricht, einen Überblick über die Klassifikation von Modellen sowie ihre allgemeinen Anforderungen darstellen. Abschließend wird aufgezeigt, wie diese Grundlagen auf die Modellentwicklung angewandt werden.

5.4.1 Zur Bedeutung von Modellen im Unterricht

Bei Schülern ist die Vorstellung weit verbreitet, dass die naturwissenschaftliche Sicht eine wahrheitsgetreue Kopie der Wirklichkeit darstellt. Auch ist die Ansicht verbreitet, physikalische Gesetze und Theorien ließen sich durch Experimente beweisen. Diese Sicht auf die Naturwissenschaften bleibt zumindest über weite Teile der Sekundarstufe I unverändert, was die Frage nach Interventionsmöglichkeiten aufwirft. Die Forderung nach erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Betrachtungen der Physik oder das verstärkte Reflektieren der Denk- und Arbeitsweisen der Naturwissenschaften, könnten hier Abhilfe schaffen. Auch Wagenschein forderte die „scharfe Unterscheidung zwischen Phänomen und Modell“ (zitiert nach Leisner-Bodenthin [2006, S. 92]).

Das Modell, im naturwissenschaftlichen Sinn, lässt sich dabei folgendermaßen definieren:

Ein Modell ist ein von einem Subjekt für bestimmte Zwecke und für eine bestimmte Zeit benutzter bzw. geschaffener Gegenstand oder theoretisches Konstrukt derart, dass zu bestimmten Elementen des Modells Analogien zu Elementen des Objektes bestehen. (nach [Kircher, 2009a, S. 739])

Die Erkenntnisgewinnung seitens des Subjekts (über das Objekt) erfolgt dabei über die Analogie, die zwischen Modell und Objekt besteht. Bei der Analogie handelt es sich dabei um eine partiell isomorphe Abbildung des Objektes, d.h. das Modell bildet nicht sämtliche Eigenschaften des realen Objektes ab und kann andererseits auch Eigenschaften aufweisen, die auf Seiten des Objekts nicht vorhanden sind. [Kircher, 2009b, S. 738 ff.]

Für die nachfolgenden Zwecke genügt eine pragmatische Modelldefinition.

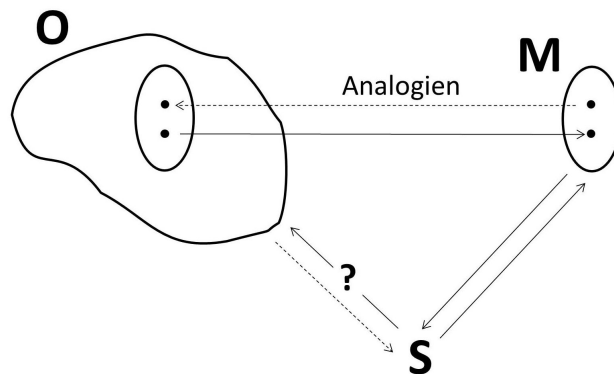


Abbildung 5.3: Prozess der Erkenntnisgewinnung am Modell (nach Kircher [2009b, S. 738]).

Hat der Unterricht den Aufbau von Modellverständnis zum Ziel, so ergeben sich nach Leisner-Bodenthin [2006, S. 93 f.] folgende Aussagen zu Modellen, die den Lernenden bekannt sein sollen:

- Physikalische Modelle werden vom Menschen geschaffen wenn
 - die Grenzen der direkten Wahrnehmung erreicht sind.
 - Objekte oder Mechanismen erklärt werden, die nicht beobachtbar sind.
- Zur Modellentwicklung sind Spekulationen, Intuition und Abstraktion notwendig.
- Modelle sind nicht richtig oder falsch, sondern zweckmäßig.
- Modelle sind hypothetisch und vorläufig.
- Modelle müssen sich in der wissenschaftlichen Gemeinschaft durchsetzen.

Bezieht man diesen Ansatz nun auf astronomische Inhalte im Schulunterricht wird deutlich, wie stark sich die Astronomie auf Modelle stützt und wie häufig eben diese Modellvorstellungen selbst wiederum Thema des Unterricht sind und sein müssen. Dies zeigt sich etwa beim häufigen Wechsel von Perspektiven und Weltbildern: So wird bei der Betrachtung der täglichen Bahn der Sonne oder der Bewegung des Mondes zunächst meist implizit von einer geozentrischen Betrachtung ausgegangen und erst danach von der scheinbaren auf die tatsächliche Bewegung der Himmelskörper geschlossen. Auch bei den wahren Bewegungen findet sich der Wechsel zwischen Modellvorstellungen. Oftmals ist die Annahme einer perfekten Kreisbahn ausreichend, etwa bei der Frage nach der Stellung der Himmelskörper zueinander, während an anderer Stelle (z.B. für die Erklärung der unterschiedlichen Länge der Jahreszeiten) der Übergang zu Ellipsenbahnen notwendig wird. Der Wechsel zwischen und die Erweiterung dieser Modellvorstellungen macht den vorläufigen und modellhaften

Charakter der Vorstellungswelten deutlich. Auch die jeweilige Neukonstruktion des verwendeten Modells, im Hinblick auf die zu untersuchenden Aspekte des Objektes, kann hier für Lernende gut nachvollziehbar thematisiert werden.

5.4.2 Vertiefung des Modellbegriffs und der Modellklassifikation

Nachfolgend werden die Ausführungen zum Modellbegriff und der Modellklassifikation aufgegriffen, die bereits in Kapitel 5.4.1 einleitend dargestellt wurden.

Kuhn [1977] unterscheidet vier Situationen in denen Modelle in der Physik zum Tragen kommen. Die jeweilige Funktion die ein Modell in der jeweiligen Situationen übernehmen kann ist:

- Idealisierung im Grundbereich einer physikalischen Theorie,
- Veranschaulichung einer physikalischen Theorie,
- Näherung und Idealisierung des mathematischen Konzepts einer physikalischen Theorie,
- Analogie zur Auffindung der Zuordnungsregeln und Hypothesen bei der Verknüpfung des Grundbereichs mit der mathematischen Theorie.

Ein bekanntes Beispiel einer *Idealisierung* ist die Beschreibung der Bahnen der Planeten und des Mondes durch Kreisbewegungen, wie es etwa von Ptolemäus geleistet wurde. Die physikalische Realität bleibt dabei zunächst unabhängig vom Wirklichkeitsbereich der Theorie.

Astronomische Modelle zur *Veranschaulichung* einer Theorie existieren in Form von gegenständlichen Modellen, etwa als Planetarien, zur Abbildung des Aufbaus des Sonnensystems. Hier wird die Gravitationstheorie durch ein materielles Modell dargestellt. Historisch bedeutsam war hier das Sphärenmodell des Eudoxos aus dem 4. vorchristlichen Jahrhundert.

Im Bereich der *Analogien* ist als astronomisches Beispiel die Postulierung von Hypothesen zum geozentrischen Weltbild durch Galilei zu nennen. Er nutzte die Analogie zwischen dem Mondsystem Jupiters und dem Sonnensystem als Ganzes.

Nach Kircher [1995, S. 103] ist bei der Modellbildung u.a. die Beschränkung auf gewisse Attribute (Verkürzungsmerkmal) die notwendige Voraussetzung, um den Modellbegriff verwenden zu können. Im Falle einer vollständigen Abbildung sämtlicher Attribute würde es sich nicht um ein Modell, sondern um eine Kopie handeln. Es gelten weitere Einschränkungen bzw. Erweiterungen des auch hier zugrundeliegenden Modellbegriffes (siehe Kapitel 5.4.1), wie etwa die fehlende Beschränkung auf Modellvorstellungen im Sinne von rein theoretischen Modellen. [Kircher, 1995, S. 142]

Um die vorgestellten Modelle fachdidaktisch einordnen zu können, wird im Folgenden auf die Modellklassifikation nach Kircher [1995, S. 138] zurückgegriffen (siehe Abb. 5.4). Dementsprechend lassen sich die entwickelten Modelle dieser Arbeit einordnen:

Auf Basis der *naturwissenschaftlichen* Fachdisziplin werden *didaktische Modelle* für die Lehre entwickelt. Dabei weisen die Modelle sowohl Merkmale *struktureller*, wie auch *gestaltähnlicher Modelle* auf. Sie sind in Form *gegenständlicher Modelle* im engeren Sinn realisiert.

5.4.3 Eigenschaften von Modellen

Allgemein lassen sich aus fachdidaktischer Perspektive nach Kircher [1995, S. 115 ff.] folgende Anforderungen an Modelle festlegen:

- Anschaulichkeit
- Einfachheit
- Transparenz
- Vertrautheit
- Produktivität
- Bedeutsamkeit

Zum Attribut der *Anschaulichkeit* werden zwei Interpretationen angeboten. Eine physikalische Theorie oder ein Objekt kann als anschaulich gelten, wenn sie auf Begriffe zurückgreift, die dem Subjekt bekannt sind und an deren Verwendung es sich gewöhnt hat. Die Erinnerung bietet bildhafte Darstellungen oder Experimente, die theoretische Begriffe anschaulich machen.

Eine andere Sichtweise bezeichnet Strukturen dann als anschaulich, wenn sie sich durch Vergrößerung oder Verkleinerung auf eine alltägliche Größe bringen lassen und dadurch ihre Anschaulichkeit erhalten. Dies kann etwa bei Molekülen oder auch dem Planetensystem der Fall sein. Strukturen bei denen eine Skalierung um einen beliebigen Faktor nicht zu einer sinnvollen Entsprechung auf alltäglichen Größenskalen führt, müssen als nicht anschaulich gelten. [Kircher, 2009b, S. 745 f.]

Die Anforderung der *Einfachheit* wird durch eine Beschränkung des Modells auf wenige Elemente erreicht. Abseits von Betrachtungen zu theoretischen Modellen, deren Einfachheit sich durch ihre Stellung innerhalb einer Theorie, von ihrer Zugänglichkeit für empirische Überprüfungen, ihre Auswirkungen auf das Gesamtsystem der Physik sowie durch den Verzicht auf die Einführung von neuen Naturgesetzen auszeichnen, kann bei gegenständlichen Modellen die Einfachheit auch durch wiederholte Auseinandersetzung und steigende Vertrautheit des Subjektes mit dem Modell hergestellt werden.

Zum Kriterium der *Transparenz* heißt es bei Kircher:

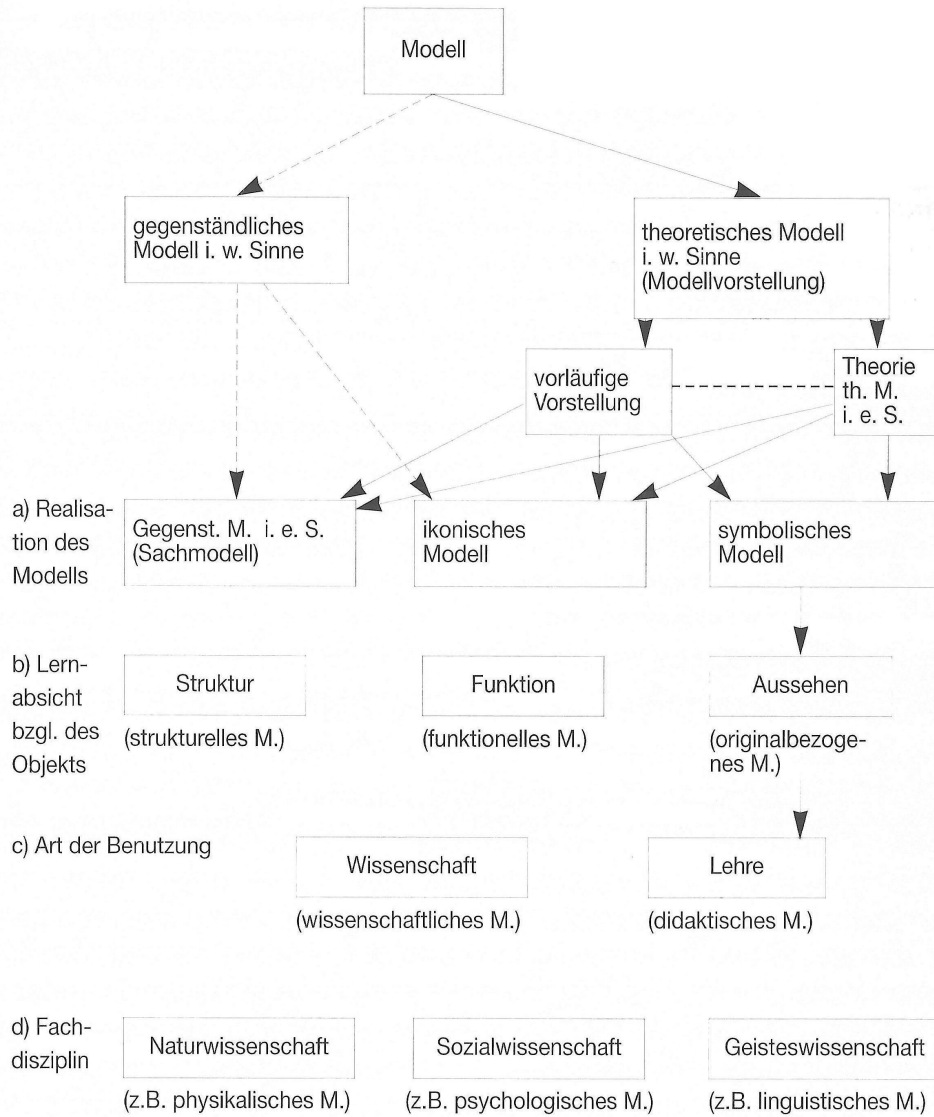


Abbildung 5.4: Modellklassifikation nach Kircher [1995].

Die Transparenz eines Modells hängt von der Klarheit und Eindeutigkeit der kognitiven Struktur (vgl. Ausubel 1974, 137) ab und von einer klaren, transparenten Repräsentation des Modells. [Kircher, 1995, S. 145]

Die Transparenz seitens des Modells soll dabei durch die Struktur der Begriffe sowie der Repräsentation der Begriffe und ihrer Zusammenhänge gesichert werden. [Kircher, 1995, S. 121]

Um eine *Vertrautheit* mit dem Modell zu erreichen, ist im Sinne Ausubels eine stabile kognitive Struktur notwendig. Dazu kommen affektive Komponenten, die eine Vertrautheit mit dem Modell – über ein reines Wiedererkennen hinaus – ermöglichen.

Ein Modell gilt als *produktiv*, wenn seine Attribute in mindestens einem weiteren Objekt zu finden sind, d.h. man darf darauf hoffen, mit dem Modell weitere Objekte beschreiben zu können. Im Fall der in dieser Arbeit beschriebenen, gegenständliche Modelle ist das Produktivitätskriterium kaum zu erfüllen, da es sich auf theoretische Modelle bezieht, hier jedoch Modelle von Objekten bzw. Objektklassen gebaut wurden, deren unmittelbare Übertragbarkeit damit von vorn herein nicht unmittelbar gegeben sein kann.

Gleichwohl lässt sich durch die Einheitlichkeit bei der Art der Umsetzung eine größere Vertrautheit bei der weiteren Bearbeitung astronomischer Inhalte im Unterricht erreichen. In diesem engeren Sinne kann auch hier von einer Form der Produktivität gesprochen werden.

Der letzte Punkt in der Liste der Eigenschaften von Modellen besitzt im Rahmen dieser Arbeit einen besonderen Stellenwert. Die *Bedeutsamkeit* eines Modells zeichnet sich – aus konstruktivistischer Sicht – dadurch aus, dass ein bedeutsamer Sinnesreiz von ihm ausgeht und es so in den Bereich der bewussten Wahrnehmung rückt. Dabei werden irrelevante Eigenschaften unterdrückt. Die Bedeutsamkeit des Reizes hängt dabei jedoch nicht allein von biologischen Aspekten ab, sondern auch von Interessen und Einstellungen des Subjektes, seinem inneren Wertesystem, sowie seiner Motivation. Es wird argumentiert, dass die Beeinflussung des Schülers in der Wahrnehmung und im Denken nur über ähnliche Vorerfahrungen geschehen kann, an die im Unterricht angeknüpft wird. [Kircher, 1995, S. 145 f.]

5.4.4 Anwendung auf die Modellentwicklung

Anhand der vorangehend skizzierten fachdidaktischen Anforderungen, lassen sich die folgenden Ansprüche an astronomische Modelle für Sehbehinderte ableiten. In Klammern angegeben sind jeweils Kriterien nach Kircher, die durch die genannten Forderungen erfüllt werden.

- Die Inhalte der Modelle sollten für die Lernenden unmittelbar oder durch einfache Hilfsmittel zugänglich sein (Einfachheit, Transparenz, Anschaulichkeit).

- Die Modelle sollten Formen der sinnlichen Wahrnehmung ansprechen, die möglichst direkt mit dem betrachteten Phänomen assoziiert sind (Einfachheit, Anschaulichkeit, Transparenz).²³
- Die Modelle sollten Formen der sinnlichen Wahrnehmung nutzen, die selten zur Vermittlung von Lerninhalten herangezogen werden (Bedeutsamkeit).
- Funktion und Inhalt sollen sich weitgehend ohne zusätzliche Informationen erschließen lassen (Einfachheit, Transparenz, Anschaulichkeit).
- Das Modell sollte durch die Form seiner Realisierung nicht vom eigentlichen Inhalt ablenken oder diesen überdecken (Einfachheit, Transparenz, Anschaulichkeit).
- Die Modelle sollten sich auf die wesentlichen Inhalte beschränken (Einfachheit).
- Die Modelle sollten bereits bekannte Elemente der Umsetzung wiederholt aufgreifen (Vertrautheit, Produktivität).

5.4.5 Modelle aus schulpraktischer Perspektive

In den nun angestellten Vorüberlegungen sollen diejenigen Anforderungen und Rahmenbedingungen entwickelt werden, die für einen erfolgreichen Einsatz erforderlich erscheinen. So sind im Hinblick auf die angestrebte Verwendung zu Unterrichtszwecken primär in Schulen, in Anbetracht der schulpraktischen Realität, einige grundlegende Anforderungen und Einschränkungen zu definieren.

Hinsichtlich der besonderen zeitlichen Rahmenbedingungen an Schulen und der generellen Einsatzmöglichkeit der Modelle, ist auf eine möglichst unkomplizierte Inbetriebnahme zu achten. Dies gilt einerseits für die technischen Gegebenheiten am Einsatzort, wie auch für den Zeitbedarf der vorbereitenden Handlungen. Daraus lassen sich folgende Anforderungen aufstellen:

- Der Betrieb sollte – sofern auf Elektrizität nicht verzichtet werden kann – mit Netzspannung oder einem Netzgerät möglich sein, welches typischerweise an Schulen vorhanden ist.
- Die Inbetriebnahme sollte kein oder nur leicht zu beschaffendes zusätzliches Material voraussetzen.²⁴
- Die Inbetriebnahme des Modells sollte – sofern es nicht bereits ohne weitere Vorbereitung nutzbar ist – in kurzer Zeit möglich sein.
- Die zu vermittelnden Inhalte sollten unmittelbar zugänglich sein – d.h. das Modell ist eigenständig nutzbar.

²³So sollte etwa die Temperatur eines Sterns Ausdruck in der Temperatur des Modells finden.

²⁴Wasser ist in diesem Sinne ein leicht beschaffbares Hilfsmittel. Größere Mengen Eis fallen hingegen nicht darunter.

- Der zu vermittelnde Inhalt und seine Repräsentation im Modell stehen in direkten Bezug zueinander, auf Interpretationen kann demnach verzichtet werden.
- Es werden selten genutzt Formen der Sinneswahrnehmung²⁵ angesprochen um eine verbesserte Verankerung im Gedächtnis zu erreichen.
- Die Nutzung muss für sehende und blinde Lernende gefahrlos möglich sein.
- Herstellungskosten und Produktionsaufwand sollten sich in einem Rahmen bewegen, der auch Schulen den Nachbau der Modelle erlaubt.

Jedes Modell wird auf seine Übereinstimmung mit diesen Kriterien untersucht. Die Ergebnisse werden jeweils in einer Tabelle²⁶ zusammengefasst (vgl. Mustertabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Mustertabelle für einen Kriterienkatalog.

Kriterium	erfüllt?
Betrieb ohne Spannungsquelle oder mit Netzteil?	
Betrieb ohne Zusatzmaterial?	
Kurze Vorbereitungszeit?	
Inhalte unmittelbar zugänglich?	
Direkte Assoziation des Modells mit Inhalt?	
Selten genutzte Wahrnehmungsform angesprochen?	
Nutzung gefahrlos möglich?	
Niedriger Produktionsaufwand?	

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass nicht bei allen Modellen jederzeit sämtliche genannten Punkte vollumfänglich umgesetzt werden können. Wo immer die Qualität der Erfahrung für die Lernenden unter den genannten Einschränkungen zu leiden hätte, werden diese, soweit notwendig, zurückgestellt. Details zu diesen Überlegungen finden sich in den Abschnitten, in dem die jeweiligen Modelle erläutert werden.

²⁵Hiermit sind Wahrnehmungsformen abseits der Tastwahrnehmung gemeint.

²⁶Hauptreihensterne (Tab. 6.5, S. 91), Räumliches Sternbild (Tab. 6.10, S. 104), Sonnenflecken (Tab. 6.12, S. 122), Winkelmesser (Tab. 6.15, S. 140).

6 Entwicklung astronomischer Modelle für Blinde und Sehbehinderte

Wie im Kapitel 1.2 dargelegt, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit kein in sich geschlossener Astronomiekurs erarbeitet. Vielmehr geht es darum, für einige ausgewählte Themenfelder, beispielhaft Möglichkeiten zur Umsetzung aufzuzeigen. Nachdem im Kapitel 5 verschiedene Zugänge zur Vermittlung astronomischer Inhalte aufgezeigt und wahrnehmungsphysiologische Besonderheiten diskutiert wurden, soll nun die Umsetzung des Inhaltes dargestellt werden.

Um den praktischen Nutzen der vorgestellten Modelle zu erhöhen sowie eine sinnvolle Erprobung zu ermöglichen, stehen die vorgestellten Modelle nicht für sich allein, sondern sind jeweils in einen Rahmen aus einem Schülertext mit Arbeitsaufträgen sowie ergänzenden tastbaren Grafiken eingebettet.

6.1 Modell I: Tastbare Hauptreihensterne

6.1.1 Zielsetzung

Das Modell „Tastbare Hauptreihensterne²⁷“ stellt den Zusammenhang zwischen Radius und Oberflächentemperatur für Hauptreihensterne dar. Durch spektroskopische Untersuchungsverfahren können Rückschlüsse auf die Oberflächentemperatur der Sterne gezogen werden. Grundlage hierzu ist die Einteilung in Spektralklassen. Weiterhin lassen sich durch Analyse verschiedener Spektralliniengruppen Sterne bestimmten Leuchtkraftklassen zuteilen, die letztlich ein Maß für ihre absolute Helligkeit sind.

Die Kombination von Oberflächentemperatur (bzw. Spektralklasse) und absoluter Helligkeit (bzw. Leuchtkraftklasse) führt in Form einer grafischen Darstellung auf das wohlbekannte Hertzsprung–Russell–Diagramm (HRD), indem jeder Stern mit gegebener Kombination der soeben genannten Zustandsgrößen einen Bildpunkt darstellt.

Das HRD ist das wichtigste Zustandsdiagramm der gesamten stellaren Astrophysik, dementsprechend wird ihm auch im Schulunterricht eine große Bedeutung beigemessen. Didaktische Schwierigkeiten, hier natürlich im Hinblick auf „sehende Schüler“ zu verstehen, ergeben

²⁷Ein Übersichtsartikel zu diesem Modell wurde erstmals im Jahre 2012 veröffentlicht: Kraus [2012].

sich immer wieder daraus, dass alle Sterne, so unterschiedlich auch ihre Zustandsgrößen sein mögen, nur als Bildpunkte im Diagramm repräsentiert sind, und dass Häufungsgebiete im Diagramm auch aus der Sternentwicklung heraus zu interpretieren sind. Für blinde oder sehbehinderte Schüler bestehen diese Schwierigkeiten natürlich ebenso, hinzu kommt die Einschränkung, dass ihnen selbst ein tastbar gestaltetes HRD niemals in einer „Gesamtschau“ zugänglich ist. Aus diesem Grund wird angestrebt, Sternsequenzen aus ausgewählten Häufungsgebieten modellhaft nachzuempfinden, ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei natürlich auf sonnenähnlichen Hauptreihensternen. Hier ergibt sich zusätzlich der Vorteil, dass man eine eindeutige Relation zwischen Strahlungsleistung der Sterne, Temperatur und Sternradius herstellen kann.

Ein Modell zur Darstellung der geschilderten Beziehung zwischen der Größe eines Sterns und seiner Oberflächentemperatur kann und sollte darauf verzichten, zusätzliche Informationen zu beinhalten. Naheliegender ist, die Temperatur des Sterns auch im Modell durch eine erwärmte Kugel umzusetzen. In Bezug auf die primäre Zielgruppe des Modells, ist die Nutzung einer Wärmequelle von besonderem Nutzen. So wird das Wärmeempfinden im Unterricht selten angesprochen um tiefere Informationen über das Offensichtliche hinaus zu vermitteln. Es ist daher zu erwarten, dass die unmittelbare Assoziation ein eindrückliches Erlebnis hervorruft, welches lange im Gedächtnis bleibt.

6.1.2 Fachlicher Hintergrund

Ermittlung der Zustandsgrößen

Bedeutende Zustandsgrößen von Sternen sind deren Masse, Radius, Oberflächentemperatur sowie die Leuchtkraft. Nicht alle Größen sind jedoch der direkten Beobachtung zugänglich.

Relativ einfach ermitteln lässt sich die Oberflächentemperatur. Sterne ähneln schwarzen Strahlern, d.h. ihre Farbe – oder genauer ihr Farbindex $B-V$ ²⁸ – ist ein Maß für ihre Oberflächentemperatur. Die mittels Farbindizes ermittelten Oberflächentemperaturen nennt man auch Farbtemperatur. Dabei entspricht ein Intensitätsmaximum bei niedrigen Wellenlängen, also dem roten Bereich des sichtbaren Lichtes, einer niedrigen Temperatur. Heiße Sterne erscheinen uns hingegen blau (siehe Abb. 6.1).

Auch in den Spektren von Sternen sind Informationen enthalten, die uns Rückschlüsse auf ihre Temperatur ermöglichen. Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Versuche unternommen, Sternspektren anhand bestimmter Merkmale in Kategorien zu sortieren. Die auch heute noch gebräuchliche Einteilung – die sogenannte Harvard-Klassifikation – wurde von Edward Charles Pickering (1846 – 1919) und seinen Mitarbeiterinnen erarbeitet. Sie machten sich die Tatsache zu nutze, dass alle Sterne Absorptionslinien aufweisen, die in

²⁸Für den Farbindex $B-V$ werden Daten von Beobachtungen bei 435 nm (B) und 555 nm (V) verwendet.

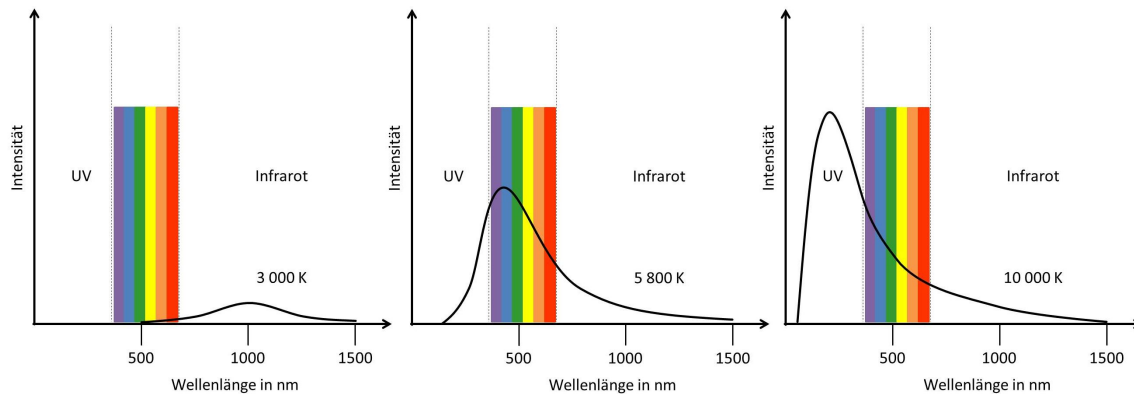


Abbildung 6.1: Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Farbe eines Sterns (nach Comins [2011, S. 307]).

ihrer Anzahl sowie ihrer Ausprägung unterschiedlich ausfallen. Die anfängliche phänomenologische Einteilung nach der Stärke der Balmerlinien und das spätere Umsortieren anhand der Temperatur, ergab die heute bekannte Reihenfolge der Spektralklassen:

O B A F G K M

Sterne der Spektralklasse O weisen eine besonders hohe Oberflächentemperatur und damit ein Intensitätsmaximum im kurzwelligen Bereich des Spektrums auf, während die Sterne am anderen Ende der Klassifikation kühl und rot sind. Heiße Sterne zeigen wenige Absorptionslinien, komplexe Moleküle können in ihren Atmosphären nicht existieren. Dafür finden sich Linien mehrfach ionisierter Atome, etwa von Helium. Kühle Sterne weisen hingegen eine große Zahl von Linien auf, beispielsweise von Titanoxid. Tabelle 6.1 gibt eine Auswahl von Sternen und ihrer beobachtbaren Merkmale wieder.

Durch neue Beobachtungstechniken wurde die Spektraleinteilung weiter verfeinert, sodass die Ursprungsklassen heute jeweils dezimal in zehn Unterklassen eingeteilt ist. Die Sonne wird nach diesem Schema der Spektralklasse G2 zugeteilt (vgl. de Boer [2001, S. 164]).

Unter Kenntnis des Abstandes zweier Sterne – der für nahe Sterne durch die jährliche Parallaxe ermittelt werden kann – verglich Ejnar Hertzsprung (1873 - 1967) deren absoluten Helligkeiten miteinander. Er stellte dabei fest, dass Sterne mit ähnlicher Oberflächentemperatur, d.h. vergleichbarer Farbe, durchaus sehr unterschiedliche Helligkeiten aufweisen können. Er erklärte dies mit unterschiedlichen Radien der Sterne, die für die absolut hellsten Sterne am größten sein müssen.

Ausgehend vom Spektrum eines Sterns lassen sich ebenfalls direkt Rückschlüsse auf seine Leuchtkraft ziehen. Unterschiedlich breite Linien bei gleicher Temperatur deuten auf einen höheren Oberflächendruck hin. Die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche ist letztlich

Tabelle 6.1: Harvard-Klassifikation mit Beispielen für Temperaturen und Farben der Sterne (nach Beckmann [2011, S. 120]).

Spektralklasse	Oberflächentemperatur in K	Farbe	Beispiel
M	3 500	rot	Antares, Beteigeuze
K	4 000	gelb, rötlich	Arktur, Aldebaran
G	5 000 - 6 000	gelb	Capella, Sonne
F	6 000 - 8 000	gelb, weiß	Prokyon
A	8 000 - 12 000	weiß	Sirius, Wega
B	15 000 - 25 000	bläulich, weiß	Rigel
O	30 000 - 50 000	blau, weiß	λ Ori

durch den Sternradius R bedingt, da dessen Variationsbreite die der Masse deutlich übersteigt. Bei gleicher Temperatur T ergibt sich die Leuchtkraft eines Sterns aus (vgl. de Boer [2001, S. 164 f.]):

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4. \quad (6.1)$$

Hierbei ist σ die Stefan-Boltzmann-Konstante. Die Leuchtkraft eines Sterns wird gewöhnlich in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft (L_{\odot}) angegeben.

Entsprechend ihrer Leuchtkräfte lassen sich durch Beobachtung die Sterne in fünf Gruppen zusammenfassen.²⁹ Sie werden als Leuchtkraftklassen bezeichnet (Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Leuchtkraftklassen (Quelle: de Boer [2001, S. 165]).

Leuchtkraftklasse	Art des Sterns
I	Überriese
II	heller Riese
III	Riese
IV	Unterriese
V	Hauptreihenstern

Für die Sonne ergibt sich als Hauptreihenstern aus der Kombination von Leuchtkraft- und Spektralklasse die Kennzeichnung G2 V.

Über eine Eichung anhand von Sternen mit bekannter Entfernung, kann über die Spek-

²⁹Mitunter finden sich durch Aufnahme der Über-Überriesen (Ia-0) und Unterzwerge (VI) Erweiterungen auf sieben Gruppen. [de Boer, 2001, S. 310]

tralklasse in Verbindung mit der Leuchtkraftklasse auf die absolute Helligkeit eines Sterns geschlossen werden. Die absolute Helligkeit entspricht derjenigen scheinbaren Helligkeit, die ein beliebiger Stern in einer Entfernung von 10 pc hätte.

Unter Kenntnis beider Helligkeiten kann mittels des sogenannten Entfernungsmoduls (siehe Gleichung 6.5) die Entfernung eines Sterns bestimmt werden (Beckmann [2011, S. 117]):

$$r = 10^{0,2 \cdot (m-M)} \cdot 10 \text{ pc.} \quad (6.2)$$

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

Aufbauend auf den Arbeiten Hertzsprungs entwickelte Henry Russell (1877 – 1957) ein Diagramm, in dem er die absolute Helligkeit, als die auf 10 pc normierte scheinbare Helligkeit, gegen die Spektralklasse (mit abnehmender Temperatur) auftrug. Es stellte sich heraus, dass keineswegs alle erdenklichen Kombinationen von Leuchtkräften und Temperaturen in der Natur vorkommen – dies würde zu einer gleichmäßigen Verteilung der Punkte über die gesamte Diagrammfläche führen. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm zeigt eine deutliche Häufung, die von oben links (große Leuchtkraft, hohe Temperatur) nach unten rechts (geringe Leuchtkraft, niedrige Temperatur) verläuft – die Hauptreihe. Jeder Punkt im Diagramm entspricht dabei einem Stern, für den zunächst einmal die Entfernung genau bekannt sein musste, um auch seine Leuchtkraft bestimmen zu können. Moderne Messinstrumente wie der Hipparcos-Satellit haben die Reichweite der Entfernungsbestimmung deutlich erweitert und somit auch die zur Verfügung stehende Stichprobe von Sternen für das HRD erheblich vergrößert. Alternativ können HRDs auch von Sternhaufen, d.h. von gleich weit entfernten Sternen, anhand der scheinbaren Helligkeiten gewonnen werden.

Wird ein HRD einer bestimmten Sternpopulation (z.B. eines Sternhaufens) oder über ein bestimmtes Himmelsareal erstellt (etwa von allen sichtbaren Sternen bis zu einer bestimmten Helligkeit), so entspricht das entstehende HRD nicht der tatsächlichen Sternpopulation. Sehr massereiche Hauptreihen- oder auch Riesensterne, die aufgrund ihrer enormen Leuchtkräfte über sehr große Entfernungen sichtbar bleiben, sind ohne entsprechende Kompensation überrepräsentiert. Kühle Hauptreihensterne der Spektralklassen K und M oder auch weiße Zwerge sind dagegen nur über wenige Lichtjahre hinweg nachweisbar. Dabei vereinigen sie den größten Teil der Materie auf sich. [Ledrew, 2001, S. 33]

Hauptreihe, Riesen und Zwerge Neben der Hauptreihe zeigen sich zwei weitere Häufungsgebiete innerhalb des HRD. Die sogenannten Riesen finden sich oberhalb der Hauptreihe. Sie besitzen eine hohe Leuchtkraft aber die Temperatur von Hauptreihensternen. Gemäß Gleichung 6.1 muss bei zwei Sternen mit gleicher Temperatur, jedoch deutlich unterschiedlicher Leuchtkraft, der Radius sehr verschieden sein. Einige Riesensterne weisen Leuchtkräfte von bis zu $100\,000 L_{\odot}$ auf und damit Radien von einigen Hundert R_{\odot} .

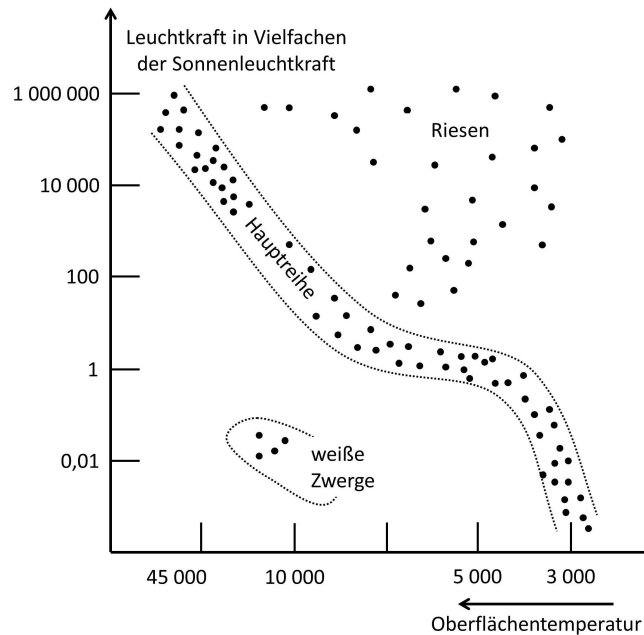


Abbildung 6.2: Hertzsprung-Russell-Diagramm – In der Form eines Leuchtkraft-Temperatur-Diagramms (nach de Boer [2001, S. 172]).

Die zweite Gruppe findet sich unterhalb der Hauptreihe, d.h. bei niedrigen Leuchtkräften und somit, im Vergleich zu den Hauptreihensternen, kleinen Radien. Gleichzeitig leuchten sie im Bereich von bläulichem oder weißem Licht, sind demnach relativ heiß. Diese Eigenschaften verleihen dieser Klasse von Sternen ihren Namen, es handelt sich um die weißen Zwerge. Tatsächlich haben weiße Zwerge lediglich einen Durchmesser, der etwa dem der Erde entspricht. Es handelt sich dabei um die Reste von Sternen, die gegen Ende ihres Daseins ihre äußeren Hüllen abgestoßen haben.

Das HRD als Zustands- und Entwicklungsdiagramm Sterne gleicher Oberfläche, bzw. gleichem Radius, jedoch unterschiedlicher Temperatur, erscheinen im HRD – bei doppelt logarithmischer Darstellung – als Geraden mit der Steigung 4 (siehe Abb. 6.3). Dies ergibt sich aus Gleichung 6.1, aus der der Zusammenhang $\lg L \sim 4 \lg T$ ersichtlich wird. Die Hauptreihe (in der Abbildung idealisiert als Linie dargestellt) schneidet die Geraden mit der Steigung 4, d.h. ihre Leuchtkraft steigt in größerem Maße, als es bei einer Proportionalität zur vierten Potenz der Temperatur der Fall wäre. Daher muss neben der Temperatur auch die Oberfläche und damit der Radius der Sterne mit wachsender Leuchtkraft steigen.

Für die Sterne der Hauptreihe – und nur für diese – lässt sich demnach verallgemeinert feststellen: Hauptreihensterne mit großem Radius müssen heißer sein, als solche mit kleineren Radien. Aus einem HRD lassen sich also Rückschlüsse auf die Zustandsgrößen und

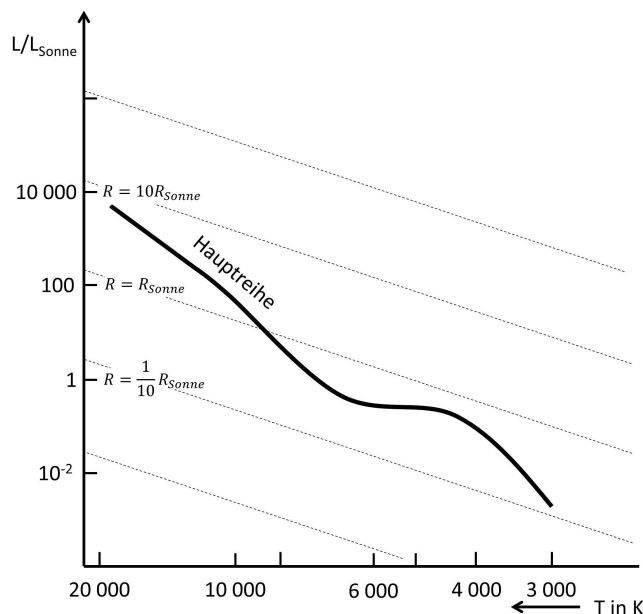


Abbildung 6.3: Idealisiertes Hertzsprung-Russell-Diagramm (nach de Boer [2001, S. 173]).

ihren Einfluss untereinander gewinnen, es wird damit als Zustandsdiagramm verwendet. (Dementsprechend lässt sich auch auf den Radius der Riesensterne zurückschließen, die große Leuchtkräfte und niedrige Temperaturen auf sich vereinen und somit sehr viel größer sein müssen, als es die Sterne der Hauptreihe sind (vgl. de Boer [2001, S. 173]).)

Mit Hilfe von HRDs kann man also Entwicklungszustände und Entwicklungswege von Sternen analysieren, es übernimmt damit die Funktion eines Entwicklungsdiagrammes. So ist etwa bekannt, dass Sterne die längste Zeit ihrer Existenz – je nach Masse können dies wenige 100 Millionen Jahre oder auch einige Dutzend Milliarden Jahre sein (Tabelle 6.3) – auf der Hauptreihe verbringen. Danach beschreiten sie einen, wiederum massenabhängigen Entwicklungsweg, der sie zu Riesensternen werden lässt. Am Ende eines Sternlebens könnte der Zustand eines weißen Zwerges oder auch der eines schwarzen Loches oder Neutronensterns stehen.

Betrachtet man mit diesem Wissen die Hertzsprung-Russell-Diagramme von kompakten Sternansammlungen, wie sie etwa in Form von Kugelsternhaufen existieren, kann deren ungefähres Alter ermittelt werden. Die Abbildungen 6.4 und 6.5 zeigen die entsprechenden Diagramme für die bekannten (Kugel)-sternhaufen M 3 und M 44. Hervorgehoben ist der Abknickpunkt der Hauptreihe (roter Pfeil), das sogenannte Knie. Er bezeichnet die Stelle, an der die Sterne die Hauptreihe verlassen haben. Die Verweildauer verschieden massereicher Sterne kann anhand ihrer Ausgangsmasse und Leuchtkraft, d.h. ihrer Energieabgabe pro Zeiteinheit, ermittelt werden.

Tabelle 6.3: Verweildauer auf der Hauptreihe für ausgewählte Spektralklassen und Sternmassen (Quelle: Beckmann [2011, S. 132]).

Spektralklasse	Masse (in m_{\odot})	Verweildauer (in a)
O5	50	$2 \cdot 10^7$
B0	20	$8 \cdot 10^7$
A0	4	$3 \cdot 10^8$
F0	2	$1 \cdot 10^9$
G0	1	$7 \cdot 10^9$
K0	0,8	$1 \cdot 10^{10}$
M0	0,5	$4 \cdot 10^{10}$

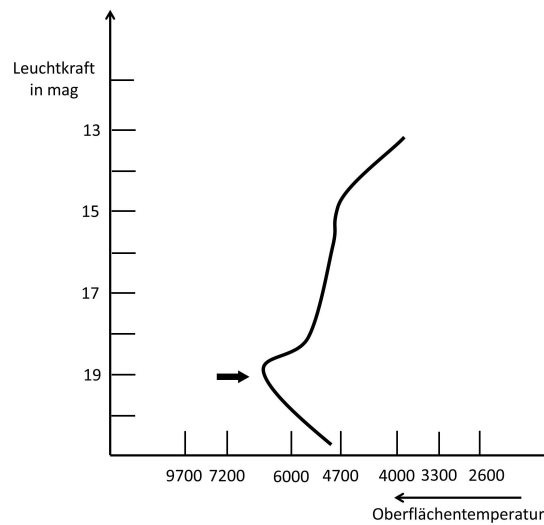


Abbildung 6.4: HRD des alten Kugelsternhaufens M 3 – Der Pfeil markiert den Abknickpunkt der Hauptreihe. Idealisierte Darstellung nach Beckmann [2011, S. 133].

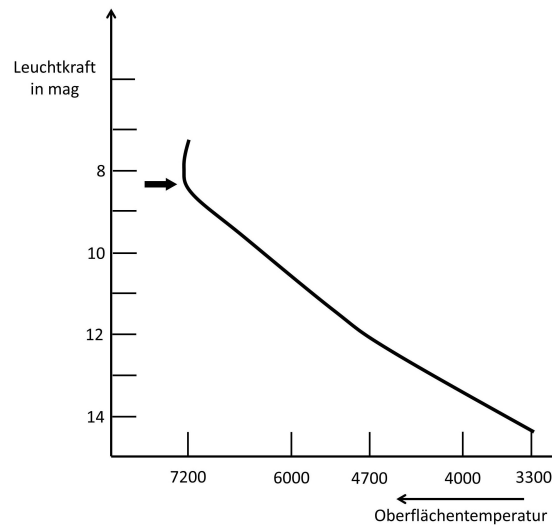


Abbildung 6.5: HRD des jungen Sternhaufens M 44 – Der Pfeil markiert den Abknickpunkt der Hauptreihe. Idealisierte Darstellung nach Beckmann [2011, S. 133].

6.1.3 Lernziele

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm tritt in den Lehrplänen einmal im Themenfeld „Bestandteile, Objekte und Modelle“ sowie im Themenfeld „Entwicklung“ mit jeweils vier Nennungen auf (vgl. Kapitel 3.2.3). Auch findet sich (mit wiederum vier Nennungen) die Forderung nach der Behandlung der Zustandsgrößen der Sterne, die thematisch eng mit der Betrachtung des HRD verknüpft ist. Die Sternentwicklung ist mit insgesamt sechs Nennungen über alle Lehrpläne hinweg sogar noch deutlich häufiger vertreten. Auch hier ist eine Einbindung des HRD naheliegend.

Daran angelehnt sollen durch Modell und Begleitmaterial die folgenden inhaltlichen Ziele vermittelt werden:

- Wichtige Zustandsgrößen der Sterne sind Temperatur und Leuchtkraft.
- Es existieren verschiedene Klassen von Sternen.
- Ein HRD stellt diese Sternklassen anhand von Zustandsgrößen dar.
- Hauptreihensterne sind die häufigsten Sterne im Universum.
- Für die Sterne der Hauptreihe gilt ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Radius und Temperatur.
- Die verschiedenen Häufungsgebiete von Sternen können als unterschiedliche Entwicklungszustände begriffen werden.

6.1.4 Umsetzung

Für das Modell „Hauptreihensterne“ ergeben sich aus den wahrnehmungsphysiologischen Überlegungen (siehe Kapitel 4.1.4) folgende Bedingungen:

- Die Temperatur der Modellsterne muss sich sehr deutlich voneinander unterscheiden;
- die Temperatur soll dabei jedoch nicht unterhalb der Raumtemperatur liegen;
- die Temperatur der Modellsterne darf die obere Grenze von $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten.

Soll eine eindeutige Differenzierbarkeit gewährleistet sein, ist man daher auf wenige Modellsterne beschränkt, die einen weiten Temperaturbereich abdecken müssen.

Bei der Umsetzung steht, neben den grundsätzlichen didaktischen und fachlichen Anforderungen, ein möglichst niedriger Preis sowie einfach zu beschaffendes Material im Vordergrund. Weiterhin soll das Modell möglichst einfach zu handhaben sein und keinen aufwendigen Zusammenbau vor der Nutzung erfordern. Auch soll die Betriebstemperatur möglichst schnell erreicht sein und über einen längeren Zeitraum hinweg gehalten werden.

Um einen authentischen Eindruck zu garantieren muss als Anforderung an das Modell eine konstante Temperatur auf der Kugeloberfläche gewährleistet sein. Diverse Versuche zeigen, dass eine solche nur bei Durchströmung der Kugel mit warmem Wasser erreicht werden kann. Eine Erwärmung durch eine Glühlampe innerhalb einer halbtransparenten Kunststoffkugel hätte mancherlei Vorteil für sehende Schüler mit sich gebracht (man denke an die Möglichkeit verschiedene Sternfarben darzustellen), schied jedoch wegen der stets ungleichmäßigen Temperaturverteilung aus (siehe auch Kapitel 6.6, für weitere verworfene Umsetzungsmöglichkeiten).

Das Modell beschränkt sich auf drei unterschiedlich große Sterne, die durch Edelstahlhohlkugeln repräsentiert werden. Dem Betrachter sind von außen lediglich drei Halbkugeln zugänglich, um für möglichst wenig Ablenkung zu sorgen. Die notwendige Technik wird durch eine einfache Holzverkleidung verborgen (Abb. 6.6). Das Modell weist auf der Vorderseite eine Höhe von ca. 40 cm auf. Das Wasser wird in zwei getrennten Behältern durch Tauchsieder erhitzt und mit Pumpen von unten in die Kugeln gepresst. Der Einsatz von Tauchsiedern ist aufgrund der notwendigen großen Wassermenge von fast 10 Litern im größeren Behälter und den weiteren genannten Anforderungen unumgänglich. Aus der Verwendung der Tauchsieder ergeben sich jedoch einige weitere Nutzungsbedingungen, wie etwa die zwingend notwendige Versorgungsspannung von 230 V oder die erhöhten Anforderungen an die Sicherheit. Die Temperaturregelung übernehmen zwei Thermostate mit externem Temperatursensor, sowie netz- und verbraucherseitigen Schutzkontaktanschlüssen, die eine ausreichend genaue Regelung von $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermöglichen (zum Aufbau siehe auch Bild 6.7). Der Durchmesser der Kugeln beträgt 9, 13 und 20 cm. Bei der kleinsten Kugel wird zugunsten der Komplexität des Aufbaus auf eine Temperierung verzichtet. Die beiden anderen Kugeln werden auf Temperaturen von $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ gebracht.



Abbildung 6.6: Modell I: Hauptreihensterne – Vorderansicht.

Innerhalb der Wasserbehälter werden Tauchsieder mit einer Leistung von jeweils 300 W verwendet, was zu einer Aufwärmzeit von etwa 40 Minuten führt. Anschließend kann das Modell jedoch auch einige Zeit ohne weitere Wärmezufuhr genutzt werden.

Besondere Bedeutung kommt der Dichtigkeit der Anschlüsse an den Kugeln zu, die sowohl leichten mechanischen und größeren thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Die Schlaucholiven aus Messing werden daher mit temperaturstabilem Spezialklebstoff befestigt.

Auch bei der Wahl der passenden Pumpen sind die hohen Temperaturen zu berücksichtigen, da nur wenige Geräte herstellereitig für den Warmwassertransport vorgesehen sind und man nicht auf Umwälzpumpen aus dem Heizungsbereich, die entsprechend hohe Anschaffungskosten mit sich bringen, ausweichen möchte. Letztlich wird für die mittlere Kugel auf eine Pumpe aus dem Aquaristikbereich (5 W, Fördermenge: max. 300 L/h) zurückgegriffen, während die große Kugel durch eine Pumpe für PC-Wasserkühlungen mit höherem Fördervolumen (25 W, max. 1 500 L/h) versorgt wird (Abb. 6.8). Die externen Temperaturfühler der beiden Thermostate sind jeweils an der Öffnung der Zuführschläuche bzw. beim kleineren Modell an der Pumpe selbst, befestigt. Die Tauchsieder sind davon möglichst weit entfernt angebracht, um eine gleichmäßige Temperatur des zugeführten Wassers zu gewährleisten.

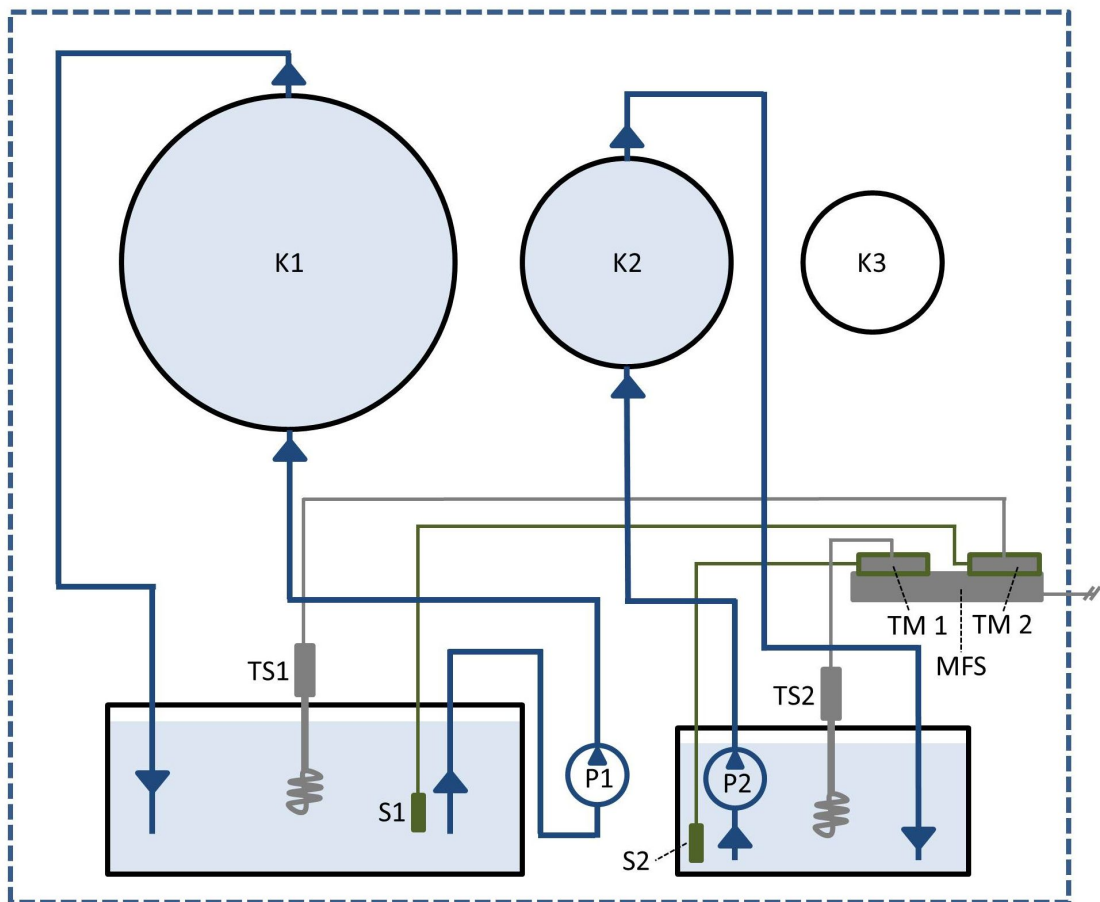


Abbildung 6.7: Skizze zur technischen Realisierung des Modells „Hauptreihensterne“. – Kugeln K1 - K3, Tauchsieder TS1 und TS2, Pumpen P1 und P2, Mehrfachsteckdose MFS mit den Thermostaten TM1 und TM2 sowie deren Temperaturfühler S1 und S2. Elektrische Verbindungen in grau, Leitungen der Temperaturfühler grün und Wasserschläuche blau dargestellt.

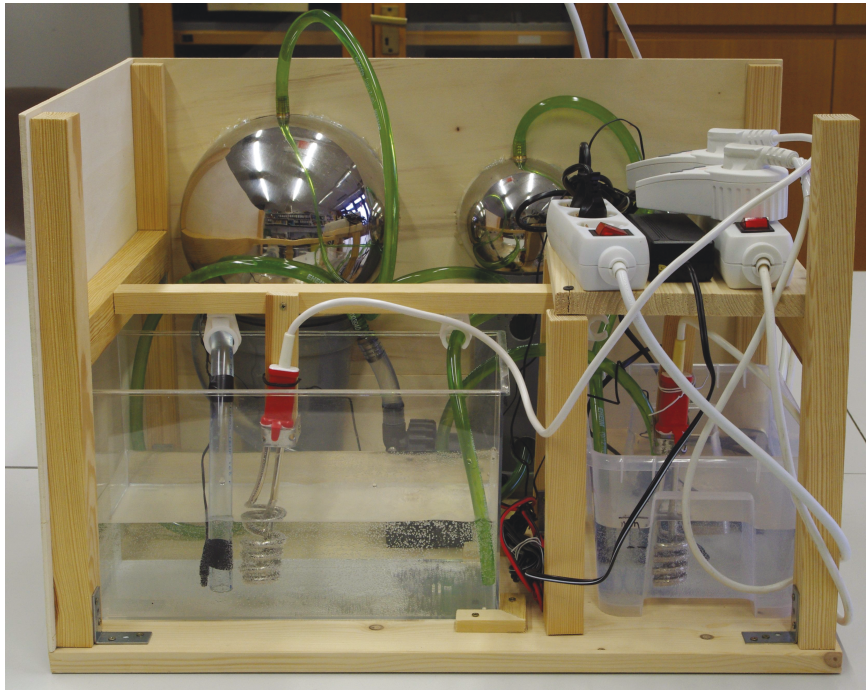


Abbildung 6.8: Modell I: Hauptreihensterne – Rückwärtige Ansicht.

Um eine ausreichende Sicherheit im Hinblick auf die Kombination von 230 V-Geräten mit dem gleichzeitigen Einsatz von Wasser zu gewährleisten, werden alle Geräte nur über FI-Schutzschalter betrieben. Weiterhin werden die Mehrfachsteckdosen sowie das Netzteil und die Thermostate durch eine eigene Ummantelung räumlich von den Wasserbehältern und dem Schlauchsystem separiert (in Abb. 6.8 entfernt). Die ausführliche Materialliste ist in Tabelle 6.4 wiedergegeben.

Tabelle 6.4: Ausführliche Materialliste zum Modell: „Hauptreihensterne“.

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl	Preis pro Stück
Edelstahl-Hohlkugel	D \approx 9 cm	1	5,00 €
Edelstahl-Hohlkugel	D \approx 13 cm	1	7,50 €
Edelstahl-Hohlkugel	D \approx 20 cm	1	17,95 €
Pumpe 1	Eheim 300	1	15,00 €
Pumpe 2	Alphacool TPP644 – T12	1	70,00 €
Elektronischer Thermostat	UT200	2	40,00 €
Netzteil für Pumpe 2	12 V, 3 A	1	10,00 €

Ausführliche Materialliste zum Modell: Hauptreihensterne. – **Fortsetzung**

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl	Preis pro Stück
Tauchsieder	300 W	2	10,00 €
FI-Schutzschalter	30 mA	2	15,00 €
Mehrfachsteckdose	4-fach	2	5,00 €
Schläuche	ca. 4 m, Aquaristikzubehör	–	25,00 €
Wasserbehälter	5 und 12 L	1	10,00 €
Holz-Grundplatte	(40 · 60 · 2) cm	1	5,00 €
Holzplatten (Verkleidung)	Pappel (5 mm)	5	0,80 €
Abflussrohr	100 mm Durchmesser	1	7,50 €

Die Grundplatte aus Holz hat eine Abmessung von 40 cm · 60 cm, senkrechte Hölzer, die als Träger fungieren, sind daran mit Metallwinkeln befestigt. Die Wasserbehälter sind darauf lose aufgestellt, um ein vollständiges Entleeren zu ermöglichen, jedoch durch seitliche Führungen gegen Verrutschen gesichert. Die Tauchsieder sind an einem Querholm eingehängt und derart gesichert, dass sie zwar nach oben abnehmbar sind, jedoch auch bei einem Stoß nicht in die Wasserbehälter fallen können.

Da die Kugeln eine nicht unerhebliche Wassermenge aufnehmen, wurden sie auf passend geschnittene Stücke von Abflussrohren aufgelegt. Die Rohrstücke wurden ferner mit Öffnungen versehen, um die Schläuche hindurchzuführen. Da die thermischen Belastungen – insbesondere in den Wasserbehältern nahe der Tauchsieder – jedoch auch innerhalb der Schläuche und an den Klebestellen der Kugeln, nicht zu vernachlässigen sind, müssen sämtliche Komponenten sorgfältig auf ihre Hitzebeständigkeit geprüft oder danach ausgewählt werden.

Das fertige Modell zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den in Kapitel 5.4.5 festgelegten Kriterien (siehe Tab. 6.5). Lediglich die Vorbereitungszeit fällt höher aus, ließe sich jedoch durch den Einsatz leistungsstärkerer Tauchsieder noch reduzieren. Im Hinblick auf den Produktionsaufwand sind insbesondere die Verbindungsstücke zwischen den Hohlkugeln und Schläuchen zu nennen. Deren dauerhafte Dichtigkeit lässt sich nur mit entsprechenden Werkzeug und Materialeinsatz gewährleisten.

Tabelle 6.5: Kriterienkatalog für das Modell „Tastbare Hauptreihensterne“.

Kriterium	erfüllt?
Betrieb ohne Spannungsquelle oder mit Netzteil?	✓
Betrieb ohne Zusatzmaterial?	✓
Kurze Vorbereitungszeit?	
Inhalte unmittelbar zugänglich?	✓
Direkte Assoziation des Modells mit Inhalt?	✓
Selten genutzte Wahrnehmungsform angesprochen?	✓
Nutzung gefahrlos möglich?	✓
Niedriger Produktionsaufwand?	

6.1.5 Begleitmaterial

Schülertext und Aufgaben

Der Begleittext zum Modell (siehe Anhang B.1) muss zunächst das HRD als ein Zustandsdiagramm einführen. Die besonderen Häufungsgebiete im Diagramm, die sich bei der Auftragung von Leuchtkraft zu Temperatur ergeben, sind zu erläutern. Dabei ist die herausragende astrophysikalische Bedeutung, der Hauptreihe zu zeigen. Anschließend werden die Häufungsgebiete der Riesen und weißen Zwerge beschrieben sowie die Eigenschaften der dort befindlichen Sterne dargelegt.

Nun zurück zu unserem Modell und seiner Anwendung für Blinde und Sehbehinderte: Die erste Aufgabe soll zunächst dem Vergleich zwischen dem Modell selbst und dem Diagramm dienen. Der größte Stern ist auch derjenige mit der höchsten Temperatur. Es ist beabsichtigt, ein eindruckliches Erlebnis hervorzurufen, welches der langfristigen Erinnerung an den dargestellten Zusammenhang dienen soll. Es muss direkt darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den Modellsternen um Exemplare der Hauptreihe handeln soll.

In der zweiten Aufgabe wird die systematische Untersuchung des gesamten HRDs gefordert. Dazu existiert ein tastbares HRD in Koordinatendarstellung (siehe den folgenden Abschnitt). Die Hauptreihe, der Riesenast und das Ballungsgebiet der Weißen Zwerge sind zu identifizieren.

Im dritten Teil wird ein Rückgriff auf das Modell vorgenommen. Unter Angabe von fiktiven Temperaturen und Leuchtkräften der drei Sterne, sollen diese in das HRD übertragen werden. Damit ist eine enge mentale Verbindung zwischen dem Tastmodell und dem abstrakteren Diagramm beabsichtigt. Dabei werden deutlich unterschiedliche Werte für Tem-

peraturen und Leuchtkräfte vorgegeben, die etwa den Spektralklassen A V, G V und M V entsprechen

Tastbare Darstellung

Die tastbare Darstellung zeigt ein vereinfachtes HRD. Auf der x-Achse ist die Temperatur der Sterne aufgetragen, die y-Achse zeigt ihre Leuchtkräfte. Das Diagramm umfasst die Hauptreihe, den Riesenast sowie das Gebiet der Weißen Zwerge. Diese Gruppen von Sternen werden auch im Schülertext erläutert. Auf eine weitere Untergliederung, etwa der Riesensterne, wurde verzichtet, um das Diagramm nicht durch Überfrachtung unübersichtlich zu machen. Kurz sei nachfolgend die Herstellung eines tastbaren HRDs mit einfachen Mitteln erläutert.

Das Positiv des HRD ist – gemäß der Anforderungen der verwendeten Tiefziehmaschine – auf Papier ausgeführt. Die Achsen werden aus Federstahl mit einem Durchmesser von 1 mm ausgeführt, die Skalenteilung besteht ebenfalls aus Federstahl mit einem Durchmesser von 0,5 mm. Die einzelnen Datenpunkte des HRD werden durch Sandkörner repräsentiert. Zur Vereinfachung der Herstellung werden sie mit Hilfe einer Schablone aufgebracht.

Die ausgeschnittenen Bereiche der Schablone, an denen sich vormals die Datenpunkte der Sterne befanden, werden mit Flüssigklebstoff bestrichen und der Sand aufgebracht. Es ist auf eine angemessene Dichte von Sandkörner in den drei unterschiedlichen Bereichen (Hauptreihe, Riesen, Weiße Zwerge) zu achten, um die Häufigkeiten ähnlich zu den tatsächlichen astronomischen Gegebenheiten zu gestalten (vgl. Abschnitt 6.1.2).



Abbildung 6.9: Vorlage zum HRD.

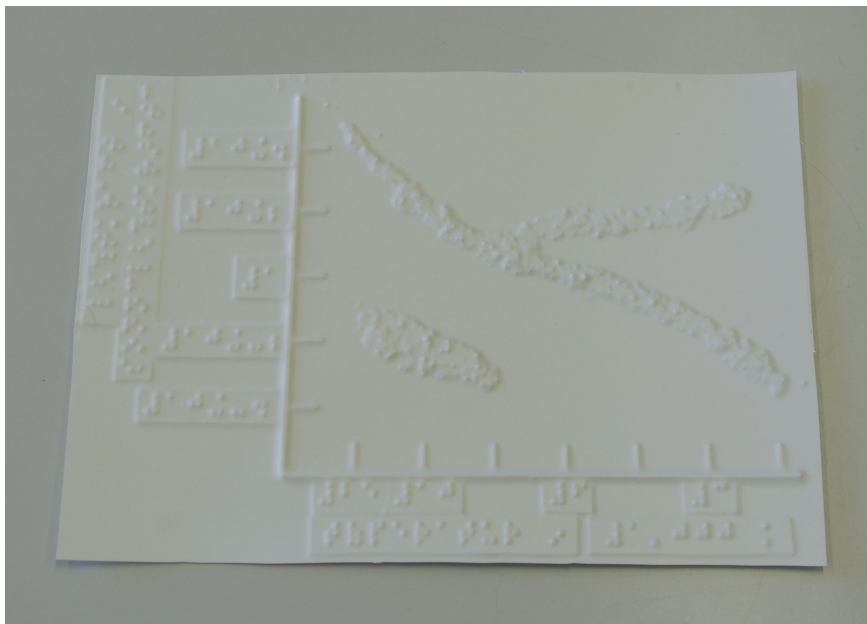


Abbildung 6.10: HRD als tastbare Darstellung.

6.2 Modell II: Räumliches Sternbild

6.2.1 Zielsetzung

Seit jeher nutzt der Mensch die Sterne zur Orientierung. Dabei fassten verschiedene Kulturen die Sterne des Himmels zu Figuren – entsprechend der eigenen Mythologie – zusammen. Dies erhöhte den Wiedererkennungswert und die Tradierung des eigenen Weltbildes und seiner praktischen Funktionen. Aus naturwissenschaftlicher Sicht geschieht eine solche Zusammenfassung jedoch rein willkürlich – wenngleich die IAU im Jahre 1922 die Einteilung standardisiert und für die nördliche Hemisphäre die Sternbilder der griechischen Mythologie übernommen hat. Dies geschah jedoch aus praktischen Erwägungen um die Orientierung am Himmel zu erleichtern und auf eine einheitliche Basis zu stellen. Tatsächlich weisen in den meisten Fällen die Sterne, die sich in einem Sternbild wiederfinden, keine physische Beziehung zueinander auf.

Ziel des Modells „Räumliches Sternbild“ ist daher die Vermittlung des Zusammenhangs zwischen dem Erscheinungsbild der Himmelskugel und der tatsächlichen räumlichen Anordnung der Sterne und ihrer Eigenschaften. Dabei wird auf eine Darstellung der gesamten scheinbaren Himmelskugel verzichtet und stattdessen die Auswahl auf ein einzelnes Sternbild beschränkt, dass sowohl in zweidimensionaler als auch in der dreidimensionalen Darstellung im gleichen Modell verwirklicht ist.

Im Vordergrund steht dabei nicht die maßstabsgetreue Darstellung von Größen, wie dem Sternradius oder der Entfernung der Sterne untereinander – was in der Astronomie oftmals kaum zu verwirklichen ist. Vielmehr wird beabsichtigt, die grundlegenden Eigenschaften, d.h. die unterschiedlichen Entfernungen und Durchmesser rein qualitativ darzustellen.

Als zusätzliches Material wird den Lernenden ein Text zur Entfernungsbestimmung zur Verfügung gestellt. Damit soll Ihnen die Möglichkeit gegeben werden, den Perspektivenwechsel des Modells nachzuvollziehen. Ferner werden hier die Entfernungen einiger Sterne des Sternbild Kassiopeia aus den Angaben zur Parallaxe berechnet sowie ein Vergleich zum nächsten Nachbarstern der Sonne angestellt.

Die Größe des Modells soll den Handtastraum (vgl. Kapitel 5.2) nicht übersteigen, worin es sich von anderen Umsetzungskonzepten, wie etwa begehbaren Sternbildern (siehe Kapitel 1.5.2), abhebt.

6.2.2 Fachlicher Hintergrund

Geschichtliches

In den Weltbildern der Antike, wie etwa dem des Aristoteles oder Hipparch, befinden sich die Planeten und Sterne in Kugelsphären. Der Abstand von der Erde ist dadurch für alle

Sterne gleich groß, wobei Aussagen über die tatsächlichen Größenverhältnisse im Weltall in der Antike kaum möglich waren. Mit dem Glauben an den Aufbau des Weltalls aus Sphären, ging auch die Annahme der Unveränderlichkeit des Firmaments einher. Die Beobachtung eines neuen Sterns durch Tycho Brahe (1546 – 1601) im Jahre 1572 widersprach damit dem damaligen Stand der Wissenschaft. Wie bereits bei früheren Supernovae, deren Erscheinung wie im Jahre 1054 dokumentiert wurden, rechnete man die Phänomene entweder nicht dem Himmel zu und fasste sie als Erscheinung innerhalb der Erdatmosphäre auf oder man hielt sie für göttliche Zeichen. Brahe jedoch widmete dem Phänomen viel Beobachtungszeit und konnte es über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr verfolgen. Er unternahm ferner Versuche die Parallaxe zu bestimmen, um damit auf die Entfernung des Objektes zu schließen. Da ihm der Nachweis eines Parallaxeneffektes jedoch nicht gelang, schloss er daraus auf eine große Entfernung der Erscheinung, die sich mindestens außerhalb der Mondbahn befinden musste. [Paturi, 1996, S. 52 f.]

Die ersten Messungen, die die tatsächliche Entfernung der Sterne von der Erde auch quantitativ zu bestimmen vermochten, gelangen ab 1838 dem Astronom und Mathematiker Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846). Anders als sein Zeitgenosse Friedrich Georg Wilhelm von Stuve (1793 – 1864), ging Bessel nicht davon aus, dass die hellsten Sterne auch die nächsten sind. Für seine Messungen zum Parallaxeneffekt wählte er dementsprechend nicht besonders helle Sterne, sondern solche, die eine hohe Eigenbewegung aufweisen. Die Bestimmung der Parallaxe gelang ihm schließlich anhand des Sternes 61 Cygni³⁰ mit einem Wert von $0,31'' \pm 0,0202''$, was einer Entfernung von 657 700 Erdbahnraden – der damals üblichen Bezugsgröße – entspricht (Paturi [1996, S. 110 f.]). Dabei errechnete er die Parallaxe aus über 3 000 Messwerten zu Positionsänderungen des Sterns, die er im Laufe eines Jahres gewonnen hatte (Strassl [1946]). Die Qualität der aufwendigen Berechnungen zeigt sich anhand des Vergleiches mit Messungen des Hipparcos-Satelliten, der den Wert zu $0,287''$ bestimmte (aus: CDS Strasbourg [2013]).

Mit fortschreitender Entwicklung auf dem Gebiet der Aufnahmetechnik gelang der Nachweis von Parallaxeneffekten mittlerweile sogar mit Technik aus der Amateurastronomie und ist damit prinzipiell auch für Schulen möglich geworden (siehe Heiser u. a. [2012]).

Parallaxenmessung

Bei der Parallaxe handelt es sich um die „periodische Verschiebung von scheinbaren Sternörter infolge der Erdbewegung um die Sonne“ (de Boer [2001, S. 27]). Durch die Verschiebung der Position der Erde ändert sich im Jahresverlauf auch die Richtung, in der ein irdischer Beobachter bei der Betrachtung eines Sterns blickt (siehe Abb. 6.11). Die Blickrichtung wird dabei anhand von weit entfernten Sternen bestimmt, die weder eine messbare Eigenbewegung, noch einen eigenen Parallaxeneffekt zeigen.

³⁰Hipparcos Katalognummer: HIP 104214

Mit dem Erdbahnradius von einer astronomischen Einheit (1 AE \approx 150 Mio. km) ergibt sich rein geometrisch aus Abb. 6.11:

$$\sin p = \frac{1\text{AE}}{r}. \quad (6.3)$$

Dabei entspricht die Entfernung Erde–Stern praktisch der Entfernung Sonne–Stern, da der Erdbahnradius sehr viel kleiner als die Entfernung der Sterne ist. Das Dreieck Sonne–Erde–Stern muss dabei keineswegs senkrecht auf der Erdbahnebene stehen, sondern ist für alle Lagen – und damit für alle Positionen der Sterne – gültig. Die Parallaxen selbst der nächsten

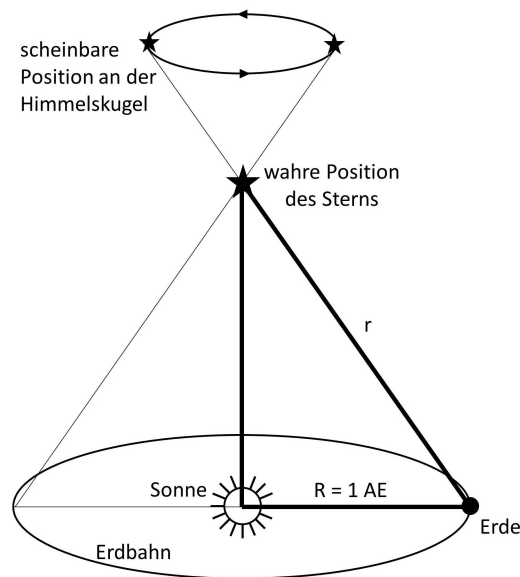


Abbildung 6.11: Prinzip der Parallaxenmessung (nach de Boer [2001, S. 145]).

Sterne sind stets kleiner als 1'', weshalb sich große Zahlenwerte ergeben, wenn die Entfernungen in Vielfachen des Erdbahnradius angegeben werden. So weist etwa Proxima Centauri³¹ – der nächstgelegene bekannte Stern – eine Parallaxe von 0,772'' auf. Aus Gleichung 6.3 ergibt sich:

$$r = \frac{1\text{AE}}{\sin\left(\frac{1''}{3600}\right)} = 267\,182\text{ AE}. \quad (6.4)$$

Um praktikablere Zahlenwerte zu erreichen hat sich in der Astronomie die Nutzung der Einheit Parsec (pc) eingebürgert. 1 pc ist diejenige Entfernung Erde–Stern, bei der der Parallaxenwinkel genau 1'' beträgt. [de Boer, 2001, S. 145 f.]

Bei erdgebundenen Beobachtungen ist die Reichweite der Parallaxenbestimmung auf etwa 50 pc begrenzt (de Boer [2001, S. 146]). Diese Schranke wurde erst mit dem Hipparcos-

³¹Katalogbezeichnung: HIP 70890

Satelliten auf 500 pc erweitert, was jedoch immer noch nur einem kleinen Bruchteil unserer Heimatgalaxie entspricht. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit soll die GAIA-Mission ermöglichen.

Die Messungen zeigen auch, dass Sterne, die an der Sphäre relativ nah beieinander stehen, räumlich durch sehr große Entfernungen getrennt sein können. Sofern es sich nicht um einen rein zufälligen Projektionseffekt handelt, besteht ein Zusammenhang zwischen scheinbarer Nähe an der Himmelskugel und tatsächlicher Nähe nur, wenn es sich um Doppel- oder Mehrfachsysteme oder Sternhaufen (offene wie auch Kugelsternhaufen) handelt.

Scheinbare- und absolute Helligkeiten

Die Bestimmung von Sternentfernungen zeigt, dass die scheinbare Helligkeit eines Sterns zunächst nichts über seine Entfernung verrät, wie es noch in der Zeit vor Bessels Parallaxenmessungen eine verbreitete Meinung war.

Der Zusammenhang zwischen Abstand von der Erde r , absoluter sowie scheinbarer Helligkeit (M , m) (vgl. Kapitel 6.1.2), lässt sich durch das sogenannte Entfernungsmodul beschreiben:

$$M = m + 5 - 5 \cdot \lg r. \quad (6.5)$$

Unter den 10 scheinbar hellsten Sternen am Himmel sind keineswegs nur solche vertreten, deren Abstand zur Sonne klein ist, wie man am Beispiel des Sterns Rigel sehen kann (siehe Tabelle 6.6).

Unter den Sternen großer scheinbarer Helligkeit treten gehäuft Hauptreihensterne mit hoher Leuchtkraft (Spektralklasse O und B) und Riesensterne auf. Eindrücklich zeigt sich dies etwa beim Sternbild Orion, dessen markanteste Sterne (Beteigeuze, Rigel und die Gürtelsterne) allesamt Riesensterne mit mehrheitlich sehr hoher (ausgenommen Beteigeuze) Oberflächentemperatur sind. Bei solchen Sternen handelt es sich, gemessen an der Gesamtpopulation aller Sterne, jedoch um Ausnahmereischeinungen.

Absolut sehr leuchtkräftige Hauptreihensterne gehören zu den seltensten Sternen. Zum einen ist ihre Entstehung verglichen mit masseärmeren Exemplaren unwahrscheinlicher, zum anderen wandern sie aufgrund ihrer geringen Lebensdauer sehr schnell von der Hauptreihe ab. Bei vielen der hellsten Sterne handelt es sich daher um Riesen, die abseits der Hauptreihe im HRD bei hohen Leuchtkräften und niedrigen Temperaturen zu finden sind (vgl. Ledrew [2001]). Solche Riesensterne schöpfen ihre Leuchtkräfte aus ihrer gewaltigen Oberfläche.

Bei Kenntnis von Leuchtkraft L und Oberflächentemperatur T eines Sterns kann sein Radius bestimmt werden aus:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4. \quad (6.6)$$

Tabelle 6.6: Die 10 Sterne mit der größten scheinbaren Helligkeit. – V ist die scheinbare Helligkeit, M die absolute Helligkeit, r der Abstand zur Sonne (nach Voigt [2012, S. 304]).

Nr.	Bezeichnung	Name	V (in mag)	M (in mag)	r (in pc)
1	α Canis Majoris	Sirius	-1,47	1,40	2,7
2	α Carinae	Canopus	-0,73	-4,45	56
3	α Centauri	Toliman	-0,33	4,05	1,3
4	α Bootis	Arktur	-0,06	-0,29	11
5	α Lyrae	Wega	0,04	0,49	8,1
6	α Aurigae	Capella	0,09	-0,59	14
7	β Orionis	Rigel	0,08	-6,70	265
8	α Canis Minoris	Procyon	0,34	2,64	3,5
9	α Eridani	Achernar	0,47	-2,72	44
10	β Centauri	Agna	0,59	-3,39	62

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante

Wegen Unsicherheiten, insbesondere bei der Bestimmung der Leuchtkräfte, handelt es sich bei Aussagen über die Radien von Sternen meist nur um erste Näherungen.

Die Leuchtkraft selbst wird aus der scheinbaren Helligkeit m (in mag) sowie der Entfernung r (in pc) des Sterns ermittelt.

Aus dem Entfernungsmodul (Gleichung 6.5) erhält man zunächst die absolute Helligkeit. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass Sterne ihr Licht nicht zwangsläufig nur im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums aussenden. Bei sehr hohen oder niedrigen Temperaturen sagt demnach die visuelle Helligkeit³² des Sternlichts wenig über die tatsächliche Helligkeit aus (vgl. Kapitel 6.1.2). Es ist vielmehr notwendig, die gesamte Energieabstrahlung zu bestimmen, die sogenannte bolometrische Helligkeit. Da dies im Allgemeinen nicht durch Beobachtungen geleistet werden kann, werden theoretische Korrekturwerte herangezogen. Diese sind jedoch insbesondere bei sehr heißen oder kühlen Sternen, mit großen Unsicherheiten behaftet. In Extremfällen kann die notwendige Korrektur bis zu -4 mag betragen. Sie hat damit u.U. einen erheblichen Einfluss auf die zu berechnende Leuchtkraft eines Sterns. [Voigt, 2012, S. 300]

Nach Einbeziehung der bolometrischen Korrektur lässt sich die Leuchtkraft eines Sterns L_1 aus seiner absoluten bolometrischen Helligkeit M_{bol_1} , durch den Vergleich mit den genau

³²Der Begriff der visuellen Helligkeit wird heute zur Unterscheidung von der fotografisch ermittelten Helligkeit gebraucht und berücksichtigt die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges.

bekanntesten Werten der Sonne ($M_{bol_1} = 4,74 \text{ mag}$, $L_2 = 3,844 \cdot 10^{26} \text{ W}$), bestimmen durch:

$$M_{bol_1} - M_{bol_2} = -2,5 \lg \left(\frac{L_1}{L_2} \right). \quad (6.7)$$

Aus der Leuchtkraft und der Temperatur lässt sich nun mittels Gleichung 6.6 der Radius des Sterns berechnen.

6.2.3 Lernziele

In den Lehrplänen (vgl. Kapitel 3.2.3) findet die Thematik, die im Modell „räumliches Sternbild“ vermittelt wird, vielfältigen Ausdruck. Zunächst einmal geht es bei der Messung von Positionen und der Strukturierung des Himmelsanblicks durch Sternbilder um die Schaffung eines Rahmens für die Orientierung an der Sphäre. Die Entfernungsbestimmung ist ein weiterer Punkt, der wesentliche Elemente klassischer und moderner astronomischer Forschung vereint (Gegenstandsbestimmung der Astronomie, in fünf Lehrplänen vorhanden). Die Behandlung der Sternbilder ist in vier Lehrplänen explizit als Thema vorgegeben.

Zur Ergründung der wahren Strukturen hinter den Sternbildern ist eine Bestimmung der Entfernung unerlässlich, wie sie etwa anhand des Umlaufes der Erde um die Sonne (Revolution der Erde, fünf Nennungen) möglich wird. Das Thema ist hier als grundlegende Voraussetzung anzusehen und wird nochmals wiederholt und in Form der Quantifizierung der Abstände im Sonnensystem vertieft.

Die scheinbare Helligkeit als ein Maß für die Entfernung von Sternen, wird schließlich in vier Lehrplänen thematisiert und ist auch im Rahmen des nachfolgend präsentierten Modells ein bedeutender Begriff.

Die Lernenden sollen anhand des Modells und Begleitmaterials folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Die Sterne scheinen an einer Kugel befestigt zu sein, tatsächlich sind sie aber unterschiedlich weit von uns entfernt.
- Wir fassen Sterne zu Sternbildern zusammen, um uns die Orientierung an der scheinbaren Himmelskugel zu erleichtern.
- Die Sterne innerhalb eines Sternbildes sind i.d.R. nicht gravitativ gebunden, d.h. sie stehen in keiner physischen Beziehung zueinander.
- Die scheinbare Helligkeit der Sterne wird durch ihre unterschiedliche Leuchtkraft und die verschiedenen Entfernungen vom Beobachter hervorgerufen.
- Die Leuchtkraft von Sternen kann sehr verschieden sein.
- Bei vielen Sternen mit hoher scheinbarer Helligkeit handelt es sich um Riesensterne.

- Die Entfernung relativ naher Sterne kann mittels der Parallaxenmessung bestimmt werden.

6.2.4 Umsetzung

Auswahlkriterien des Sternbildes

Um den Zielsetzungen gerecht zu werden und einen möglichst hohen Informationsgehalt, bei gleichzeitig geringer Gefahr der Überforderung, umzusetzen, muss zunächst ein geeignetes Sternbild gefunden werden.

Dieses Sternbild soll aus relativ wenigen Sternen bestehen, um nicht die wesentliche Inhalte aus dem Blick zu verlieren. Gleichzeitig scheint es sinnvoll, ein Sternbild zu suchen, dessen Hauptsterne – als solche werden diejenigen angesehen, zwischen denen sich die gedachten Verbindungslinien des Sternbildes erstrecken – annähernd gleich hell erscheinen. Hierbei lässt sich sehr deutlich die Fehlvorstellung aufklären, dass gleich hell erscheinende Sterne auch absolut gleich hell sind. Das Sternbild sollte ferner in der nördlichen Hemisphäre sichtbar sein, um an ggf. vorhandenes Wissen anknüpfen zu können.

Da gleichzeitig auf die Entfernungsbestimmung mittels Parallaxe eingegangen werden soll, darf die Entfernung der Hauptsterne die Grenzen der Parallaxenbestimmung nicht übersteigen. Auch sollen die unterschiedlichen Entfernungen darstellbar sein, ohne dass das Modell eine Länge von etwa einem Meter deutlich überschreitet.

Die Wahl fiel, aus den genannten Kriterien, auf das Sternbild Kassiopeia. Daneben bietet es, aufgrund seiner zirkumpolaren Stellung, markanten Form und der großen Helligkeit der Hauptsterne, den Vorteil eines allgemein hohen Bekanntheitsgrades. Tabelle 6.7 gibt die für das Modell herangezogenen Sterne, mit ihrer scheinbaren Helligkeit und ihrer Entfernung von der Erde, wider.

Tabelle 6.7: Hauptsterne des Sternbilds Kassiopeia geordnet nach gegenwärtiger Helligkeit.
– Datenbestand des Hipparcos-Katalog.

Bezeichnung	Scheinbare Helligkeit	Spektralklasse	Entfernung
γ	2,14 ^m	B0 IV	550 Lj
α	2,24 ^m	K0 II-III	228 Lj
β	2,28 ^m	F2 III-IV	55 Lj
δ	2,66 ^m	A5 III-IV	100 Lj
ε	3,35 ^m	B3 III	440 Lj

Das Sternbild Kassiopeia bietet auch die Möglichkeit, die Bezeichnung der Sterne mit grie-

chischen Kleinbuchstaben gemäß ihrer Helligkeit und die daraus resultierende Schwierigkeit, zu thematisieren. So ändert γ Cas seine Helligkeit irregulär zwischen 1,6–3,4^m. Somit ist für diesen Stern die Bayer-Bezeichnung nicht umfassend gültig.³³

Für die Lernenden ist deutlich hervorzuheben, dass die fünf dargestellten Sterne keineswegs allen vorhandenen Sternen im Sternbild entsprechen. Die Auswahl orientiert sich ausschließlich an der gedachten Verbindungslinie in Form des genannten „W“ und blendet alle weiteren Sterne aus. So sollten bei guten Sichtbedingungen 46 Sterne mit bloßem Auge sichtbar sein³⁴. Die Willkürlichkeit der Auswahl zeigt sich auch darin, dass η Cas, der mit 3,44^m kaum dunkler ist als ε Cas, jedoch von der Verbindungslinie nicht eingeschlossen wird und somit auch nicht Teil des Modells ist.

Unter den hellsten Sternen der Kassiopeia finden sich keinerlei Hauptreihensterne. Dieser Umstand kann jedoch zum Anlass genommen werden, auch diejenigen Exemplare abseits der Hauptreihe und ihre besonderen Eigenschaften zu thematisieren.

Umsetzung in ein Modell

Für die modellhafte Umsetzung wurde zunächst die Leuchtkraft der Sterne herangezogen, um diese durch eine Holzkugel entsprechender Größe darzustellen. Da das Modell an dieser Stelle keine numerisch-quantitativen Informationen, sondern lediglich die qualitative Aussage der absoluten Helligkeitsabfolge transportieren soll, spielt die tatsächliche Größe der Kugeln nur als Größenreihung eine Rolle. Erst im Begleitmaterial werden die realen Größenverhältnisse der Sterne thematisiert.

Die Entfernung der Sterne zur Sonne wird, ausgehend von den Abmessungen des Modells von 100 cm, entsprechend umgesetzt (siehe Tabelle 6.8). Dabei entspricht 1 cm im Modell einer Entfernung von 5,5 Lj.

Zwischen zwei Holzplatten sind fünf Metallstäbe aus Federstahl gespannt, die jeweils einen der Modellsterne tragen. Die Metallstäbe divergieren jeweils vom Beobachtungsort in Richtung zunehmender Entfernung voneinander. Das Modell weist eine Gesamtlänge von etwa einem Meter auf, um einen einfachen Transport zu gewährleisten und den Tastraum einer vor dem Modell sitzenden Person nicht zu überschreiten (vgl. Kapitel 5).

Um die Zuordnung der Modellsterne zu ihrem Abbild auf der Himmelskugel zu gewährleisten, wurden Metallstangen von unterschiedlichem Durchmesser gewählt. Der Durchmesser wächst dabei mit der Leuchtkraft des Sterns.

Auf der Frontplatte sind Halbkugeln aus Holz aufgebracht, die das Sternbild so darstellen, wie es dem irdischen Beobachter als Projektion auf der scheinbaren Himmelskugel erscheint.

³³Die Helligkeit von γ Cas liegt im Hipparcos-Katalog bei 2,14^m, diese wurde auch bei der Erstellung des Modells zugrunde gelegt. [CDS Strasbourg, 2013]

³⁴Sie alle erscheinen uns heller als 6 mag.

Tabelle 6.8: Hauptsterne der Kassiopeia im Modell, geordnet nach der Entfernung vom Beobachter.

Bezeichnung	Größe im Modell	Entfernung	Entfernung im Modell
β	2,5 cm	55 Lj	10 cm
δ	3 cm	100 Lj	18 cm
α	3,5 cm	228 Lj	41 cm
ε	4 cm	440 Lj	80 cm
γ	5 cm	550 Lj	100 cm

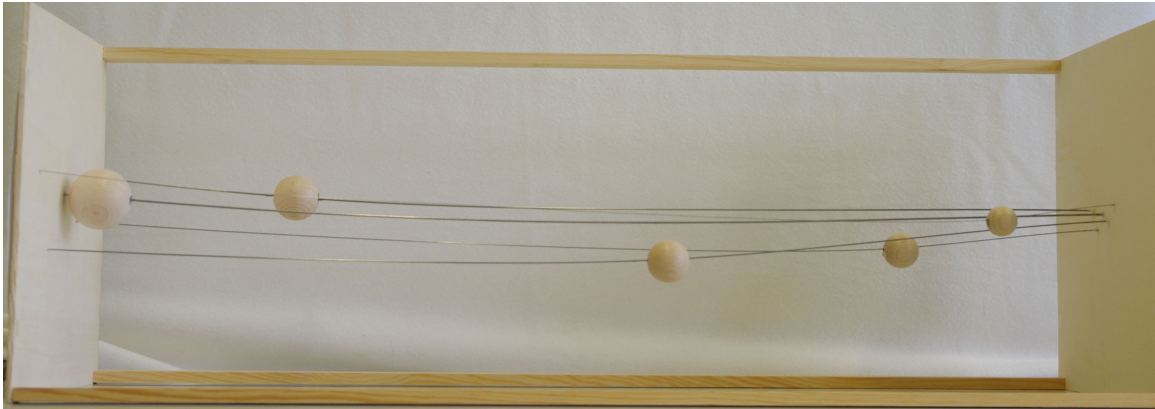


Abbildung 6.12: Seitenansicht des Modells zur räumlichen Verteilung der Sterne.

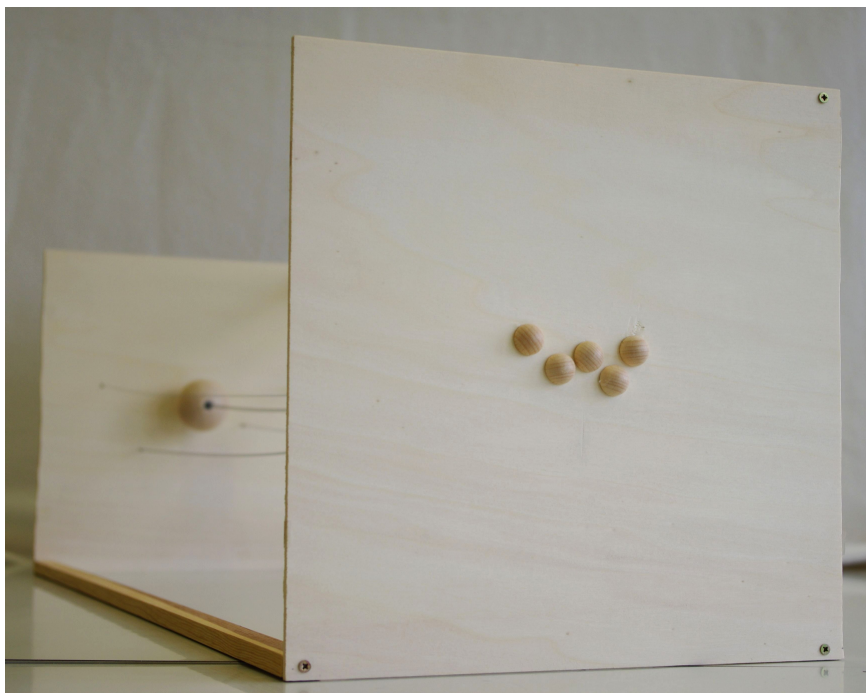


Abbildung 6.13: Ansicht scheinbaren Struktur des Sternbildes Kassiopeia, wie es für einen irdischen Beobachter zu sehen ist.

Entsprechend ist ein „W“ dargestellt, welches aus hölzernen Halbkugeln von gleichem Durchmesser besteht. Der Beobachter steht damit außerhalb des Modells und betrachtet das Sternbild so, wie ein realer Beobachter den Himmel sehen würde.

Tabelle 6.9: Ausführliche Materialliste zum Modell: Räumliches Sternbild.

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl	Preis pro Stück
Holzplatte	Pappel (5 mm)	2	0,80 €
Holz-Rechteckleisten	(2 · 1 · 100) cm	3	2 €
Federstahlstäbe	D = 0,5; 0,8; 1,2; 1,5; 1,8 mm	5	4 €
Holz-Halbkugeln	D = 1,5 cm	5	1 €
Holzkugeln mit Bohrung	D = 2,5; 3; 3,5; 4; 5 cm	5	4 €

Als rein mechanisches Modell ist das „räumliche Sternbild“ ohne weitere Vorbereitung einsetzbar. Es vereint den unmittelbaren Zugang zu den Inhalten mit einem niedrigen Produktionsaufwand. Lediglich das Kriterium, einen selten angesprochenen Sinneskanal zu nutzen, wird nicht erfüllt (Tab. 6.10).

Tabelle 6.10: Kriterienkatalog für das Modell „Räumliches Sternbild“.

Kriterium	erfüllt?
Betrieb ohne Spannungsquelle oder mit Netzteil?	✓
Betrieb ohne Zusatzmaterial?	✓
Kurze Vorbereitungszeit?	✓
Inhalte unmittelbar zugänglich?	✓
Direkte Assoziation des Modells mit Inhalt?	✓
Selten genutzte Wahrnehmungsform angesprochen?	
Nutzung gefahrlos möglich?	✓
Niedriger Produktionsaufwand?	✓

6.2.5 Begleitmaterial

Schülertext und Aufgaben

Der Begleittext zum Modell „räumliches Sternbild“ (Anhang B.2) beschreibt zunächst die Bedeutung von Strukturen am Himmel, sowie die tatsächlichen Gegebenheiten. Dies betrifft sowohl die räumlichen Distanzen zwischen scheinbar an der Sphäre benachbarten Sternen als auch die u.U. höchst unterschiedliche Natur zweier ähnlich erscheinender Sterne. Anschließend wird das Prinzip der Parallaxenmessung thematisiert, welches von einer tastbaren Darstellung (siehe nächster Abschnitt) unterstützt wird.

Nachfolgend wird die Verknüpfung zum Modell hergestellt, welches den Perspektivenwechsel zwischen einem irdischen Beobachter und einer Position abseits im Weltraum anschaulich macht.

Die Aufgaben beziehen sich auf die Messung von Parallaxen und deren Umrechnung in Entfernungen sowie den Vergleich des Abstandes der im Modell dargestellten Sterne, mit den Dimensionen unseres Sonnensystems.

Tastbare Darstellungen

Die erste tastbare Darstellung soll das Konzept der Parallaxenmessung veranschaulichen. Dies schließt sich direkt an den Schülertext sowie die Aufgaben zur Berechnung verschiedener Sternentfernungen an. Die Vorlage besteht aus verschiedenen flexiblen Drähten und Federstahl und lehnt sich in ihrer Gestaltung an Abbildung 6.11 an. Im Hinblick auf die Qualität der Abbildung gestaltet sich die adäquate Umsetzung der (halb-)kugelförmigen Elemente, durch die Sonne, Erde und Sterne dargestellt werden sollen (Bild 6.14), anspruchsvoll. So darf die Erhebung aufgrund des verwendeten Tiefziehverfahrens (siehe Kapitel 6.5) nicht zu hoch sein, auch muss das Material der Kugeln den hohen Temperaturen standhalten können. Die Sonne ist daher durch eine Metallkugel mit einem Durchmesser von 0,4 cm dargestellt, während die Erde, der tatsächliche Ort des Sterns und seine projizierten scheinbaren Positionen durch Kugeln von 0,3 cm Durchmesser repräsentiert werden. Die Verbindungslinien Erde-Sonne-Stern-Erde wurde hervorgehoben, durch die Verwendung von Federstahl mit einem Durchmesser von 1,0 mm. Die übrigen Linien sind dargestellt durch Kupferdraht, der sich entgegen dem Federstahl auch in Form eines Bogens auf das Trägermaterial aufbringen lässt. Sein Durchmesser liegt bei 0,5 mm. Auf Pfeile zur Zuordnung der Beschriftung wurde verzichtet, um eine möglichst klare Darstellung beizubehalten. Die tiefgezogene tastbare Grafik ist in Bild 6.15 dargestellt.

Um auch die Thematik der Riesensterne in anschaulicher Art und Weise behandeln zu können, wird eine zweite tastbare Grafik erstellt. Die Vorlage (Abb. 6.16) besteht hier neben den Beschriftungen lediglich aus Sandpapier einheitlicher Körnung, welches auf das Papier aufgeklebt wurde. Neben der Sonne als Referenzobjekt, sollen die Sterne γ und β Cas anhand

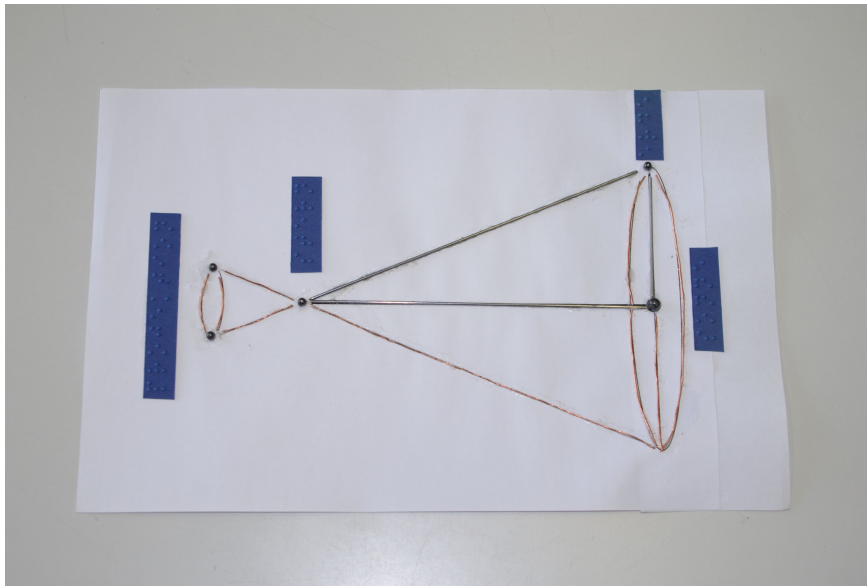


Abbildung 6.14: Vorlage zur tastbaren Darstellung zum Parallaxeneffekt.

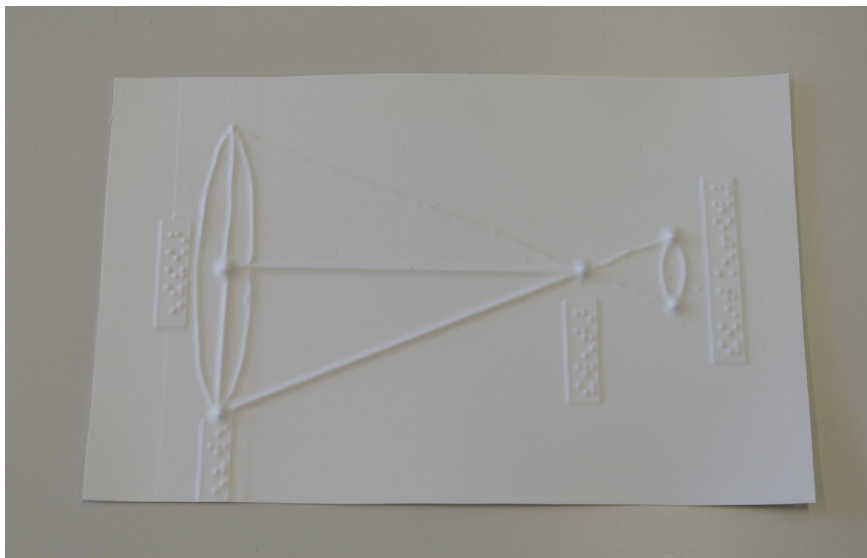


Abbildung 6.15: Tastbare Darstellung zur Parallaxe.

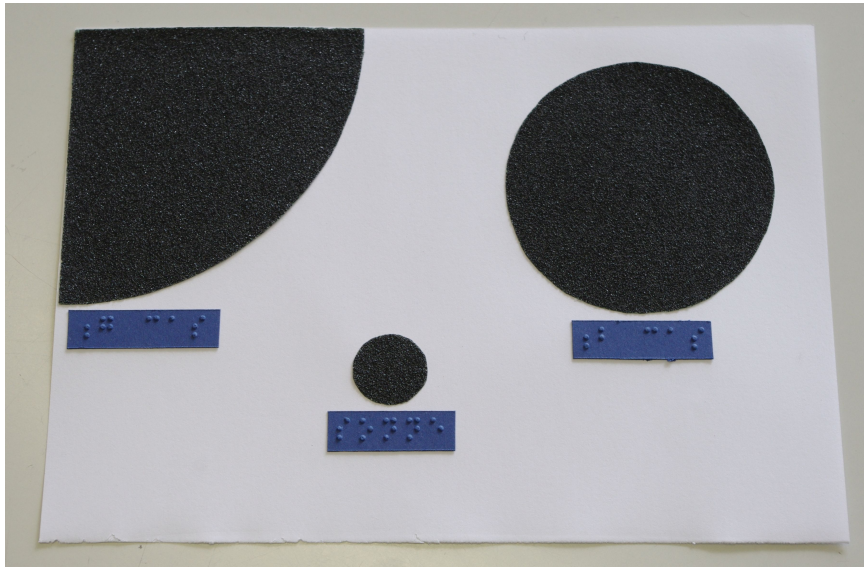


Abbildung 6.16: Vorlage zur tastbaren Darstellung: Vergleich von Sternradien.

ihres Durchmessers dargestellt werden. Aus Gleichung 6.6 wird der Radius ermittelt:

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma T^4}}. \quad (6.8)$$

Die Werte zu den Leuchtkräften werden aus der Literatur entnommen, wo bereits alle notwendigen Korrekturen vorgenommen wurden. Für γ Cas beträgt die Leuchtkraft nach Balona und Dziembowski [1999] $55\,000 L_{\odot}$ und die Oberflächentemperatur $31\,000\text{ K}$, während die Leuchtkraft von β Cas nach Che u. a. [2011] bei $27,3 L_{\odot}$ bei einer Temperatur von nur $6\,825\text{ K}$ liegt. Damit ergibt sich aus Gleichung 6.8 für γ Cas ein Radius von $8,15 R_{\odot}$, während er bei β Cas $3,7 R_{\odot}$ beträgt. Dabei handelt es sich lediglich um erste Näherungen, die jedoch zur Illustration der ungefähren Größenverhältnisse ausreichend sind.

Wegen der Beschränkungen, bei der maximalen Größe einer Darstellung und dem gleichzeitigen Wunsch, die Sonne mit einer Mindestgröße von 1 cm darzustellen, kann der Stern γ Cas nicht vollständig wiedergegeben werden. Er wird stattdessen in der linken oberen Ecke platziert und ist als Viertelkreis zu erkennen. Die Thematisierung der Riesensterne knüpft an das Modell „Hauptreihensterne“ an und macht auch die Riesensterne zugänglich.

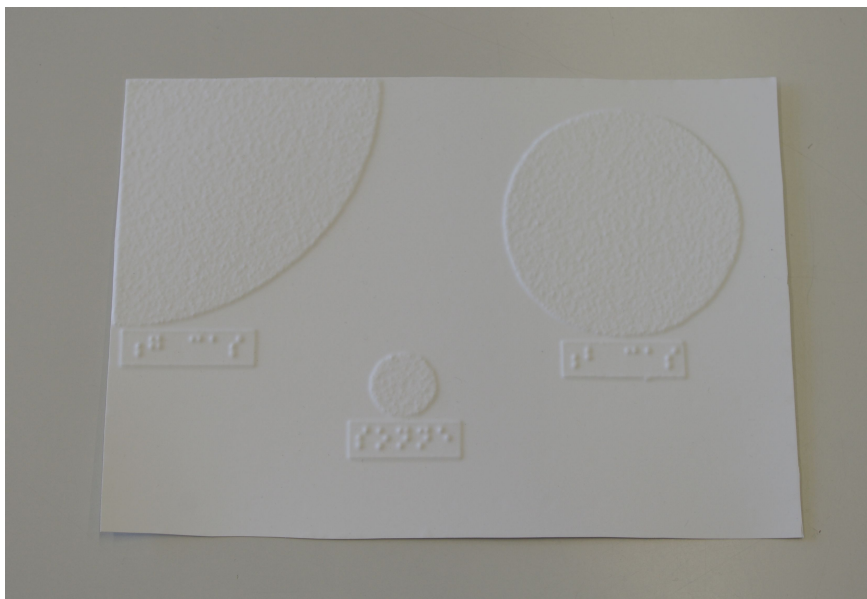


Abbildung 6.17: Tastbare Darstellung zum Vergleich von Sternradien.

6.3 Modell III: Sonnenflecken

6.3.1 Zielsetzung

Das Modell „Sonnenflecken“ soll die bekannteste Form der Sonnenaktivität für blinde Lernende zugänglich machen. Ferner sollen sie auf die Tatsache aufmerksam gemacht werden, dass astronomische Beobachtungen auch bei Tageslicht erfolgen können – für sehende Menschen eine einfache Tatsache.

Im Modell werden die Sonnenflecken auf ihre wesentlichen Eigenschaften reduziert. Als solche wurden ausgewählt:

- Der Temperaturabfall gegenüber der ungestörten Sonnenoberfläche,
- das Vorhandensein eines Magnetfeldes innerhalb der Flecken,
- das – idealtypische – Auftreten in bipolaren Gruppen sowie
- die Beziehung zwischen den magnetischen Eigenschaften der Flecken innerhalb einer Gruppe.

Das Modell soll weiterhin die Sonne in ihrer Kugelgestalt abbilden und mit möglichst geringem Aufwand zum Einsatz kommen. Letzteres ist am ehesten durch die Verwendung von elektrischen Kühlelementen zu erreichen. Um auch die magnetischen Eigenschaften, die aufgrund ihrer enormen Bedeutung für die Entstehung des Phänomens ebenfalls dargestellt werden sollen, möglichst direkt umsetzen zu können, wurde der Einsatz von Magneten, als einfache Werkzeuge zur vertieften Untersuchung des Modells, für sinnvoll erachtet.

Das Modell weist gegenüber den bislang behandelten Themen einen erheblichen Unterschied auf: Es thematisiert eine physische Erscheinung die einer zeitlichen Änderung unterliegt, die der Beobachtung unmittelbar zugänglich ist. Neben der langfristigen Messung der Sonnenaktivität, ist auch die mittelfristig angelegte Beobachtung der Entstehung und Entwicklung von Sonnenflecken möglich. Auch der Nachweis der differentiellen Rotation der Sonne wird anhand der längerfristigen Positionsbestimmung von Sonnenflecken möglich. Es bietet sich somit an, das Modell jeweils mit realen Beobachtungsdaten, wie sie derzeit etwa die Weltraumobservatorien *Solar Dynamics Observatory* (SDO) oder *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) liefern, zu ergänzen, die sich leicht in tastbare Grafiken umwandeln lassen.

6.3.2 Fachlicher Hintergrund

Geschichtliches

Sonnenflecken sind bereits seit mindestens 2000 Jahren bekannt. Ihre Beobachtung ist bei besonderen Wetterverhältnissen bereits mit bloßem Auge möglich. Die frühesten überlie-

fertigen Beobachtungen gehen auf chinesische Astronomen aus dem Jahre 165 v.Chr. zurück (Paturi [1996, S. 18]).

Lange Zeit blieben derartige Beobachtungen unbeachtet, unter anderem auch wegen der Inkompatibilität mit dem jeweils aktuellen Weltbild. So etwa jene des englischen Mönchs und Chronisten Johannes von Worcester (gestorben um 1140). Die systematische Sonnenüberwachung begann erst mit der Erfindung des Teleskops. Ab diesem Zeitpunkt ließ sich auch die Vorstellung von der makellosen Sonnenoberfläche nicht länger halten.

Beobachtungen dunkler Flecken auf der Sonnenscheibe sind u.a. durch Christoph Scheiner (1575 – 1630) dokumentiert sowie durch Galileo Galilei (1564 – 1642), der die Entdeckung dieser Erscheinung für sich beanspruchte. Die Verbreitung des Teleskops, als neues astronomisches Forschungsinstrument, ermöglichte weiteren Gelehrten praktisch gleichzeitig die Untersuchung dieser Erscheinung der Sonnenaktivität. Bekannt sind die Arbeiten von Johann Fabricius (1587 – 1615), Thomas Harriot (1560 – 1621) und Simon Marius (1573 – 1624).

Langfristig angelegte Messreihen des Apothekers Samuel Heinrich Schwabe (1789 – 1875) offenbarten eine Regelmäßigkeit, im Erscheinen und Ausbleiben der Sonnenflecken. Er fand eine Periodendauer von etwa 11 Jahren, wobei langfristige Beobachtungen schwankende Abstände zwischen den Maxima von 7 bis 17 Jahren zeigen.

Um quantitative Aussagen über die Aktivität der Sonne zu ermöglichen, führte Rudolf Wolf (1816 – 1893) die Sonnenfleckenrelativzahl ein (siehe Kapitel 6.3.2). Anhand historischer Daten kann die Relativzahl zurück bis zum Beginn des 17. Jahrhunderts bestimmt werden. [de Boer, 2001, S. 139]

Mit langfristigen systematischen Messungen und dem Anstieg des verfügbaren Datenmaterials zeigten sich, in der Erscheinung und Entwicklung der einzelnen Sonnenflecken, ebenfalls gewisse Regelmäßigkeiten. So treten Flecken zunächst einzeln auf, wonach sich – sofern es nicht zu einer Auflösung des Einzelflecks kommt – in der Nähe ein zweiter Fleck bildet. Eine derartige Zweiergruppe (Bild 6.18) kann sich zu einer komplexen Struktur entwickeln, indem die beiden Einzelflecken selbst zu Fleckengruppen werden. Dabei bleibt der anfängliche Charakter zweier ausgeprägter Gebiete, die nebeneinander existieren, erhalten. Eine phänomenologische Klassifikation, die als Aktivitätsmaßstab sowie als Entwicklungsweg der Sonnenflecken betrachtet werden kann, wurde erstmals von Max Waldmeier (1912 – 2000) erstellt.

Zur Bestimmung der momentanen Aktivität der Sonne wird heute neben den Beobachtungen im sichtbaren Spektralbereich, auch der Radiofluss bei einer Wellenlänge von 15 cm, herangezogen. Bei gleicher Qualität der Daten wird man somit von den lokalen Witterungsbedingungen weitgehend unabhängig. [Voigt, 2012, S. 209]

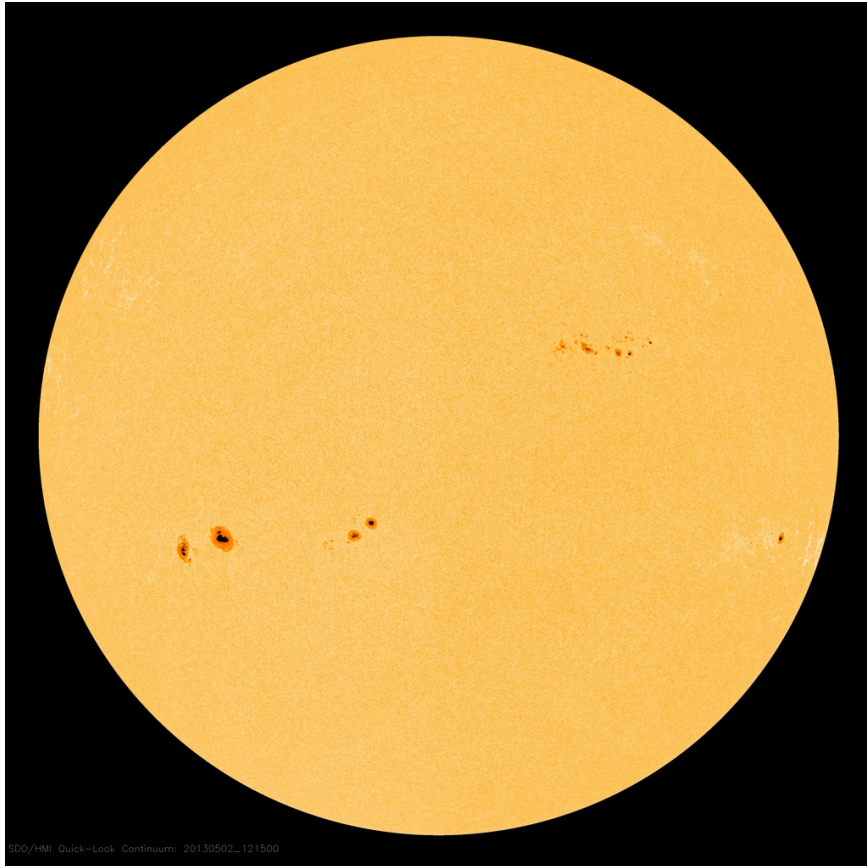


Abbildung 6.18: Drei (idealtypische) bipolare Fleckengruppen unterschiedlicher Ausprägung – Solar Dynamics Observatory, Aufnahmedatum 02.05.2013 (Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams.).

Entstehung und Erscheinung

Bei Betrachtung eines Sonnenflecks erkennt man, im sichtbaren Bereich des Lichtes, sehr häufig zwei Bereiche. Der innere Bereich des Flecks, die Umbra (lat. Kernschatten), ist deutlich dunkler als der äußere, die Penumbra (lat. Halbschatten), der wiederum noch deutlich dunkler als die umgebende Photosphäre erscheint.

Die visuelle Erscheinung wird hervorgerufen durch die erniedrigte Temperatur innerhalb des Flecks. So liegt die Temperatur der Photosphäre bei etwa 5 700 K, während die Temperatur der Umbra bei unter 4 000 K liegt. Blendet man bei der Beobachtung die übrige Photosphäre aus, wird deutlich, dass der Sonnenfleck im inneren keineswegs schwarz ist. Vielmehr entspricht sein Spektrum dem eines K-Sterns in einer späten Entwicklungsphase. [Voigt, 2012, S. 192]

Bei der Suche nach der Ursache der Sonnenflecken liefern die Absorptionslinien einen entscheidenden Hinweis. Im Bereich der Flecken werden sie zwei- oder dreifach aufgespalten. Diese Aufspaltung wird durch das Vorhandensein von Magnetfeldern hervorgerufen, wobei die Stärke der Aufspaltung proportional zur Feldstärke ist. Es handelt sich dabei um den, nach seinem Entdecker Pieter Zeeman (1865 – 1943) benannten, normalen Zeeman-Effekt (Comins [2011, S. 286 f.]). Magnetische Flussröhren wandern aus der Konvektionszone bis an die Oberfläche und durchstoßen diese. Die starken Magnetfelder von bis zu 0,3 T unterdrücken dann die Konvektion und vermindern somit den Energietransport an die Oberfläche. [Voigt, 2012, S. 208]

Die Lebensdauer eines Sonnenflecks ist direkt mit seiner Größe korreliert. Dabei sind kleine Flecken deutlich häufiger als die langlebigen großen Flecken, deren Umbra eine Ausdehnung von bis zu 50 000 km aufweisen kann. Es wurden auch sehr seltene Exemplare mit einem Durchmesser von mehr als 200 000 km beobachtet (de Boer [2001, S. 138 f.]). Etwa 50 % aller Flecken existieren weniger als 2 Tage, nach 11 Tagen sind 90 % aller Flecken verschwunden. Die erwähnten großen Einzelflecken können in seltenen Fällen eine Lebensdauer von einigen Monaten erreichen. [Voigt, 2012, S. 192]

Man unterscheidet bei der idealtypischen Konstellation einer bipolaren Fleckengruppe jeweils zwischen demjenigen Fleck der – in Rotationsrichtung der Sonne – vorauszieht (p-Fleck, proceeding) und dem nachfolgenden Fleck (f-Fleck, following). Meist ist der p-Fleck dem Äquator etwas näher als der f-Fleck. Zu Beginn eines neuen Sonnenfleckenzyklus bilden sich die Sonnenflecken bevorzugt in hohen Breiten von etwa 30-45°. Im Laufe des Zyklus wandern die Entstehungsgebiete dann von beiden Seiten in Richtung Äquator, bis gegen Ende des Zyklus Breiten von nur 5° erreicht werden. Dabei kann das Auftreten der letzten Gruppen eines Zyklus sich mit den ersten Gruppen des nachfolgenden Zyklus überschneiden. [Beckmann, 2011, S. 98]

Trägt man die Breite der Entstehungsregion gegen die Zeit auf, erhält man das sogenannte Schmetterlingsdiagramm, welches den Ablauf der Aktivität über mehrere Zyklen darstellt

(Abb. 6.19). Die polnahen Breitengrade oberhalb von 40-45° bleiben praktisch immer frei von Flecken. [Gürtler, 2011, S. 131 f.]

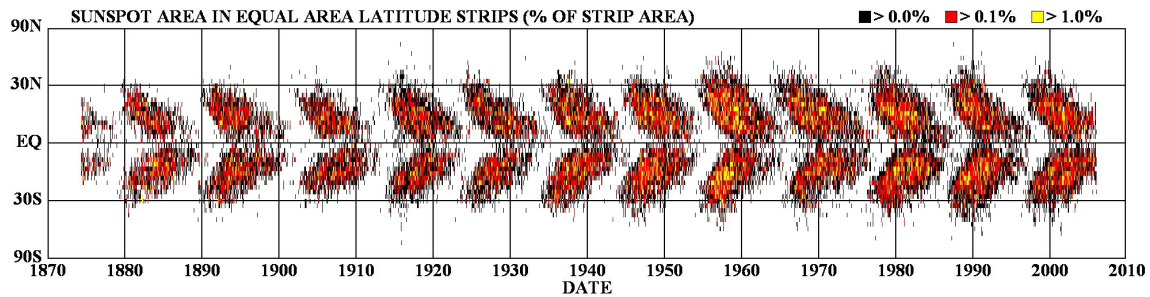


Abbildung 6.19: Schmetterlingsdiagramm – Gewonnen durch Auftragen des Breitengrades der Sonnenflecken gegen die Zeit (Quelle: Hathaway [2006]).

Magnetische Eigenschaften

Innerhalb einer bipolaren Fleckengruppe entspricht die Polarität des p-Flecks der Polarität der Sonnenhemisphäre, auf der er erscheint. Im linken Bild in Abbildung 6.20 würde etwa das globale Magnetfeld einen Südpol in der nördlichen Hemisphäre (im Bild oben) aufweisen. Die p- und f-Flecken sind auf den entgegengesetzten Hemisphären dementsprechend unterschiedlich polarisiert. [Comins, 2011, S. 289]

Bei der Festlegung der magnetischen Pole auf der Sonne gilt dabei folgende Konvention: Zeigen die Feldlinien in Richtung des Sonnenzentrums, handelt es sich um einen Nordpol. Umgekehrt gilt: Zeigen die Feldlinien vom Sonnenzentrum weg, spricht man von einem Südpol. [Comins, 2011, S. 288]

Nach Abschluss eines 11-jährigen Zyklus beobachtet man die Umkehrung der Polaritäten der Flecken, auf den beiden Sonnenhemisphären (Abb. 6.20). Bis zur vollständigen Wiederherstellung des Ausgangszustandes vergehen demnach nicht 11, sondern insgesamt 22 Jahre (Hale-Zyklus). [Voigt, 2012, S. 208]

Sonnenfleckenrelativzahl

Um ein Maß für die Aktivität der Sonne zu erhalten, wird die sogenannte Sonnenfleckenrelativzahl bestimmt. Gemäß der Definition nach Wolf wird sie bestimmt durch:

$$R = k(10 \cdot g + f). \quad (6.9)$$

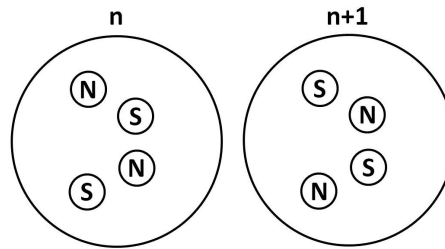


Abbildung 6.20: Vertauschung der Polarität von Sonnenflecken, auf entgegengesetzten Hemisphären, im Zuge des Wechsels des Sonnenzyklus n zum folgenden Zyklus $n+1$ (nach: Voigt [2012, S. 208]).

Hierbei ist g die Anzahl der Fleckengruppen, f die Zahl der Einzelflecken und k ein Korrekturfaktor um die eigenen Beobachtungen an das international gültige Züricher System anzupassen. Der Korrekturfaktor soll die unterschiedlichen Instrumente ausgleichen und die Beobachtungen auf das Ausgangsinstrument (8 cm Öffnung, 64-fache Vergrößerung) normieren sowie die unterschiedliche individuelle Beurteilung der Beobachter ausgleichen.

Die Relativzahl schwankt zwischen 0, zu Zeiten des Aktivitätsminimum und etwa 300, bei sehr starker Aktivität. [Voigt, 2012, S. 206]

Aus dem Anstieg der Sonnenfleckenrelativzahl lässt sich auch auf die Stärke der Aktivität während des Maximums zurück schließen. So ist das Maximum umso ausgeprägter, je steiler der Anstieg der Relativzahl war. Der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne wird durch längere Perioden überlagert, in denen zusätzlich eine Veränderung der Aktivität festzustellen ist. [Gürtler, 2011, S. 131]

Solar-terrestrische Beziehung

Aus den Aktivitätserscheinungen der Sonne ergeben sich eine Reihe von Einflüssen und Erscheinungen auf der Erde. Die Bandbreite erstreckt sich dabei über sehr langfristig wirkende Effekte, die sich nur mit großem Aufwand und nur indirekt nachweisen lassen, bis hin zu solchen, die sehr kurzfristig Phänomene auf der Erde erzeugen, die durchaus auch direkt beobachtbar sein können.

Neben der Zunahme der Sonnenleuchtkraft über einen Zeitraum von hunderten Millionen Jahren – bei der es sich nicht um eine Aktivitätserscheinung, sondern um einen langsamen Alterungsprozess handelt – kann das irdische Klima auch von kurzfristigen Prozessen der Sonne beeinflusst werden. So lassen sich Zusammenhänge mit dem Ausbleiben von Sonnenflecken und dem Eintritt von kleinen Eiszeiten nachweisen. Dies konnte etwa für das Maunder-Minimum Anfang des 17. Jahrhunderts gezeigt werden.

Auch das globale solare Magnetfeld kann Einfluss auf das irdische Wettergeschehen haben. Man vermutet, dass eine Schwächung des Magnetfeldes den vermehrten Eintritt kosmischer Strahlung in das innere Sonnensystem bewirkt, die wiederum in der Atmosphäre als Wolkenkeim wirken kann.

Sehr kurzfristige Auswirkungen haben solare Flares, die durch die Rekonnexion von Magnetfeldern ausgelöst werden. Sie können Teilchen auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigen und noch in einer Entfernung von 1 AE einen Röntgenfluss von $0,1 \text{ mW/m}^2$ verursachen (Voigt [2012, S. 214 f.]). Ihre elektromagnetische Strahlung erreicht die Erde in etwa 8 Minuten und führt zu Störungen im Bereich des Langwellen-Radios und des Funks, da die leitenden Eigenschaften der Ionosphäre beeinträchtigt werden. Die nachfolgende Teilchenstrahlung wird in der oberen Atmosphäre absorbiert, kann sich jedoch schädigend auf Astronauten und die Elektronik von Satelliten auswirken.

Koronale Masseauswürfe entfalten ihre Wirkung auf der Erde erst nach ein bis zwei Tagen. Ihre bekannteste Auswirkung sind die Polarlichter, die beim Eintritt der geladenen Teilchen in die dichten Atmosphärenschichten entstehen. Auch geomagnetische Stürme sind eine mögliche Folge von starken Masseauswürfen. Sie können selbst auf der Erdoberfläche zu technischen Störungen im elektrischen Leitungssystem und damit zu Stromausfällen führen. [Voigt, 2012, S. 218]

6.3.3 Lernziele

Die Erscheinungen der Sonnenaktivität – und damit insbesondere auch die Sonnenflecken – werden in fünf von sieben untersuchten Lehrplänen, für die Behandlung im Unterricht empfohlen (siehe Kapitel 3.2.3). Darüber hinaus spielen die solar-terrestrische Beziehungen, die durch den Aktivitätszyklus der Sonne beeinflusst wird und etwa durch die Polarlichter auf prachtvolle Weise in Erscheinung tritt, eine sehr bedeutende Rolle im Schulunterricht. Ihre Behandlung wird in sechs von sieben Lehrplänen gefordert.

Anhand des hier vorgestellten Modells sowie des Begleittextes sollen die Lernenden die folgenden Sachverhalte ermitteln bzw. nachvollziehen, die sich direkt auf die Aktivitätserscheinung beziehen:

- Sonnenflecken zeichnen sich durch ihre geringere Temperatur im Vergleich zur Umgebung aus.
- Sonnenflecken treten – in idealtypischer Konstellation – in bipolaren Gruppen auf.
- Sonnenflecken werden durch Magnetfelder verursacht, die sich durch spezielle spektrale Beobachtungen nachweisen lassen.
- Sonnenflecken weisen innerhalb ihrer Gruppe entgegengesetzt gerichtete Magnetfelder auf.

- Die Sonne besitzt ein globales Magnetfeld, welches in Beziehung zu den Magnetfeldern der Flecken steht.
- Der vorseilende Fleck befindet sich näher am Sonnenäquator als der Nachfolgende.
- Sonnenflecken sind ein vorübergehendes und (kurzfristig) veränderliches Phänomen.
- Die Sonnenfleckenrelativzahl des Modells (Abb. 6.22) lässt sich bestimmen zu $R = 36$.

Aus dem Begleitmaterial lassen sich weitere Informationen gewinnen. So können Kenntnisse über die Periodizität der Sonnenaktivität sowie die Erscheinung von Sonnenflecken aus dem Text bzw. der tastbaren Abbildung gewonnen werden. Auch die Auswirkungen der Phasen starker Sonnenaktivität auf die Erde, in Form von Polarlichterscheinungen und Problemen bei der drahtlosen Kommunikation, werden im Schülertext angesprochen.

6.3.4 Umsetzung

Die Umsetzung erfolgt, wie in der Zielsetzung (Kapitel 6.3.1) angegeben, durch die Verwendung von Peltier-Elementen. Mit ihrer Hilfe soll ein zeitlich konstanter, lokal begrenzter Temperaturabfall auf einer Kugeloberfläche generiert werden. Peltier-Elemente bieten den Vorteil, dass neben einer geeigneten Spannungsquelle keine weiteren Betriebsvoraussetzungen erforderlich sind. Es ist damit möglich die Technik innerhalb einer Hohlkugel unterzubringen, da sie wartungsfrei ist und damit generell nicht mehr zugänglich sein muss.

Dementsprechend wurde als Basis des Modells ein Globus genutzt. Wird ein Leuchtglobus verwendet, sind bereits geeignete Öffnung für eine Kabelführung vorhanden. Bei dem vorliegenden Exemplar ließ sich die äußere Aufdruckfolie leicht entfernen. Das Ablösen jeglicher Aufdrucke ist insbesondere im Hinblick auf Betrachter mit einer Restsehfähigkeit (oder Sehende im Allgemeinen) geboten um nicht für Irritationen zu sorgen. Die beiden Halbschalen von Globen sind i.d.R. miteinander verklebt. Ein beschädigungsfreies Öffnen ist damit nicht immer einfach zu bewerkstelligen. Um eventuell tastbare Ränder beim Auseinanderbrechen der Halbkugeln zu vermeiden, müssen die Klebestellen gegebenenfalls mit einem geeigneten Lösungsmittel³⁵ behandelt werden.

Die Peltierelemente werden im Inneren der Kugeloberfläche befestigt. Da neben dem Temperaturabfall auch die magnetischen Charakteristika demonstriert werden sollen, wird unterhalb eines jeden Elements zusätzlich ein starker Magnet befestigt (siehe Abb. 6.21). Alle Klebestellen werden mit Wärmeleitklebstoff ausgeführt, um für einen ausreichenden Wärmetransport zu sorgen. Da sich eine langfristig stabile Temperatur der Modell-Sonnenflecken nur durch die gleichzeitige Kühlung des Peltierelements erreichen lässt, sind diese Elemente auf ihrer warmen Seite mit Kühlkörpern ausgestattet. Da diese ausreichend dimensioniert werden müssen, wurde auf das Angebot aus dem PC-Bereich zurückgegriffen. Es handelt sich um Kühlkörper für CPUs, die auch bei Prozessoren mit einer Leistung von mehr als 100

³⁵Beispielsweise Waschbenzin.

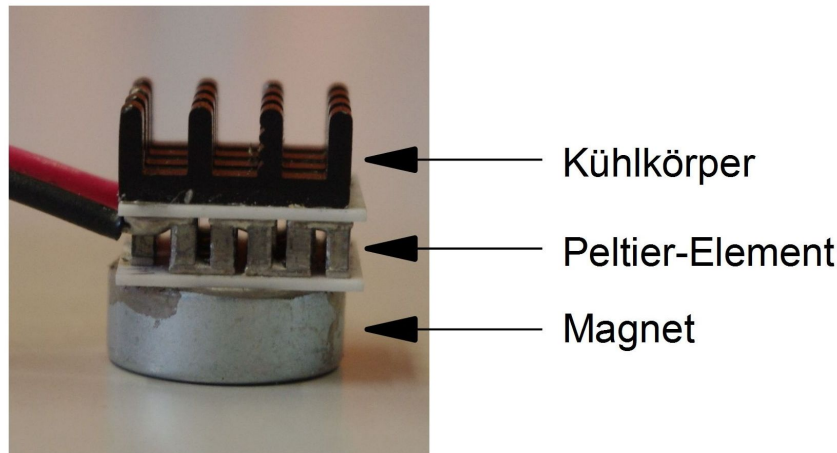


Abbildung 6.21: Aufbau aus Kühlkörper, Peltierelement und Magnet – Die im Modell verwendeten Kühlkörper sind deutlich größer.

Watt einen ausreichenden Wärmetransport garantieren. Wegen der notwendigen räumlichen Nähe, bedingt durch die Darstellung bipolarer Fleckengruppen, mussten einige Kühlkörper jedoch halbiert werden. Die Kühlleistung bleibt dabei auf einem ausreichend hohen Niveau und wird zusätzlich durch Lüfter unterstützt, die separat zugeschaltet werden können. Es wurden drei Lüfter verbaut, die jeweils auf zwei Peltierelemente ausgerichtet sind (siehe Abb. 6.22 und 6.23).

Im Inneren der Kugel wird zunächst eine Verbindungslinie zwischen „Nord-“ und „Südpol“ der Kugel, in Form eines PVC-Rohrs, eingesetzt. Es soll der Kugel einerseits zusätzliche Stabilität verleihen und andererseits die Verkabelung aufnehmen. Die Lüfter sind an diesem PVC-Rohr befestigt, wodurch auch ihre Kabelführung erleichtert wird. Die Befestigung selbst besteht jeweils aus zwei Lüsterklemmen. Diese sind an das PVC-Rohr geklebt und zusätzlich mit einem Draht gesichert, der durch die innere Klemme geführt ist. Die äußere Klemme nimmt ein kurzes Stück Federstahl auf, an welches wiederum der Lüfter mit Heißkleber befestigt ist. Damit lässt sich der Lüfter durch Lösen der Schrauben der Lüsterklemme leicht abnehmen und ggf. verdrehen um seine Ausrichtung zu korrigieren.

Aufgrund der gewölbten Oberfläche ist die Größe der verwendbaren Magnete begrenzt. Ein größerer Durchmesser würde zu einem Hohlraum führen, der wiederum mit Wärmeleitkleber aufgefüllt werden müsste, was letztendlich zu einer erheblich verschlechterten Wärmeübertragung führt.

Da mittels der Peltierelemente kein Temperaturgradient innerhalb eines Modell-Sonnenflecks darstellbar ist, handelt es sich praktisch um Abbilder von bipolaren Fleckengruppen ohne Penumbra entsprechend dem Waldmeier-Typ B II. [Hanslmeier, 2002, S. 222]

Wegen der unterschiedlichen Versorgungsspannungen von Peltierelementen (1,9 V) und Lüf-

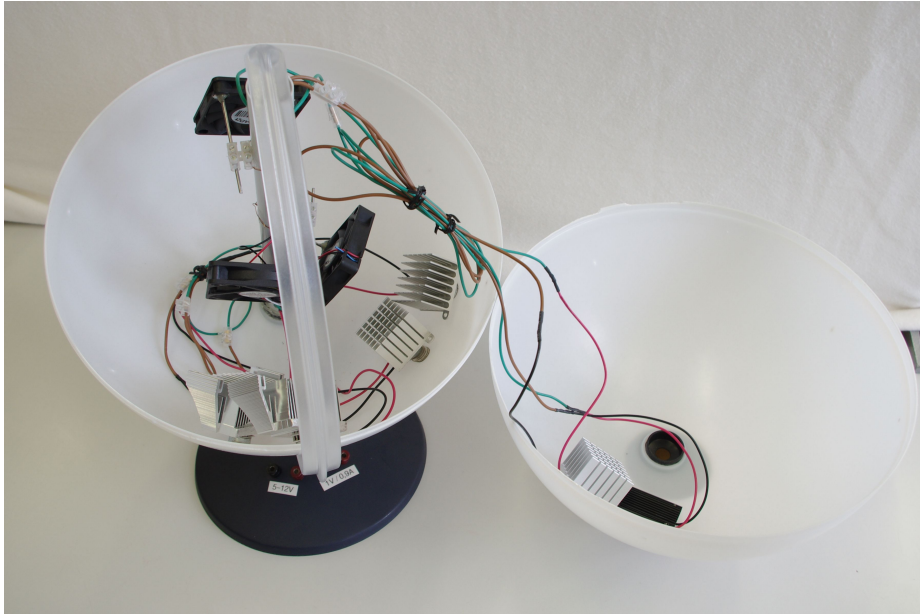


Abbildung 6.22: Ansicht der geöffneten Kugel des Modells „Sonnenflecken“.

tern (regelbar von 5-12 V) müssen zwei getrennte Stromkreise angelegt werden. Darin sind die sechs verbauten Kühlelemente sowie die drei Lüfter jeweils parallel zueinander geschaltet. Der komplette Kabelstrang wird durch das PVC-Rohr nach außen geführt und tritt durch eine Bohrung von oben in den Sockel ein (Bild 6.24). An der zugänglichen Übergangsstelle zwischen Kugel und Sockel ist der Kabelstrang zusätzlich mit einem Schrumpfschlauch ummantelt, um Beschädigungen vorzubeugen. Aufgrund der Verkabelung im Inneren lässt sich das fertige Modell nicht mehr wie ein Globus um seine Achse drehen. Die Erreichbarkeit der verteilt angebrachten Fleckengruppen wird dadurch jedoch nicht beeinträchtigt. Die Versorgungsspannungen werden direkt am Sockel über 3,5 mm Buchsen für Bananenstecker zur Verfügung gestellt. Sollen die Lüfter parallel zu den Peltierelementen betrieben werden, so müssen zwei Netzteile bereitstehen. Zum einen ist dies wegen der unterschiedlichen Spannungen notwendig, zum anderen jedoch auch aufgrund des verhältnismäßig hohen Strombedarfs der Kühlelemente, der sich bei sechs verbauten Einheiten bereits nahe an der für viele Netzteile typischen Belastungsgrenze von 3 A bewegt.

Auf eine Öffnung – um einen Luftaustausch mit der Umgebung zu ermöglichen – wurde verzichtet. Eine solche Öffnung könnte während des Tastvorgangs als störend empfunden werden. Der Wärmeaustausch im Inneren des Modells erfolgt durch freie und erzwungene (durch den Luftstrom der Ventilatoren) Konvektion, die Wärmeabgabe an die Umgebung durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung. Wie die Erprobung zeigt, genügen diese Wärmeaustauschprozesse um die Funktion über eine längere Zeit und auch bei höherer Umgebungstemperatur zu gewährleisten.

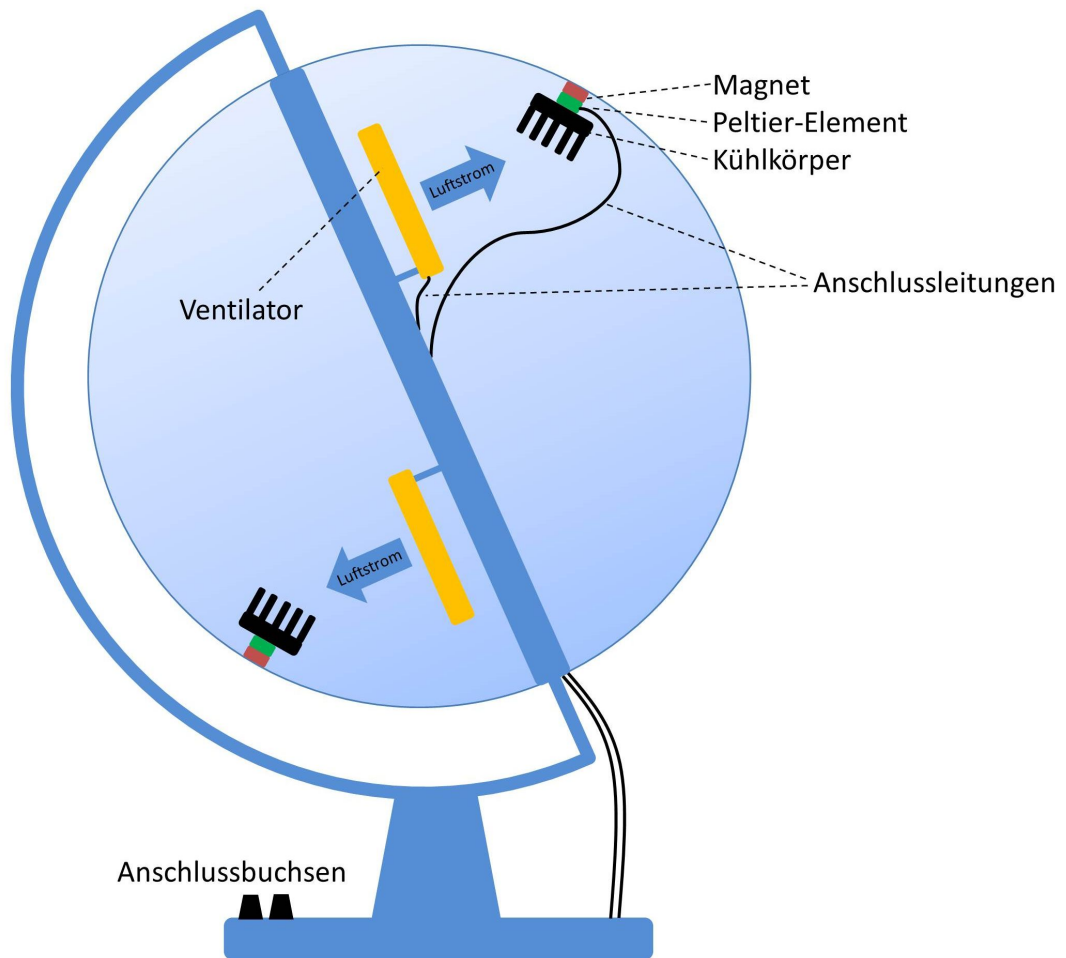


Abbildung 6.23: Schematische Darstellung zum Modell „Sonnenflecken“.



Abbildung 6.24: Kabelführung zum Sockel – Nahansicht.

Auf der Kugeloberfläche wurden keinerlei Markierungen aufgebracht (denkbar wäre etwa ein Gradnetz), da eine Positionsbestimmung der Sonnenflecken im Rahmen dieses Modells nicht vorgesehen ist und eine Ablenkung von der thermischen Informationsvermittlung, durch taktile Oberflächenmerkmale, vermieden werden soll. Die Positionen der Sonnenflecken auf der Oberfläche des Modells sind in Abb. 6.25 dargestellt.

Bei geschlossener Kugel sind die aufgeklebten Peltierelemente bzw. die außenliegenden Magnete, optisch als dunkle Flecken wahrnehmbar, da der Kunststoff des Leuchtglobus eine gewisse Transparenz aufweist.

Die ausführliche Liste des verwendeten Materials findet sich in Tabelle 6.11.

Tabelle 6.11: Ausführliche Materialliste zum Modell: „Sonnenflecken“.

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl	Preis pro Stück
Globus	30 cm Leuchtglobus	1	20,00 €
Peltier-Elemente	3,9 W Wärmeleistung, (15 · 15 · 4,9) mm	6	10,00 €
Neodym-Magnete	(15 · 5) mm	6	0,75 €
Kühlkörper		6	5,00 €
PC-Lüfter	80 mm	3	3,00 €
Anschlussbuchsen	D = 4 mm	4	0,60 €
PVC-Rohr	30 cm	1	2,00 €

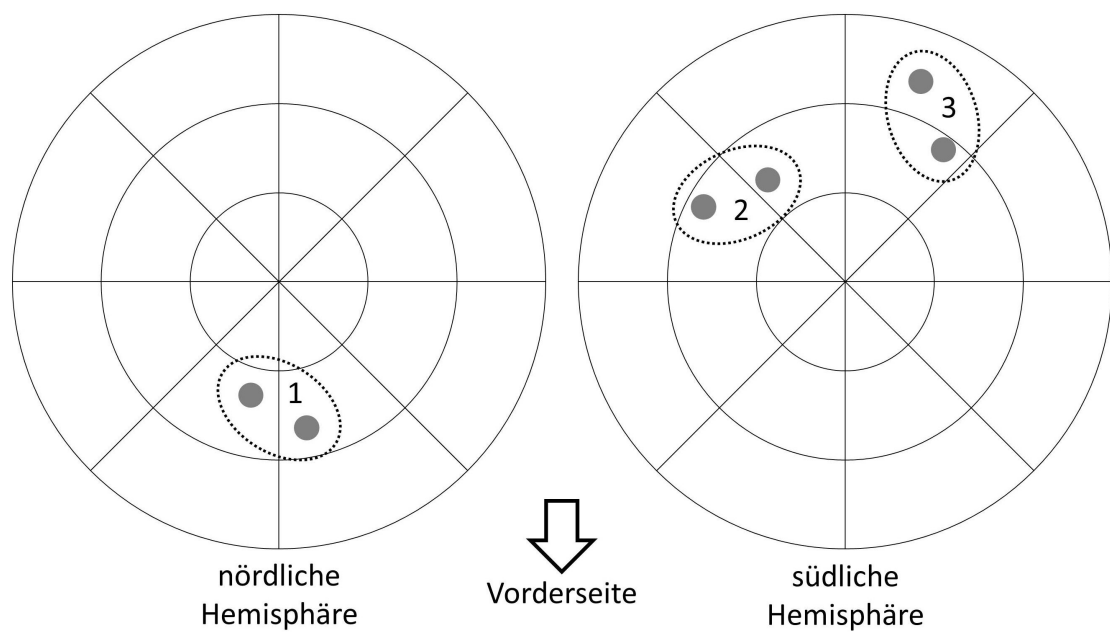


Abbildung 6.25: Anordnung der Fleckengruppen und Sonnenflecken auf der Oberfläche des Modells.

Die Überprüfung auf der Kapitel 5.4.5 genannten Kriterien ergibt eine sehr hohe Übereinstimmung (Tabelle 6.12). Der Betrieb ist zwar – bei Zuschalten der optionalen Lüfter – nur mit zwei Spannungsquellen möglich, bei diesen handelt es sich jedoch um typische Schulnetzteile, die in ausreichender Zahl vorhanden sein sollten.

Tabelle 6.12: Kriterienkatalog für das Modell „Sonnenflecken“.

Kriterium	erfüllt?
Betrieb ohne Spannungsquelle oder mit Netzteil?	✓
Betrieb ohne Zusatzmaterial?	✓
Kurze Vorbereitungszeit?	✓
Inhalte unmittelbar zugänglich?	✓
Direkte Assoziation des Modells mit Inhalt?	✓
Selten genutzte Wahrnehmungsform angesprochen?	✓
Nutzung gefahrlos möglich?	✓
Niedriger Produktionsaufwand?	✓

6.3.5 Begleitmaterial

Schülertext

Das Modell „Sonnenflecken“ wird ergänzt durch einen Schülertext.³⁶ Darin wird zunächst auf die visuelle Erscheinung eines Sonnenflecks eingegangen. Anschließend werden die astronomischen Fachbegriffe Umbra und Penumbra bzw. Schatten und Halbschatten eingeführt und von der Alltagsverwendung des Begriffs eines Schattens abgegrenzt. Neben Angaben zu typischen Lebensdauern von Flecken wird deren Entstehung unter dem Einfluss von Magnetfeldern dargestellt.

Um die systematische Untersuchung des Modells vorzubereiten werden Angaben zur idealtypischen Konstellation bipolarer Fleckengruppen gemacht. Dies betrifft sowohl die optische Erscheinung, als auch die Eigenschaften der Magnetfelder. Abschließend wird aufgezeigt, wie in der aktuellen astronomischen Forschung die Fleckenrelativzahl als Maß für die Sonnenaktivität ermittelt wird. Bei der Formel zur Bestimmung der Relativzahl wurde aus Gründen der Vereinfachung auf die Einführung des Korrekturfaktors k verzichtet.³⁷ Soll eine Analyse von realen Beobachtungsdaten erfolgen, ist die Einführung des Faktors, unter Verweis auf die Notwendigkeit der Normierung der Beobachtungsinstrumente, leicht nachträglich möglich.

Abschließend werden vier Aufgaben gestellt, die die Lernenden zur systematischen und gründlichen Auseinandersetzung mit dem Modell anregen sollen. Sie unterstützen damit direkt das Erreichen der unter Kapitel 6.3.3 genannten Lernziele. Die Aufgaben fordern im Einzelnen von den Lernenden:

1. Die Oberfläche des Modells zu untersuchen und die herabgesetzte Temperatur als ein wesentliches Merkmal der Modell-Sonnenflecken zu identifizieren.
2. Die Anordnung mit der im Text gegebenen idealtypischen Anordnung zu vergleichen.
3. Die Anzahl der Sonnenflecken in den Fleckengruppen zu bestimmen sowie die Sonnenfleckenrelativzahl der Modellsonne anhand der vorgegebenen Formel zu berechnen.
4. Mit dem Magneten als Hilfsmittel die Magnetfelder der Flecken zu entdecken und deren entgegengesetzte Polarität innerhalb einer Fleckengruppe zu erkennen.

Tastbare Darstellungen

Die begleitenden tastbaren Abbildungen bestehen aus einer Detailansicht eines Sonnenflecks, der Umbra und Penumbra wiedergibt sowie einer Übersichtsdarstellung der Sonne, um die Abmessungen und Verteilung typischer Sonnenfleckengruppen zu veranschaulichen.

³⁶Siehe Anhang B.3. Der Schülertext ist angelehnt an [Dorschner, 2011, S. 120ff.].

³⁷Zur Funktion siehe Kapitel 6.3.2.

Die Detailansicht basiert auf einer der gegenwärtig detailliertesten Aufnahmen eines Sonnenflecks, welche mit dem Big Bear Solar Observatory gewonnen wurde. Während die Umbra strukturlos und schwarz erscheint, wird der Aufbau der Penumbra aus filigranen Elementen sichtbar. Auch die Beschaffenheit der umgebenden Fotosphäre ist erkennbar. Die Granulation der Sonnenoberfläche wird jedoch in der Darstellung nicht abgebildet. Durch diese didaktische Reduktion soll der Fokus auf den eigentlichen Fleck und seine innere Struktur gerichtet werden.

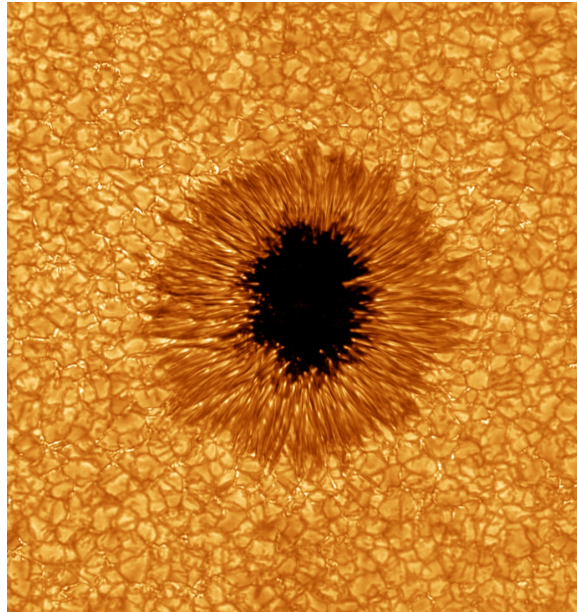


Abbildung 6.26: Aufnahme zur Vorlage der tastbaren Darstellung: Sonnenfleck – Big Bear Solar Observatory.

Relevant ist an dieser Stelle lediglich die Struktur des Fleckes an sich. Die Umbra, die auf der Aufnahme keinerlei Struktur aufweist, wird mittels feinem Sand dargestellt, welcher direkt auf einen Ausdruck des Bildes geklebt wird. Die Verwendung von Sand ermöglicht eine sehr flexible Anpassung an die unregelmäßige Struktur der Umbra, bei gleichzeitiger Unterscheidbarkeit von der ungestörten Umgebung. Eine Darstellung der Fotosphäre durch ein strukturierendes Material, wie etwa Sandpapier hoher Körnung, wäre ebenfalls denkbar. So ließe sich die Abbildung nochmals ähnlicher zum Original gestalten. Auch bei einer visuellen Betrachtung der Aufnahme ist die strukturlose Umbra besonders auffällig und die Umgebung tritt in den Hintergrund. Daher gibt die gewählte Darstellung die Bestandteile nicht nur gemäß ihrer fachlichen Bedeutung, sondern auch gemäß ihrer Ausprägung bei der visuellen Betrachtung wieder.

Um die linienhaften Strukturen innerhalb der Penumbra darzustellen, werden kurze Kupferdrahtstücke von 2 bis 3 cm Länge rund um die Umbra aufgeklebt, sodass diese radial

nach außen gerichtet sind. Insgesamt werden etwa 60 Drahtstücke aufgebracht, um eine ausreichende Dichte und damit einen realitätsnahen Eindruck zu erreichen.

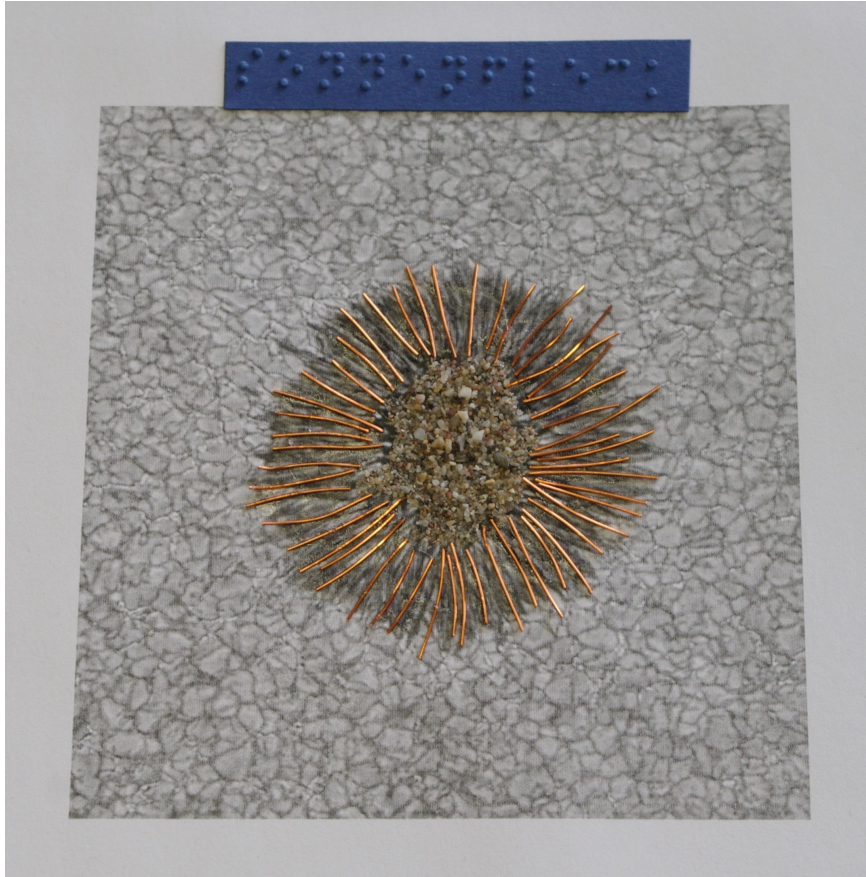


Abbildung 6.27: Vorlage zur Detailabbildung des Einzelflecks.

Eine zweite Darstellung basiert ebenfalls auf der Abbildung eines aktuellen Forschungsinstruments. Als Basis für die Vorlage wurde eine Aufnahme des Solar Dynamics Observatory (SDO) verwendet (siehe Abb. 6.18, Seite 111). Es zeigt zwei bipolare Fleckengruppen auf der Südhemisphäre, deren Größe sich deutlich voneinander unterscheidet. Bei beiden Fleckengruppen ist deutlich zu erkennen, dass der f-Fleck (jeweils rechts im Bild) dem Sonnenäquator näher ist, als der nachfolgende p-Fleck. Die dritte Fleckengruppe, die sich in der Nordhemisphäre findet, weist ebenfalls bipolaren Charakter auf. Hier fehlen jedoch ausgeprägte Flecken, die die Anordnung dominieren. Die Gruppe erscheint daher diffuser und zerfasert. Am rechten Bildrand ist zudem ein Einzelfleck zu beobachten.

Die äußere Begrenzung der Sonnenscheibe ist mittels flexiblem Kupferdraht von 0,5 mm Durchmesser realisiert. Das Innere der Sonnenscheibe soll in der Darstellung keinerlei Struktur, etwa in Form einer nachgebildeten Granulation, aufweisen. Daher sind lediglich die

darzustellenden Sonnenflecken als weitere Information vorhanden. Da die Flecken sehr klein gegenüber der scheinbaren Größe der Sonne sind, werden sie durch einzelne Sandkörner unterschiedlichen Durchmessers im Bereich weniger Millimeter dargestellt.

Es lässt sich so ein realitätsnaher Eindruck von den tatsächlichen Größenverhältnissen, wie sie auch bei einer Beobachtung durch ein kleineres Teleskop sichtbar werden, vermitteln. Die Überblicksdarstellung ergänzt damit die detaillierte Abbildung eines Einzelfleckes. Die Darstellung trägt weiterhin neben dem Titel das Aufnahmedatum (02.05.2013) des Bildes.

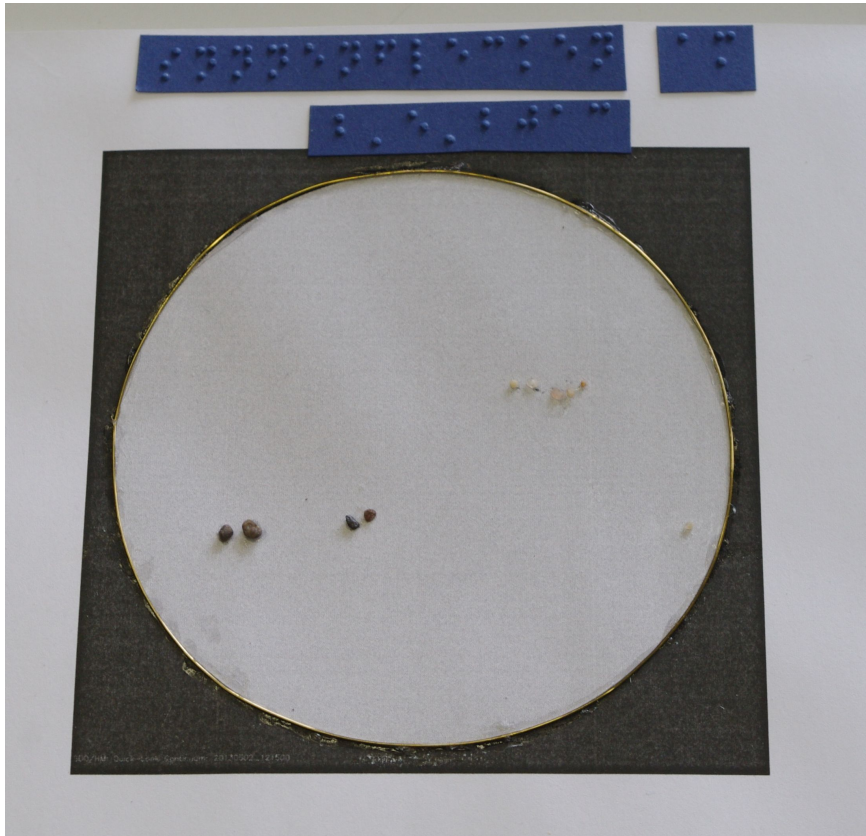


Abbildung 6.28: Vorlage zur Übersichtsdarstellung der Sonne.

6.4 Messgerät: Elektronisch-akustischer Positionswinkelmesser

Das im folgenden Abschnitt vorgestellte Messgerät basiert auf dem Funktionsprinzip einer einfachen Solarnachführung, die sich unter Verwendung von Photowiderständen selbstständig auf die Sonne ausrichtet. Übersichtsartikel zu diesem Messgerät wurden erstmals veröffentlicht in Tran Ngoc Chat und Kraus [2013] sowie Kraus [2013].

6.4.1 Zielsetzung

Neben der Vermittlung astronomischer Inhalte durch Modelle können – durch den Einsatz geeigneter Hilfsmittel – eigene astronomische Beobachtungen auch von Blinden und Sehbehinderten durchgeführt werden. Als Beobachtungsobjekt kommt dabei allem voran die Sonne in Betracht. Das Messinstrument selbst soll dabei technisch einfach gehalten sein, um den Bezug zum eigentlichen Phänomen nicht zu verlieren.

Das hier vorgestellte Instrument verfolgt die folgenden Ziele:

- Die Position der Sonne am klaren Himmel kann leicht festgestellt werden,
- Azimut und Höhe der Sonne können am Instrument abgelesen werden,
- die Unterscheidung zwischen Sonne und weiteren Lichtquellen am Himmel ist möglich.

Das Messinstrument zielt damit auf das Inhaltsfeld Bewegungen und Jahreszeiten ab. Es ermöglicht dem Nutzer dabei die Erfassung sowohl einer – aus der Beobachterperspektive – relativ schnellen Bewegung im Tagesverlauf und der langfristigen Änderungen der Sonnenbahn im Verlauf eines Jahres. Weiterhin lässt sich der Unterschied zwischen der scheinbaren Bewegung der Sonne, bezogen auf die Himmelskugel und der realen Erddrehung um die eigene Achse thematisieren. Weiterhin ist die aus Lehrplansicht wie auch aus allgemeiner astronomischer Perspektive bedeutsame Entstehung der Jahreszeiten abgedeckt.

6.4.2 Fachlicher Hintergrund

Das Horizontsystem und der Tagbogen der Sonne

Das Horizontsystem ist das natürliche Koordinatensystem eines Beobachters. Es wird mittels der namensgebenden Horizontebene und des Zenits festgelegt (Abb. 6.29).

Die Position eines Objektes wird darin mittels der Angabe von Höhe h und Azimut a festgelegt. Die Höhe wird dabei vom Horizont (0°) mit positiven Werten in Richtung Zenit ($+90^\circ$) und mit negativen in Richtung Nadir (-90°) gemessen. Die Himmelsrichtung (Azimut) wird von Süden (0°) im Uhrzeigersinn angegeben. Insgesamt lässt sich jeder beliebige

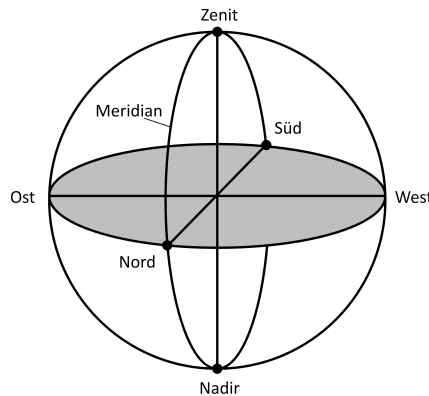


Abbildung 6.29: Festlegung von Himmelsrichtungen, Punkten und der Horizontebene in der scheinbaren Himmelskugel (nach de Boer [2001, S. 43]).

Punkt auf der Himmelskugel mit einem Koordinatenpaar beschreiben (Abb. 6.30). Die bezeichnete Position, beispielsweise eines Sterns, ist in diesem System jedoch sowohl von der Beobachtungszeit, als auch dem Beobachtungsort abhängig. [de Boer, 2001, S. 49 f.]

Vorteilhaft wirken sich bei diesem System seine, an den Alltagsgebrauch angelehnten, Begrifflichkeiten sowie die einfache Messbarkeit der Winkel aus.

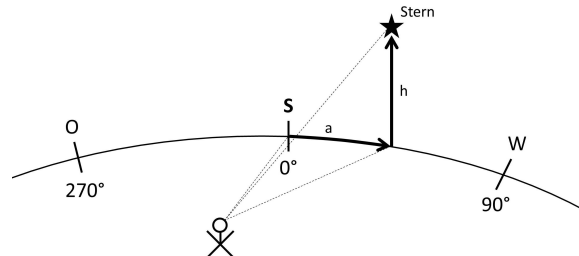


Abbildung 6.30: Bestimmung der Koordinaten eines Sterns im Horizontsystem (nach de Boer [2001, S. 50]).

Die tägliche Bewegung der Gestirne, wie etwa der Sonne, wird durch die Rotation der Erde um ihre eigene Achse hervorgerufen. Die irdische Rotationsrichtung von West nach Ost ruft den Eindruck der Bewegung der Gestirne in umgekehrter Richtung, von Ost nach West, hervor. Da nicht die Gestirne, sondern vielmehr der Beobachter die zugrundeliegende Bewegung vollführt, spricht man von einer scheinbaren Bewegung.

Eine zweite Form der scheinbaren Bewegung tritt mit der Rotation der Erde um die Sonne auf. Betrachtet man die Position der Sonne im Jahresverlauf, so bemerkt man ihre Wande-

rung durch die Sternbilder der sogenannten Tierkreiszone. Die scheinbare Bahn der Sonne im Jahresverlauf wird als Ekliptik bezeichnet. Mit dem Umlauf der Erde um die Sonne, binnen eines Jahres, ändern sich auch die Sternbilder, die während einer Nacht zu beobachten sind.

Der Umlauf um die Sonne geht für einen Beobachter auf einem höheren Breitengrad auch mit der Änderung der Kulminationshöhe und damit mit einer Verschiebung des Tagbogens der Sonne einher. Der Tagbogen ist diejenige Bahn, die die Sonne im Laufe eines Tages an der scheinbaren Himmelskugel beschreibt. Sie lässt sich, etwa in den Koordinaten des Horizontsystems, quantitativ erfassen. Änderungen am Tagbogen ergeben sich aus der Neigung der Erdachse von $23,5^\circ$. Da die Erdachse – auf genügend kleinen Zeitskalen können Nutation und Präzession vernachlässigt werden – eine räumlich feste Orientierung beibehält, kommt es durch den veränderlichen Einfallswinkel des Sonnenlichts zu einem ungleichmäßigen Strahlungseintrag pro Flächenelement. Dies ist die Ursache für die Jahreszeiten und nicht etwa, wie eine weit verbreitete Fehlvorstellung besagt (vgl. Kapitel 2.1.3), die unterschiedliche Entfernung zwischen Erde und Sonne, die durch die elliptische Umlaufbahn hervorgerufen wird.

Die verschiedenen Bewegungen (Rotation und Revolution) führen zusammen mit der Neigung der Erdachse schließlich zu den beobachtbaren Verläufen und Änderungen des Tagbogens, im täglichen und jährlichen Verlauf. Seine Beobachtung erlaubt sowohl die Bestimmung der Mittagsstunde, als auch eine Orientierung innerhalb des Kalenders durch die Länge des Tagbogens. Auch kann durch Messung der Kulminationshöhe auf den Breitengrad des Beobachters geschlossen werden.

Astronomische Beobachtungen der Sonne

Zur Bestimmung des wahren Mittags, d.h. des Zeitpunktes des höchsten Sonnenstandes, kann im einfachsten Fall ein senkrechter Schattenstab (Gnomon) verwendet werden. Exaktere Werte liefern Abbildungen der Sonne durch kleine Öffnungen in Gebäuden, die – bei entsprechend großen Abmessungen – eine höhere Genauigkeit im Sekundenbereich liefern. [de Boer, 2001, S. 30]

Neben der Länge eines Tagbogens, welche durch die unterschiedliche Kulminationshöhe der Sonne im Jahresverlauf hervorgerufen wird, werden Beobachtungen und der Vergleich der Auf- und Untergangspunkte der Sonne möglich. So geht die Sonne zum Zeitpunkt der Äquinoktien fast genau im Osten auf und im Westen unter. Tag und Nacht sind zu diesen Daten (20. oder 21. März und 22. oder 23. September) gleich lang. Die Extremwerte für die Tageslänge liegen um den 21. Juni und den 21. Dezember. Hier liegen die Auf- und Untergangspunkte an der Horizontlinie am weitesten auseinander (21. Juni) bzw. am dichtesten beisammen (21. Dezember).

Die Berechnung der Kulminationshöhe h_K der Sonne zu diesen beiden Daten ist ohne weitere Voraussetzungen möglich. Sie ergibt sich aus dem Winkel zwischen Pol und Horizont am Beobachtungsstandort (90° abzüglich geografischer Breite φ) und der Deklination δ , die zum Zeitpunkt des Sommer- und Winteranfangs – als Schiefe der Ekliptik von $23,5^\circ$ – voll zum Tragen kommt:

$$h_K = 90^\circ - \varphi \pm \delta. \quad (6.10)$$

Für den 51. Breitengrad ergibt sich damit beispielhaft:

$$h_K = 90^\circ - 51^\circ \pm 23,5^\circ. \quad (6.11)$$

Die Sonne steht demnach zum Zeitpunkt des wahren Mittags zu Sommeranfang $62,5^\circ$ und zu Winteranfang $15,5^\circ$ über dem Horizont.

Soll der Breitengrad des Beobachtungsortes festgestellt werden, kann dies etwa anhand der Bestimmung des Höhe des Polarsterns über dem Horizont erfolgen. Bei bekannter Deklination der Sonne, ist eine Breitengradbestimmung jedoch auch anhand der Kulminationshöhe der Sonne möglich. Mittels korrespondierender Beobachtungen, über einen Zeitraum um den wahren Mittag herum, wird die Sonnenhöhe gemessen. Der gesuchte Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes und die dazugehörige Sonnenhöhe werden mittels grafischer Interpolation gewonnen. Aus der gemessenen Höhe ergibt sich, unter Kenntnis der Deklination δ , die geografische Breite φ aus Formel 6.10.

Die Deklination ergibt sich dabei aus dem Zusammenspiel der Schiefe der Ekliptik sowie der Stellung der Erdachse zum gewählten Zeitpunkt. Die Deklination der Sonne schwankt im Jahresverlauf zwischen ihren Maximalwerten von $-23,5^\circ$ und $+23,5^\circ$.

Diese Art der Ermittlung des Breitengrades stützt sich, wie erwähnt, nicht ausschließlich auf die Beobachtung, sondern erfordert auch den Zugang zu einem astronomischen Tabellenwerk. Bei den Berechnungen ist noch die Zeitgleichung zu berücksichtigen, die zu nicht unerheblichen Abweichungen führen kann, im Rahmen der hier vorgestellten einfachen Überlegungen jedoch nicht weiter vertieft werden soll. [Schwarz, 2011]

Steht ein Tabellenwerk zusammen mit einer sehr genauen Uhr bereit, kann aus der eingangs dargestellten Beobachtung des wahren Mittags auch der Längengradunterschied zu einem Referenzmeridian bestimmt werden. Durch die Drehung der Erde, um 360° in etwa 24 Stunden, ergibt sich eine Verschiebung des Kulminationszeitpunktes von 4 Minuten pro Längengrad.

6.4.3 Lernziele

Das Messinstrument zur quantitativen Darstellung des Tagbogens der Sonne findet seine Anbindung in den Lehrplänen zunächst im Bereich der Beobachtungen (vgl. Kapitel 3.2.3). Die Vorbereitung, Durchführung und Protokollierung von Beobachtungen, entsprechend der

Methodik der beobachtenden Astronomie und Astrophysik, wird in sechs von sieben Lehrplänen gefordert. Dies unterstreicht die herausragende Bedeutung eigener Beobachtungen und damit ebenfalls die Notwendigkeit solche Erfahrungen auch blinden und sehbehinderten Schülern zu ermöglichen. Die scheinbare Himmelskugel in Verbindung mit dem Horizontsystem findet sich in fünf Lehrplänen. Die Rotation der Erde, die letztlich die Entstehung des Tagbogens bewirkt, wird ebenfalls in fünf Lehrplänen explizit erwähnt. Damit lassen sich folgende Lernziele festlegen:

- Die Sonne beschreibt im täglichen Verlauf einen scheinbaren Bogen an der Himmelskugel.
- Die Kulminationshöhe der Sonne und damit die Länge des Bogens über dem Horizont ist jahreszeitabhängig.
- Die Lage des Tagbogens ist ursächlich für die jahreszeitlichen Unterschiede des Wetters.
- Die Kulminationshöhe der Sonne ist abhängig vom Beobachtungsstandort.
- Die Position der Sonne lässt sich mittels Azimut und Höhe beschreiben.

6.4.4 Umsetzung

Für die Umsetzung in ein unabhängiges Messgerät wurden die folgenden Rahmenbedingungen definiert:

- Das Auffinden und die Identifizierung der Sonne erfolgen anhand der ausgegebenen Tonhöhe,
- das Instrument ist durch eine blinde Person eigenständig zu bedienen,
- das Gerät ist portabel.

Positionsbestimmung

Bei der Realisierung stellt sich zunächst die Frage, wie sich die Position der Sonne auf einfache Weise, jedoch ebenso mit einiger Genauigkeit, feststellen lässt. Die Wahl fiel dabei auf Fotowiderstände zur Messung der Helligkeit, wovon das Instrument jeweils zwei für beide Achsen (Azimut und Höhe) besitzt.

Die beiden Fotowiderstände für eine Achse sind dabei durch ein dünnes Holzbrettchen voneinander getrennt. Dieses bewirkt eine Abschattung von jeweils einem Widerstand, solange der Lichteinfall nicht genau senkrecht erfolgt. Sofern eine ungleichmäßige Einstrahlung vorliegt, weisen die beiden Fotowiderstände unterschiedliche Widerstandswerte auf, die mittels einer einfachen Schaltung (Details s.u.) und einem spannungsgesteuerten Oszillator (VCO) mittels eines Lautsprechers hörbar gemacht werden. Die Tonhöhe nimmt dabei ab, je mehr

sich die Widerstandswerte einander annähern, d.h. je gleichmäßiger der Lichteinfall beide Widerstände trifft. Die Positionsbestimmung erfolgt somit für beide Achsen getrennt. Ein Schalter erlaubt den Wechsel zwischen den beiden Paaren von Fotowiderständen.

Die Fotowiderstände selbst sind am Ende eines Zeigers angebracht. Dieser Zeiger dient zunächst zur Bestimmung der Höhe. Zusätzlich ist das Instrument als Ganzes drehbar gelagert, sodass mittels eines zweiten Zeigers der Azimut ermittelt werden kann. Zur Bestimmung des



Abbildung 6.31: Gesamtansicht des Messinstrumentes.

Azimuths ist die Kenntnis der Ausrichtung des Messinstrumentes im Horizontsystem notwendig. Auch diese Ausrichtung soll für einen blinden Beobachter selbst möglich sein. Daher wurde eine einfache Kompassnadel an der Basis des Winkelmessers angebracht, die eine grobe Einstellung in Südrichtung ermöglicht. Abbildung 6.31 zeigt die Gesamtansicht des fertigen Instrumentes.

Identifizierung des Untersuchungsobjektes

Das Messinstrument erlaubt zunächst einmal lediglich das Auffinden der hellsten Stelle des Himmels. Dabei muss es sich jedoch nicht zwangsweise um die Sonne handeln. Man denke

etwa an helle Beleuchtungseinrichtungen an dunklen Tagen oder auch an eine wolkenverhangene Sonne und die Reflexion des Sonnenlichtes an hellen Wolken. Dementsprechend muss die Identifikation des Objektes mittels seiner gemessenen absoluten Helligkeit erfolgen. Das Modell verfügt dazu über einen fünften Fotowiderstand, der speziell diesem Zweck dient. Mittels eines Schalters wird in den Messmodus für die Helligkeit umgeschaltet. Anhand der Frequenz des erzeugten Tons kann auf die Helligkeit des anvisierten Objektes geschlossen werden.

Da die Helligkeit der Sonne jedoch keineswegs konstant ist, sondern durch Wolkenschleier sowie die winkelabhängige atmosphärische Extinktion beeinflusst wird, müssen Vergleichswerte für verschiedene Konstellationen herangezogen werden. Abbildung 6.32 zeigt eine solche Zuordnung beispielhaft. Es wird deutlich, dass bereits ein leichter Wolkenschleier eine deutliche Frequenzabnahme bewirkt. Ab einem Sonnenstand von weniger als 10° , d.h. um den Zeitpunkt des Sonnenauf- und -untergangs herum, ist die Helligkeit so niedrig, dass die Unterscheidung von einer anderen Lichtquelle nicht mehr in allen Fällen zweifelsfrei erfolgen kann. Hier sollte entsprechend über einen längeren Zeitraum beobachtet werden, um Fehlinterpretationen vorzubeugen.

Technische Ausführung

Am Seitenteil der runden Basis, die einen Durchmesser von 20 cm aufweist, wurde eine Folie mit einer tastbaren Skala angebracht. Die Skala ist in 5° Schritte unterteilt und in 10° -Abschnitten mit Brailleschrift versehen. Mittig auf die Basis aufgesetzt ist der halbkreisförmige Träger für die Skala des Höhenwinkels. Diese wurde ebenfalls per Tiefziehverfahren für Blinde tastbar gemacht. Sämtliche Bedienelemente befinden sich auf der Seite des Zeigers. Dies sind der Ein/Aus-Schalter, die Umschaltung zwischen Azimut und Höhe, der Umschalter für die Helligkeitsbestimmung und ein Lautstärkereglер. Alle Bedienelemente wurden mit Braille-Beschriftungen versehen.

Die gesamte Technik – in Form einer Platine und der Verkabelung – wurde innerhalb der Basis verborgen. Lediglich die 9 V-Batterie bleibt an der Oberseite leicht zugänglich.

Der zugrunde liegende Schaltplan ist in Abbildung 6.33 wiedergegeben. Der linke Teil, rund um die Transistoren T_0 , T_1 und T_2 sorgt mit den beiden Zenerdioden für die Bereitstellung und Stabilisierung der benötigten Spannungen von 5,6 V (IC und Lautsprecher) und 2,6 V (Fotowiderstände). Bei den beiden Paaren von Widerständen (R_1 , R_2 sowie R_3 , R_4) handelt es sich um die Fotowiderstände zur Richtungsbestimmung. Der Schalter K_1 erlaubt das Umschalten zwischen der Messung von Azimut und Höhe. Der Fotowiderstand R_5 dient der unabhängigen Helligkeitsbestimmung, er wird bei Bedarf mit dem Schalter K_2 zum IC durchgeschaltet. Die beiden Potentiometer (VR_1 , VR_2) dienen der Kalibrierung der Fotowiderstände. Hiermit lässt sich ein eventuelles Abweichen der Widerstandswerte bei senkrechter Einstrahlung kompensieren.

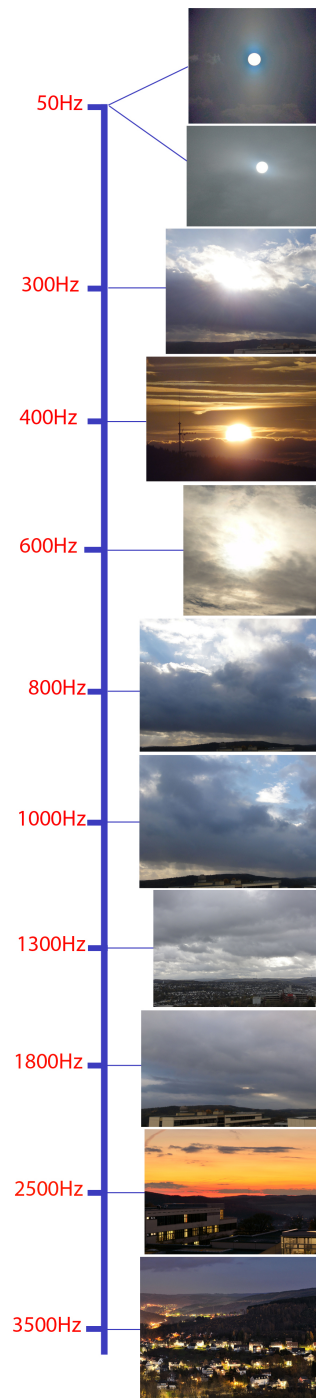


Abbildung 6.32: Zuordnung verschiedener Bewölkungsgrade und Tageszeiten zu den resultierenden Frequenzen.

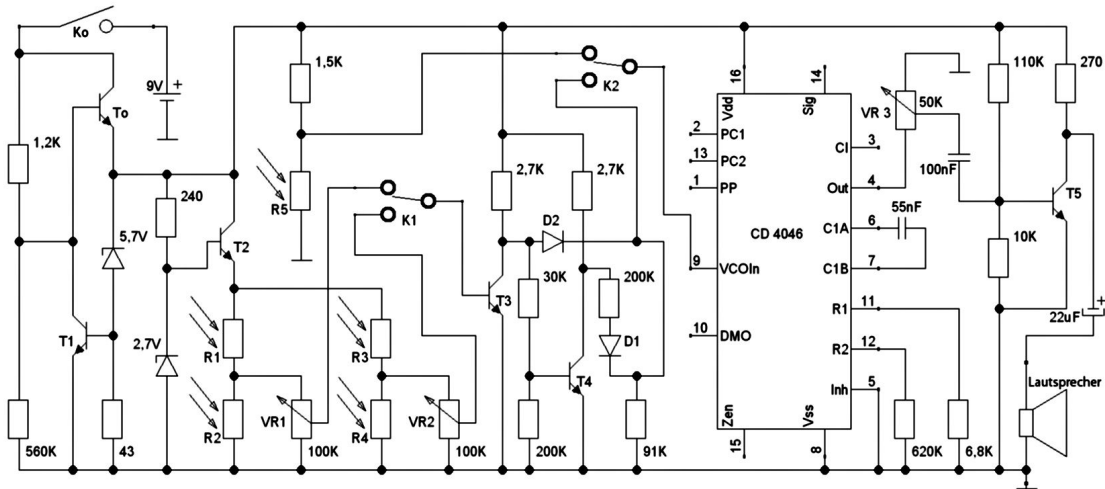


Abbildung 6.33: Schaltplan des Winkelmessers.

Der mittlere Bereich der Schaltung, um T₃ und T₄ sowie die Dioden D₁ und D₂ herum, ist der Verstärker, der das Signal dem Eingang 9 des IC zuleitet. Weiterhin sorgt diese Baugruppe für eine Anhebung der Spannung auf 0,5 – 4,6 V, um die gesamte Bandbreite der zulässigen Eingangsspannung des ICs nutzen zu können. Das eigentliche Kernstück der Schaltung ist ein IC vom Typ CD4046. Hier wird die aufbereitete Eingangsspannung in ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 50 – 3.800 Hz umgewandelt.

Das Potentiometer VR₃ auf der Ausgangsseite des IC ist der Lautstärkereglер. Der Transistor T₅ sowie die ihn umgebenden Bauteile, dienen wiederum der Signalverstärkung bevor die Ausgabe über den Lautsprecher erfolgt.

Untersucht man die ausgegebene Frequenz der Schaltung in Abhängigkeit der Abweichung vom senkrechten Lichteinfall, so zeigt sich das in Abbildung 6.34 dargestellte Bild. Erfolgt die Bestrahlung der Fotowiderstände aus östlicher Richtung, so erzeugt die Schaltung – unabhängig von der Größe der Abweichung – ein Signal von 1,2 kHz. Eine Einstrahlung aus westlicher Richtung hingegen ergibt ein Signal von 2,1 kHz. Die beschriebene Funktion findet sich ebenso bei der Einstellung der Höhe. Damit soll das zügige und problemlose Auffinden der Sonne erleichtert werden.

Nähert man sich der optimalen Ausrichtung von Osten kommend, so zeigt sich ein sehr steiler Abfall der Frequenz mit dem Winkel bis hin zum Minimalwert von ca. 50 Hz. Würde dieser steile Abfall jedoch auch bei einer Annäherung aus der entgegengesetzten Richtung auftreten, wäre die Positionierung erheblich erschwert, da bereits minimale Verschiebungen eine drastische Änderung der Frequenz zur Folge hätten. Die Schaltung wurde daher so angelegt, dass die zweite Flanke deutlich flacher abfällt. Damit wird ein langsames Herantasten an die optimale Ausrichtung möglich. Auch diese Funktion ist durch die Baugruppe

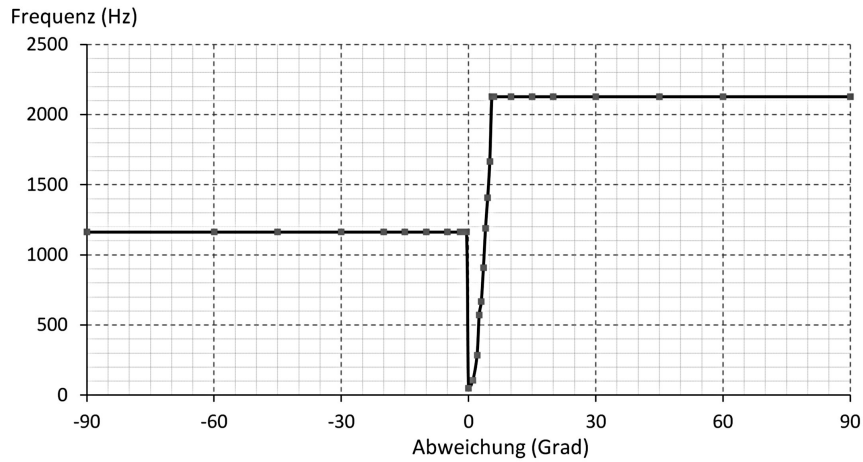


Abbildung 6.34: Frequenz in Abhängigkeit der Abweichung von der optimalen Ausrichtung.

um die Transistoren T_3 und T_4 herum realisiert.

Tabelle 6.13: Ausführliche Materialliste zum Messgerät: Sonnennavigator.

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl
Widerstand	43 Ω	1
Widerstand	240 Ω	1
Widerstand	270 Ω	1
Widerstand	1,2 k Ω	1
Widerstand	1,5 k Ω	1
Widerstand	2,7 k Ω	2
Widerstand	6,8 k Ω	1
Widerstand	10 k Ω	1
Widerstand	30 k Ω	1
Widerstand	91 k Ω	1
Widerstand	110 k Ω	1
Widerstand	200 k Ω	2
Widerstand	560 k Ω	1
Widerstand	620 k Ω	1
Potentiometer VR_3	50 k Ω	1

Ausführliche Materialliste zum Messgerät: Sonnennavigator. – **Fortsetzung**

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl
Potentiometer VR ₁ +VR ₂	100 kΩ	2
Fotowiderstände R ₁ -R ₅	VT 93 N1	5
Kondensator	22 μF	1
Kondensator	55 nF	1
Kondensator	100 nF	1
Zenerdiode	2,7 V	1
Zenerdiode	5,7 V	1
Diode D ₁		1
Diode D ₂		1
Transistor T ₀		1
Transistor T ₁ -T ₅		1
IC	CD 4046	1
Schalter K ₀	2-polig	1
Schalter K ₁ +K ₂	3-polig	2
Lautsprecher	100 Ω	1
9 V-Blockbatterie		1

Bedienung

Die Bestimmung der Sonnenposition gelingt, einen ausreichend klaren Himmel vorausgesetzt, indem zunächst der Zeiger für den Höhenwinkel auf etwa 45° eingestellt wird. Nach dem Umschalten auf die Azimut-Fotowiderstände wird mittels einer Drehung der Basis die grobe Sonnenrichtung bestimmt. Danach erfolgt die ebenfalls grobe Bestimmung der Höhe. Mehrfaches Umschalten mit jeweiliger Feinjustierung – hin zum immer tieferen Ton – macht das Ermitteln der hellsten Stelle der Umgebung schnell und einfach möglich. Um sich der Natur des aufgefundenen Objektes zu versichern, kann jetzt die Umschaltung auf die Helligkeitsmessung erfolgen. Zeigt das Instrument nun durch eine besonders niedrige Frequenz eine Helligkeit im Bereich der Sonnenhelligkeit an, kann mit dem tastenden Ablesen beider Skalen begonnen werden. Beide Achsen lassen sich dazu mittels Flügelschrauben fixieren, um ein versehentliches Verstellen in dieser Phase zu unterbinden.

Voraussetzung für die Nutzung des hier vorgestellten Winkelmessers ist ein nahezu wolkenloser Himmel. Bei stärkerer Bewölkung und bedecktem Himmel kann durch den Einfall von Infrarotstrahlung, insbesondere in Zenitnähe, ein Frequenzminimum deutlich abseits der Sonnenposition auftreten. Dabei liegt die ausgegebene Frequenz jedoch oberhalb des Referenzwertes für die direkte Sonneneinstrahlung. Auch kann eine solche Fehlpositionierung durch Personen und ihre Bewegungen im Nahbereich hervorgerufen werden. Eine solche Beeinflussung ist bei korrekter Positionierung nur in geringem Maße feststellbar.

Präzision und Fehlerquellen

Die mögliche Genauigkeit der Positionsbestimmung per Fotowiderstand, wird auf etwa $0,5^\circ$ geschätzt. Die Genauigkeit des Messinstrumentes wird jedoch durch die Toleranz bei der Fertigung der Holzkonstruktion (Neigung der Basis gegenüber der Horizontalen etc.) sowie die Ausrichtung des Winkelmessers anhand des Kompasses beschränkt. Weiterhin spielt für die Ablesegenauigkeit natürlich die Größe der Skalen eine entscheidende Rolle. Die Skalierung fällt dementsprechend mit 5° -Schritten relativ grob aus, was für erste eigene Messungen am Tagbogen jedoch ausreichend erscheint.

Als wesentliches Hindernis für das Erzielen genauer Ergebnisse lässt sich die Prozedur des Einnordens identifizieren. Prinzipiell lassen sich Messungen zwar auch innerhalb von Gebäuden ausführen, die Abweichung von der Nordrichtung ist in vielen Fällen jedoch inakzeptabel groß.

Bei der Ausrichtung des Instruments entlang der West-Ost-Achse eines Gebäudes gelangen Positionsbestimmungen der Sonne mit einer Genauigkeit von ca. 4° oder besser für Höhe und Azimut. Die Streuung der Messwerte der Höhenbestimmung fällt dabei, etwas größer aus (vgl. Tab. 6.14). Die dargestellte Ablesegenauigkeit wurde durch Interpolation bei der visuellen Ablesung der tastbaren Skala erreicht.

Tabelle 6.14: Mess- und Referenzwerte zum Winkelmesser – Referenzwerte aus Sternkartensoftware „Stellarium“.

Datum	Uhrzeit	Messwerte		Referenzwerte	
		Azimut	Höhe	Azimut	Höhe
09.11.2012	10:35	335°	22,5°	335°	18°
12.11.2012	12:05	359°	23,5°	358°	21°
12.11.2012	14:48	32,5°	17,5°	38,5°	17°
12.11.2012	15:05	41°	13°	41°	11,5°
12.11.2012	16:30	59°	3°	59°	1°
13.11.2012	09:06	314°	8°	315°	9,85°

Mit einem mittleren Fehler von 1° für den Azimut bzw. 1,5° für die Höhe, ist das Instrument grundsätzlich für die angedachten Einsatzzwecke geeignet. Zu beachten ist dabei, dass beim Ablesen der Skala durch ein Ertasten der Zeigerstellung, die Genauigkeit deutlich hinter den dargestellten Werten zurückbleiben kann.

Kriterienkatalog zur Umsetzung

Zur Beurteilung der Eignung des Winkelmessers für den Schulunterricht wird auch hier der Kriterienkatalog für Modelle herangezogen (vgl. 5.4.5). Sein Betrieb ist allein mit einer Batterie und ohne weiteres Zusatzmaterial möglich. Ist ein geeigneter Aufstellungsort (bei passenden Witterungsverhältnissen) vorhanden, kann sofort mit der Messung begonnen werden. Der zentrale Inhalt, d.h. die Position der Sonne wird unmittelbar zugänglich, indem die Positionsdaten über die Zeiger abgelesen werden. Weiterhin wird mit dem Gehör eine selten genutzte Wahrnehmungsform angesprochen.³⁸ Die Produktion des Winkelmessers erfordert die Herstellung der Elektronik sowie tastbarer Beschriftungen und einer geeigneten Tragkonstruktion. Der Produktionsaufwand kann daher nicht mehr als gering bezeichnet werden.

6.4.5 Begleitmaterial

Bedienungshinweise

Der Schülertext zum Winkelmesser führt zunächst die Charakteristika des Tagbogens der Sonne und die notwendigen Fachbegriffe ein. Die unterschiedliche Länge des Bogens in Ab-

³⁸Die Repräsentation von Helligkeiten durch unterschiedliche Tonhöhen wird natürlich bereits an Blindenschulen praktiziert, genannt sei etwa das Optophon. Dennoch ist die Wahrnehmung der Himmelhelligkeit über das Gehör noch kein alltäglicher Vorgang.

Tabelle 6.15: Kriterienkatalog für den Winkelmesser.

Kriterium	erfüllt?
Betrieb ohne Spannungsquelle oder mit Netzteil?	✓
Betrieb ohne Zusatzmaterial?	✓
Kurze Vorbereitungszeit?	✓
Inhalte unmittelbar zugänglich?	✓
Direkte Assoziation des Modells mit Inhalt?	
Selten genutzte Wahrnehmungsform angesprochen?	✓
Nutzung gefahrlos möglich?	✓
Niedriger Produktionsaufwand?	

hängigkeit der Jahreszeit wird thematisiert und durch die entsprechende tastbare Darstellung konkretisiert.

Es folgt die Einführung des Horizontsystems und eine kurze Beschreibung in die prinzipielle Funktionsweise der Positionsbestimmung, durch den vorliegenden Winkelmesser. Den Abschluss bildet eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zum Einstellen der Position der Sonne, Verifizierung des untersuchten Objektes und Ablesen der Koordinaten.

Der komplette Schülertext bzw. die Bedienungshinweise finden sich in Anhang B.4.

Tastbare Darstellung

Die tastbare Darstellung zum Winkelmesser soll auf einfache Weise eine Vorstellung von der Änderung des Tagbogens der Sonne im Jahresverlauf vermitteln. Dazu werden 3 Tagbögen nachgebildet (siehe Abbildung 6.35), die die Situation zu den Extrempositionen der Sonne im Juni und Dezember sowie der Zwischenstation im März darstellen (vgl. Kapitel 6.4.2). Die Achsen für die Himmelsrichtung (Abszisse) und des Höhenwinkels über dem Horizont (Ordinate) bestehen aus Federstahl von 1 mm Durchmesser, die Bögen sind aus 0,5 mm Messingdraht gefertigt. An der Abszisse sind die Himmelsrichtungen des Auf- und Untergangspunktes der Sonne, durch die Worte „West“ und „Ost“, markiert.

Der höchste Punkt der Tagbögen von Juni und Dezember (obere Kulmination der Sonnenwenden) ist zusätzlich mit einer gestrichelten Linie versehen, die die Zuordnung zu den entsprechenden Winkelangaben auf der Höhenskala vereinfachen soll. Diese Linie besteht aus ca. 3 mm langen und 0,8 mm dicken Kupferdrahtstücken. Sie soll durch die Art der Ausführung deutlich als Hilfslinie kenntlich sein.

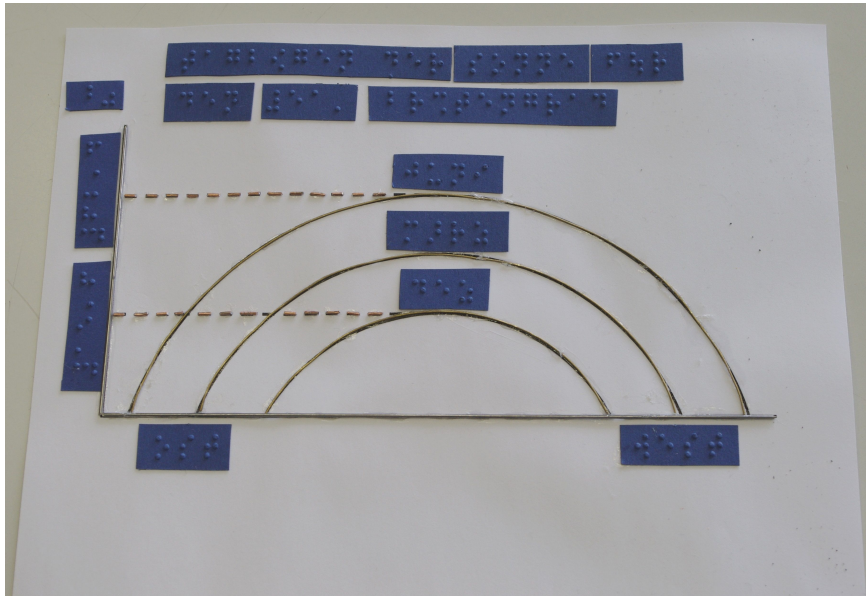


Abbildung 6.35: Vorlage zur tastbaren Darstellung: Tagbögen der Sonne im Jahresverlauf am 51. Breitengrad.

Abbildung 6.36 zeigt die fertige Darstellung nach dem Tiefziehvorgang. Schwierig gestaltet sich bei dem gewählten Abbildungsformat die Platzierung der Beschriftungen in Brailleschrift, sodass die Ordinatenachse fast vollständig durch die beiden Winkelangaben ausgefüllt wird.

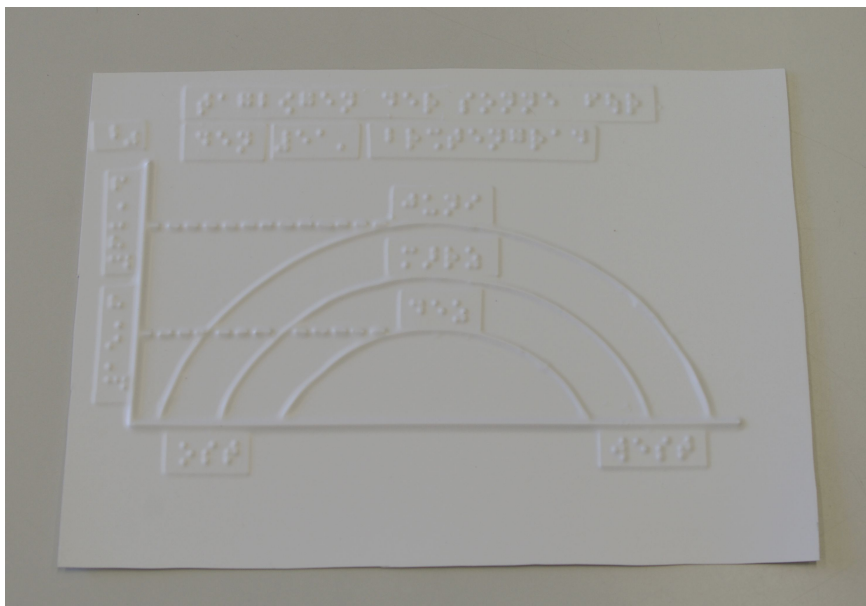


Abbildung 6.36: Tastbare Darstellung: Tagbögen der Sonne für den 51. Breitengrad zu den Extrempositionen im Juni und Dezember sowie einem Zwischenwert im März.

6.5 Tiefziehmaschine zur Herstellung tastbarer Darstellungen

Neben den Begleittexten, die Erklärungstexte und Arbeitsaufträge enthalten, müssen den Modellen auch grafische Darstellungen beigelegt werden. Damit soll der Übergang von der enaktiven Repräsentationsebene³⁹ der Modelle zur symbolischen Ebene der physikalischen Zusammenhänge im Text, durch den Einschub ikonischer Darstellungen, erleichtert werden. Darüber hinaus werden die Texte, durch weitere Informationen in Form grafischer Darstellungen, bereichert. Weiterhin ist zu bedenken, dass sich einige astronomische bzw. astrophysikalische Zusammenhänge – allen voran sei das HRD genannt – kaum überzeugend vermitteln lassen, ohne auf eine grafische Darstellung zurückzugreifen.

Wiederum im Hinblick auf die Herausforderungen der Inklusion sei an dieser Stelle auf die Schwierigkeit hingewiesen adäquate Darstellungen auch für sehbehinderte Schülerinnen und Schüler anzubieten. Die Bereitstellung sollte dabei rasch und kostengünstig erfolgen und auf die jeweiligen Unterrichtsinhalte und individuellen Erfordernisse der Lernenden abgestimmt sein.

Im Hinblick auf diese Arbeitsbedingungen und den Wunsch, ohne Rückgriff auf externe Dienstleister tastbare grafische Darstellungen einbeziehen zu können, wurde ein Vorschlag für die Konstruktion einer einfachen Tiefziehmaschine entwickelt.

Die Anforderungen an die Tiefziehmaschine sind daher im Einzelnen:

- Einfache und schnelle Konstruktion,
- leicht zu beschaffendes Material,
- einfache Bedienung mit wenig Einarbeitungszeit,
- Verwendung von kostengünstigem Verbrauchsmaterial,
- Größe der Darstellungen im Bereich von DIN A5.

Für die Verwendung in der nun vorgestellten Tiefziehmaschine muss eine grafische Darstellung zunächst als Positiv vorliegen. Unterschiedlich ausgeprägte Linien bzw. Strukturelemente werden dabei über verschieden dicke bzw. hohe Objekte auf der Vorlage realisiert.

Da mit Tiefziehfolie gearbeitet wird, muss das gesamte Material in gewissen Grenzen hitzebeständig sein. Verwendet werden etwa Federstahl in unterschiedlichen Durchmessern oder auch Sand und Sandpapier. Das Material wurde dabei mit einem herkömmlichen Klebstoff auf der Unterlage befestigt.⁴⁰

Die Tiefziehfolie wird mit einem herkömmlichen Heißluftföhn, auf Temperaturen von ca. 140 °C, erwärmt. Dabei muss zwingend auch der äußere Bereich der Folie erhitzt werden um

³⁹Im Sinne der Repräsentationsebenen nach Bruner: enaktiv – Auseinandersetzung mit Gegenständen; ikonisch – Anhand bildlicher Darstellungen; symbolisch – Erfassung anhand von Symbolen

⁴⁰Detaillierte Beschreibungen zu den verwendeten Positiven sind in den Kapiteln der Modelle jeweils unter dem Punkt Begleitmaterial zu finden.

einer Faltenbildung entgegenzuwirken. Der Föhn muss stets in Bewegung gehalten werden, da die Folie sonst durch die zu große Hitze Schaden nimmt, was sich zuerst in Verfärbungen und schließlich in Blasenbildung und Einreißen der Folie äußert.

Die Tiefziehmaschine besteht aus einer nach unten hin verschlossenen Box, deren Oberseite aus einem Metall-Lochblech besteht. An einer Längsseite ist eine Bohrung zum Anschluss eines haushaltsüblichen Staubsaugers vorhanden (Bild 6.37).

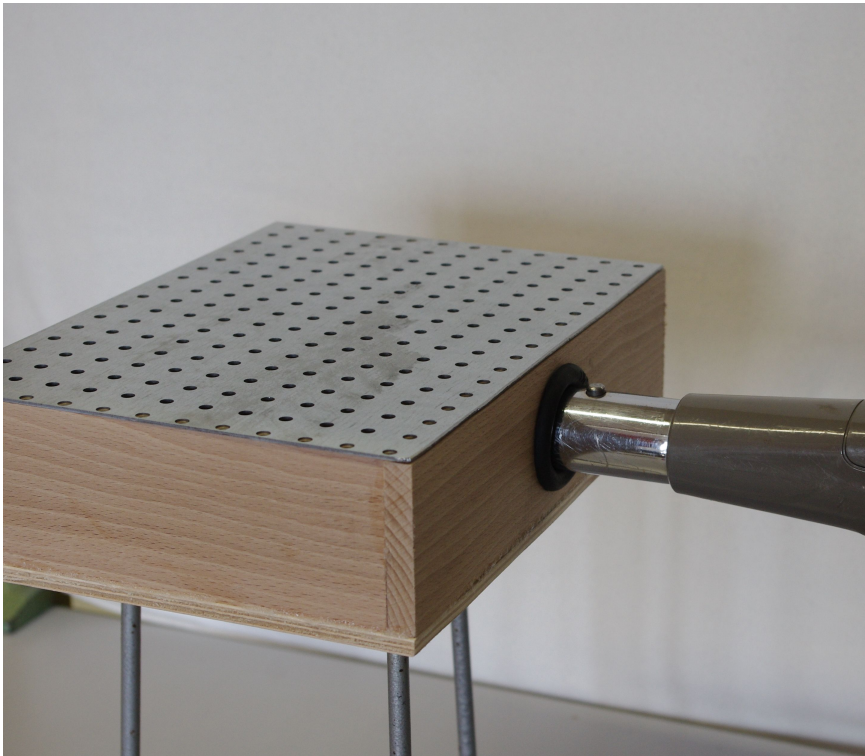


Abbildung 6.37: Tiefziehmaschine mit angeschlossenem Staubsauger.

Da sich die Tiefziehfolie beim Erwärmen stark ausdehnt und Falten wirft, muss sie während des Tiefziehvorgangs kontinuierlich straff gezogen werden. Dies wird durch Anhängen von Massestücken von jeweils 200 g an allen vier Seiten der Folie bewerkstelligt (siehe Abb. 6.38). Die Folie wird dabei so erwärmt, dass sich ihre Ecken eng an das Lochblech anschmiegen und der Unterdruck so verstärkt wird.

Um die Luftströmung durch das Lochblech nicht zu behindern, muss das Positiv auf ein Trägermaterial aufgebracht werden, welches ebenfalls luftdurchlässig ist. Dazu wurde auf einfaches Papier (80 g/m^2) zurückgegriffen. Die Verwendung von Papier reduziert die Kosten und den Aufwand für die Herstellung des Positivs. Das fertige Positiv wird auf das Lochblech gelegt und mit einem Stück Tiefziehfolie abgedeckt.



Abbildung 6.38: Tiefziehmaschine mit aufgelegter Folie und angehängten Gewichten.

Versuche zeigten, dass mit dieser Variante eine ausreichend hohe Abbildungsqualität, auch von feinen Details, gelingen kann.

Bei der Herstellung der tastbaren Darstellungen sei auf die starke Erwärmung – insbesondere des Lochblechs – mit der daraus resultierenden Verletzungsgefahr an dieser Stelle ausdrücklich hingewiesen.

Für den Bau der Tiefziehmaschine wird folgendes Baumaterial benötigt:

- Holzleisten für den Rahmen,
- Holzbrett für den Boden,
- Stahl-Lochblech.

Bei der Herstellung kam als Werkzeug zum Einsatz:

- Kontaktklebstoff,
- Metall- und Holzsäge,
- Bohrmaschine mit Forstnerbohrer.

Der Betrieb der Tiefziehmaschine erfordert als Zubehör weiterhin einen Heißluftföhn sowie einen Staubsauger.

Tiefziehfolie

Nach Beyer [1995, S. 35] sind an die Tiefziehfolien einige Anforderungen zu stellen, um die notwendige Qualität der Darstellungen zu gewährleisten. Zunächst soll das Material glatt aber nicht glänzend sein. Bei ausschließlicher Reproduktion von Punktsschrift soll seine Dicke bei 0,1-0,15 mm liegen. Zur Darstellung flacher Reliefs bis zu einer Höhe von 3 mm ist eine Foliendicke von 0,2-0,25 mm zu wählen. Um größere Reliefhöhen zu erreichen kann auf Folien von 0,3-0,35 mm zurückgegriffen werden. Die Grenzgröße der Foliendicke, für die – bei größtmöglicher Qualität der Vorlage und einer hochwertigen Tiefziehmaschine – die Punktsschrift noch lesbar ist, liegt bei 0,4 mm.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde durchgängig auf Folien mit einer Dicke von 0,3 mm zurückgegriffen, wenngleich die Reliefhöhe kaum 3 mm übersteigt. Unter Anwendung der in Abschnitt 6.5 dargestellten Techniken konnte auch mit dieser Folie durchgängig eine ausreichend hohe Qualität der Punktsschriftanteile innerhalb der Grafiken erreicht werden.

Herstellung der Vorlagen

Die Verwendung der Tiefziehmaschine erfordert – aufgrund der Oberseite aus Lochblech – die Verwendung eines luftdurchlässigen Trägermaterials. Hierbei kann auf gewöhnliches Kopierpapier zurückgegriffen werden. Das Papier ist unterhalb der Tiefziehfolie vor dem direkten Einfluss des Heißluftföhns ausreichend geschützt.

Für ein Diagramm können Achsen etwa aus dünnen Federstahlstäben hergestellt werden. Ihr Durchmesser kann dabei bis auf 0,5 mm reduziert werden, ohne auf eine befriedigende Ertastbarkeit verzichten zu müssen. Bei der professionellen Herstellung kommen zum Teil Bleischnüre zum Einsatz, denen mit speziellen Walzen verschiedene Muster eingeprägt werden. Damit lassen sich linienhaft dargestellte Elemente auch voneinander unterscheiden, ohne auf verschiedene Durchmesser zurückzugreifen. Derartiges Werkzeug steht i.d.R. jedoch nicht zur Verfügung. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Vorlagen sollen daher auch ohne externe Zuarbeiten dieser Art auskommen.

Flächige Elemente lassen sich mit Sand oder Schmirgelpapier, von unterschiedlicher Körnung, realisieren. Die Befestigung aller Elemente kann mit herkömmlichem Flüssigklebstoff erfolgen. Seine Hitzebeständigkeit ist genügend hoch um einer Ablösung von der Papierunterlage zu widerstehen. Überschüssiger Klebstoff muss dabei entfernt werden. Zum einen, um ein Verkleben von Unterlage und Folie zu verhindern und zum anderen, um keine unbeabsichtigten Erhebungen auf der Folie zu erzeugen.

Die Herstellung eines Positivs auf Papier kann, je nach verwendeten Materialien und der Komplexität des darzustellenden Inhalts, eine halbe bis eine Stunde in Anspruch nehmen. Das fertige Positiv ist wiederverwendbar und leicht aufzubewahren.

Sollen Skalen oder ähnliches für Geräte (wie etwa im Fall des Winkelmessers, siehe Kapitel 6.4) erstellt werden, ist die Verkürzung von Länge und Breite der Folie, durch die Einprägung des Reliefs, zu berücksichtigen und entsprechend auszugleichen.

Umsetzung von Text in Blindenschrift

Neben der Herstellung von Braille-Beschriftung durch eine einfachen Prägezange (Bild 6.39), kann die dargestellte Tiefziehmaschine für Beschriftungen genutzt werden. Der Vorteil liegt hierbei in der variablen Anordnung des Textes und seiner direkten Verknüpfung mit weiteren tastbaren Elementen, wie etwa Skalen. Weiterhin ist man, im Gegensatz zu einer Prägezange, die i.d.R. nur über ein englisches Alphabet verfügt, frei in der Erzeugung von seltenen Sonderzeichen.

Sollen Braille-Beschriftungen direkt in eine Vorlage eingebunden werden, so sollten die Braille-Zeichen zunächst mit Hilfe einer Schreibtafel in Pappe gestanzt werden (Bild 6.40). Zwar lassen sich auch die Kunststoffstreifen aus der Prägezange auf die Vorlagen aufbringen, diese werden durch den Heißluftföhn jedoch häufig beschädigt, worunter die Qualität des

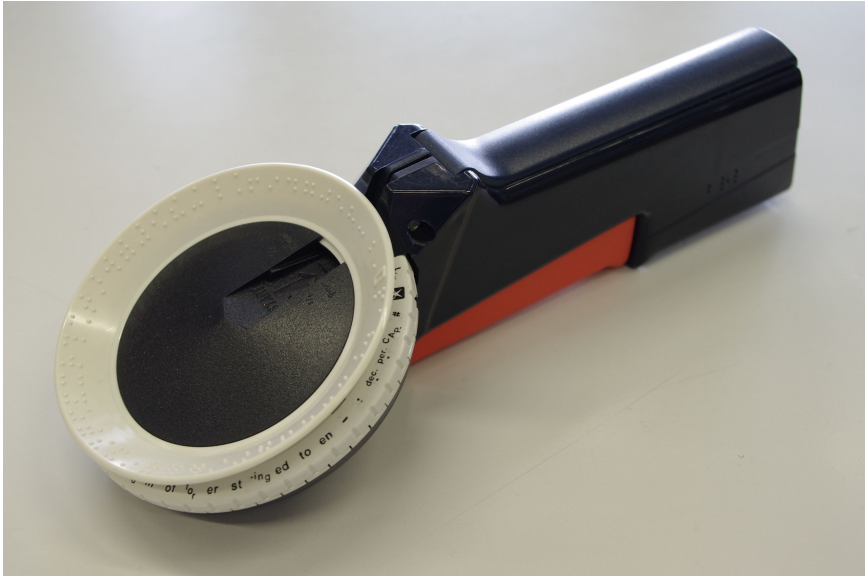


Abbildung 6.39: Prägezange für Kunststoffprägeband – englischer Zeichensatz.

Schriftbildes leidet. Braille-Beschriftungen aus Pappe sind hingegen unproblematisch in der Handhabung und garantieren eine optimale Wiederverwertbarkeit der Tiefziehvorlagen.⁴¹

⁴¹Ich danke Herrn Rainer Damerius für den freundlichen Hinweis zur Verwendung von Pappe bei der Herstellung der Beschriftung.

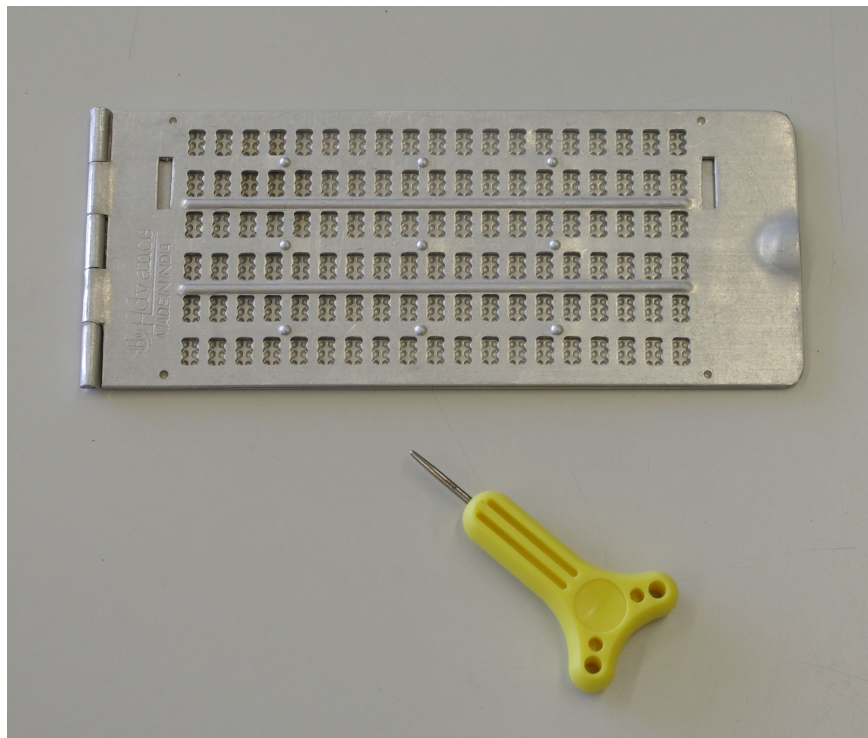


Abbildung 6.40: Schreibtafel und Griffel zum Stanzen von Brailleschrift in Pappe.

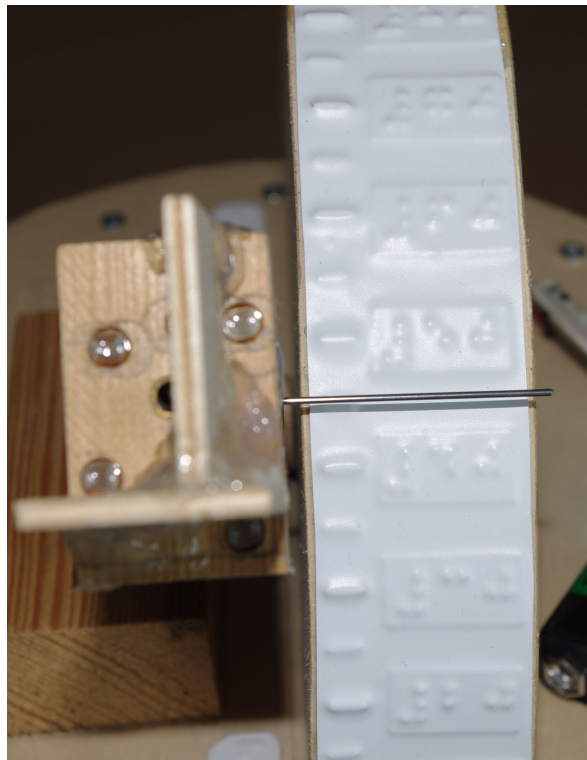


Abbildung 6.41: Nahansicht der tastbaren Skala des Winkelmessers.

6.6 Ausgeschlossene Methoden und Modelle

Im Laufe des Planungs- und Herstellungsprozesses der Modelle wurden verschiedene Zugänge und technische Umsetzungsformen in Betracht gezogen, von denen sich einige als nicht umsetzbar herausstellten. Da jedoch auch solche Ansätze wertvolle Erfahrungen und Einsichten bieten können, soll im Folgenden eine kurze Auswahl davon dargestellt werden.

Bei der Umsetzung des Modells „tastbare Hauptreihensterne“ stellte sich von Anfang an die Frage nach einer technisch günstigen Realisierung des Modells. Als Ziel wurde vorab eine einheitlich warme Oberfläche eines kugel- oder halbkugelförmigen Körpers definiert. Als einfache Möglichkeit wurde eine Kugel angesehen, die in einem Behälter mit warmem Wasser schwimmt. Ein Deckel mit einer Öffnung entsprechend dem Kugeldurchmesser sollte das Wasserbad abschirmen, sodass lediglich eine Hälfte der Kugel zugänglich sein würde (ähnlich dem realisierten Modell, vgl. Kapitel 6.1). Es zeigte sich jedoch, dass sich die Kugel – die zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit im Verlauf mit Aluminium gefüllt wurde – niemals eine gleichmäßige Temperatur an ihrer Oberfläche aufwies. Weiterhin stieg, bedingt durch die notwendigen hohen Temperaturen des Wasserbades, kontinuierlich warmer Wasserdampf zwischen Deckel und Kugel empor, was als irritierend empfunden wurde.

Entsprechend dieser Erfahrungen wurde die Füllung der Kugel mit Wasser zur Lösung der aufgetretenen Probleme in Betracht gezogen. Um die notwendige Heizleistung klein zu halten, bei gleichzeitiger ausreichender Größe des Modellsterns von 10 bis 15 cm, sollte in eine Acrylkugel eine zweite kleinere Kugel eingebracht werden. Der Zwischenraum konnte so auf 1 bis 2 cm verkleinert werden. In den wassergefüllten Hohlraum wurden sodann Widerstandsdraht als Heizdraht eingebracht. Es zeigt sich jedoch, dass zum einen der Widerstandsdraht sehr anfällig für mechanische und thermische Belastungen war und entsprechend häufig brach. Weiterhin verformten sich die Acrylkugeln bereits bei geringer Erwärmung, was zu Undichtigkeiten führte. Daraufhin wurde der Einsatz von Metall-Hohlkugeln beschlossen, die kontinuierlich von warmem Wasser durchströmt werden.

Die Darstellung von Sternen spielt im Bereich astronomischer Modelle naturgemäß eine bedeutende Rolle. Auch bei der modellhaften Umsetzung eines Sternbildes wurde versucht, zusätzliche Informationen, über die Nutzung des Tastsinns hinaus durch andere Sinneskanäle, zu transportieren. Es wurde in Betracht gezogen, Sterne durch Glühlampen darzustellen, deren unterschiedliche Temperatur etwa die Leuchtkraft eines Sternes symbolisieren kann. Aus Gründen der Sicherheit sollten an dieser Stelle keine 230 V-Glühlampen zum Einsatz kommen, da ein unmittelbarer Kontakt mit der Glühlampe im Betrieb vorgesehen war. Die Realisierung durch entsprechend kleine 12 V-Glühlampen stellte sich jedoch aus zweierlei Gründen als nicht praktikabel heraus. Zum einen ist die Temperatur an der Oberseite des Glaskolbens, bei gleichen Lämpchen und gleicher Versorgungsspannung, nur in seltenen Fällen identisch. Bereits beim Betrachten der Lampen zeigen sich die verschiedenen Abstände des Glühdrahtes vom Glaskolben. Zum anderen ist die Einschätzung der Temperatur. Die nutzbare Temperaturspanne ist zu eng gesteckt, um eine größere Anzahl von Sternen darstellen zu können. Weiterhin wirkt sich die geringe Größe der Lämpchen negativ aus, da

hier die niedrige Dichte an Wärmerezeptoren auf der Hand sowie die Adaptionseffekte auf kleinen räumlichen Skalen verstärkt zum Tragen kommen (vgl. Kapitel 4.1.4).

Auch die Repräsentation eines einzelnen Sterns durch eine sehr viel größere Kugel, wie etwa einen Globus, gelingt nicht zufriedenstellend, wenn dieser im Inneren von einer Glühlampe erwärmt wird. Durch die ungleichmäßige Abstrahlung der Energie ergibt sich hierbei keine gleichmäßige Temperaturverteilung an der Oberfläche.

Die Anzahl der darzustellenden Sterne in typischen Sternbildern behindert auch eine Umsetzung unter Nutzung des Gehörs. Um nicht durch eine Vielzahl von Tonquellen aus einem verhältnismäßig kleinen Raumwinkel verwirrt und überfordert zu werden, müsste ein derartiges Modell sehr groß ausfallen. Dabei würden bei einer entsprechend dimensionierten Installation ungünstig hohe Schalldrücke im Bereich der entferntesten Modellsterne auftreten, was es aus praktischen Erwägungen zu vermeiden gilt. Schwierigkeiten ergeben sich auch wiederum aus der Wahrnehmungsphysiologie, da die Wahrnehmung von Lautstärken durch die Tonhöhe beeinflusst wird und entsprechend angepasst werden muss (vgl. Kapitel 4.1.3).

Ein sehr viel grundlegendes Problem zeigt sich bei dem Versuch Gasansammlungen im All darzustellen. Deren Bedeutung – etwa in Form von Sternentstehungsregionen – ist kaum zu unterschätzen. Die Darstellung solcher kalter Gaswolken ist jedoch durch ein Modell, welches aus einem Festkörper besteht und somit schnell und einfach verfügbar wäre, praktisch nicht umsetzbar. Das Modell würde sich in solchen Fällen zu weit vom darzustellenden Objekt entfernen und damit gegen die Anforderungen der Einfachheit, Anschaulichkeit und Transparenz verstoßen (vgl. Kapitel 5.4).

7 Erprobung

Die Erprobung der Modelle und des Winkelmessers untergliedert sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt wird eine Überprüfung vorgenommen, um wesentliche Fehler bei der Konzeption aufzudecken bzw. auszuschließen und einen ersten Eindruck von der Wirksamkeit der Konzepte zu erlangen. Der zweite Schritt soll einen detaillierteren Einblick in die Empfindungen und Assoziationen beim Ertasten der Modelle liefern. Beide Erprobungsschritte wurden jeweils mit Einzelpersonen durchgeführt.

Um – entsprechend der Intention – den Einsatz im Unterricht vorzubereiten, ist eine andersartige und deutlich umfangreichere Form der Erprobung wünschenswert. Diese wird nachfolgend kurz skizziert:

Eine umfassende Erprobung – etwa mit einer Schulklasse – muss zunächst jeden einzelnen Teilnehmer in den Blick nehmen. Es gilt, den persönlichen Hintergrund möglichst genau zu erfassen. Schulische Bildung, Interessen und die Freizeitgestaltung beeinflussen die zu erwartenden Ergebnisse. So differieren die schulischen Bildungsangebote zur Astronomie von Bundesland zu Bundesland erheblich (vgl. Kapitel 3.2). Auch die individuelle Interessenslage hat einen bedeutenden Einfluss auf die Vorkenntnisse. Alle Faktoren müssen mit einem entsprechenden Fragebogen erfasst und in die Auswertung einbezogen werden.

Im Hinblick auf die zu vermittelnden Inhalte, ist auch die genaue Art und der zeitliche Verlauf der Sehbehinderung relevant. Diese sind, ebenso wie eventuelle Erinnerungen an visuelle Eindrücke, zu erfassen. Für das Modell „tastbare Hauptreihensterne“ beeinflusst beispielsweise eine frühe Erinnerung an das Aussehen von Sternen oder ganzer Konstellationen den Prozess und die Ergebnisse der Erkenntnisgewinnung.

Die Durchführung einer vollständigen Erprobung sollte eine exakte Protokollierung der Auseinandersetzung der Testpersonen mit den Modellen enthalten. Äußerungen sollten in die Felder Wahrnehmungsphysiologie, modellbezogene Aussagen und astronomische Inhalte untergliedert und separat ausgewertet werden. Auch das jeweilige Vorgehen der Tester, hinsichtlich der Reihenfolge und der genauen Art der Erkundung, ist zu berücksichtigen und entsprechend zu dokumentieren.

Um den Grad der Erreichung des primären Ziels – der Vermittlung astronomischer Inhalte – zu bestimmen, ist eine Kombination aus Prä- und Posttest notwendig. Abschließend müssen Aspekte der Gruppendynamik – sofern eine solche Erprobung in Kleingruppen oder einer größeren Lerngruppe stattfindet – Berücksichtigung finden.

Um all diese Kriterien erfüllen zu können, ist eine umfangreiche Vorbereitung, die etwa auch die Anpassung des Materials auf die jeweilige Lerngruppe umfasst, erforderlich. Diese Vorbereitungen, zusammen mit den nachfolgenden differenzierten Auswertungen, übersteigen mit ihrem Aufwand die Möglichkeiten der vorliegenden Arbeit. Ihre Durchführung muss damit, hinter den nun zu schildernden reduzierten Erprobungsschritten, zurückstehen.

7.1 Ersterprobung

7.1.1 Methodik und Voraussetzungen

Die Ersterprobung wird mit einer einzelnen Testperson durchgeführt. Für die Erprobung der drei Modelle werden insgesamt (einschließlich etwaiger Nachfragen und Diskussion) ca. 1,5 Stunden aufgewendet.

Der Tester ist seit frühester Kindheit erblindet, Erinnerungen an visuelle Eindrücke sind nicht vorhanden. Bezüglich der Interessen ist anzumerken, dass der Tester sich bereits früher mit astronomischen Inhalten auseinandergesetzt hat. Generell besteht eine Affinität zu komplexen technischen Hilfsmitteln.

Nach einer kurzen Einführung zum Gegenstand des Projektes werden die einzelnen Modelle nacheinander begutachtet. Auf umfangreiche Erklärungen wird dabei zunächst verzichtet, um eine Beeinflussung des Testers zu vermeiden. Eine Ausnahme stellt dabei das Modell Hauptreihensterne dar, bei welchem der Begriff der Hauptreihe zunächst mit Hilfe der entsprechenden tastbaren Grafik erläutert wird. Da die Testperson während des Ertastens der Modelle ohne Nachfragen die aufgefundenen Elemente und die jeweiligen Empfindungen beschreibt, kann auf ein klassisches Interview verzichtet werden. Die Protokollierung erfolgte dabei schriftlich. Innerhalb der folgenden offenen Gespräche werden ggf. notwendige Informationen zur Intention des besprochenen Modells sowie der astronomischen Hintergründe und Zusammenhänge gegeben.

Fragen nach der Qualität des Modells bzw. der tastbaren Darstellungen werden jeweils am Ende der Ausführungen der Testperson in halbstrukturierter Form angeschlossen. Insbesondere aufgetretene Probleme oder Störungen werden im Nachgang nochmals angesprochen, um die Ursache möglichst genau benennen zu können.

Alle Modelle sind im gleichen Raum auf jeweils einem eigenen Tisch aufgestellt. Um eine ausreichend lange Aufwärm- bzw. Abkühlzeit zu gewährleisten, wurden diese Modelle bereits ca. 45 Minuten vor Beginn der Erprobung eingeschaltet. Durch das Modell „Hauptreihensterne“ ergibt sich dadurch eine gewisse Geräuschkulisse, die der Tester jedoch erst bei der Bearbeitung des Modells anspricht. Das Modell „Sonnenflecken“ wird ohne Lüfter betrieben, das von einer ausreichenden Kühlleistung der Peltierelemente auszugehen ist. Durch

die hohe Raumtemperatur von deutlich über 20°C und die niedrige Luftfeuchtigkeit an diesem Tag, bildete sich kaum bzw. kein Kondenswasser an der Oberfläche des ehemaligen Globus.

Die Modelle wurden in der Reihenfolge räumliches Sternmodell, Sonnenflecken und Modell „Hauptreihensterne“ getestet.⁴²

7.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ersterprobung sollen im Folgenden wiedergegeben werden. Dabei wird zunächst auf Informationen eingegangen, die für alle Modelle gleichermaßen gültig sind, bevor die Modelle jeweils im Einzelnen behandelt werden.

Allgemeine Ergebnisse

Allgemein wird die Nutzung des Wärmeempfindens, im Gegensatz zu Modellen die sich rein auf die haptische Wahrnehmung beschränken, von der Testperson als sehr positiv herausgehoben. Bei keinem der Modelle wird auf eine mögliche Verletzungsgefahr hingewiesen oder ein unangenehmes Tastgefühl angeführt.

Bezüglich der tastbaren Darstellungen wird die allgemeine Anregung gegeben, anstelle von Kunststoff-Prägebend auf eine Schablone und Karton auszuweichen, da dieser sich gegenüber den hohen Temperaturen des verwendeten Tiefziehverfahrens als resistent erweisen dürfte. Damit sollte eine deutliche Verbesserung bei Qualität der Brailleschrift zu erreichen sein.⁴³

Tastbares Sternbild

Nach einer kurzen einführenden Erklärung zu dem dargestellten Sternbild und der Funktion des Modells gibt der Proband an, das Sternbild Kassiopeia bzw. das „Himmels-W“ sei ihm bereits bekannt. Die Anordnung der dargestellten fünf größten Sterne wurde daraufhin auch eindeutig als Buchstabe „W“ erkannt.

Die tastende Erkundung des Modells beginnt auf dem Seitenteil mit der Darstellung der Erscheinung am Himmel (siehe S. 103). Die Drähte lassen sich einzelnen Sternen zuordnen und werden jeweils der Reihe nach abgetastet, bis der Proband auf einen Stern stößt. Es wird

⁴²Der elektronisch-akustische Positionswinkelmesser (siehe Kapitel 6.4) war zum Zeitpunkt der Ersterprobung noch nicht fertiggestellt. Seine Erprobung fand daher gemeinsam mit der Zweiterprobung der übrigen Modelle statt.

⁴³Die Umstellung auf dieses Verfahren wurde im Nachgang der Erprobung vollzogen. Die Auswirkungen sind im Rahmen der Zweiterprobung (Kapitel 7.2) sowie der abschließenden Zusammenfassung (Kapitel 7.3) beschrieben.

der Testperson unmittelbar deutlich, dass die Sterne sich in unterschiedlicher Entfernung zur Erde befinden und dass diese deutlich unterschiedliche Größen aufweisen.

Die ergänzende tastbare Darstellung (siehe Kapitel 6.2.5) zur Vermittlung der Größenunterschiede wird als deutlich erkennbar bezeichnet. Auch der in der linken oberen Ecke angebrachte Viertelkreis wird nach kurzem Zögern als Ausschnitt eines sehr großen Sterns identifiziert. Die Beschriftung ist erkennbar, jedoch gestaltet sich das Lesen der Bezeichnungen als schwierig. Die Erhebungen der einzelnen Braille-Punkte sind, nach dem Tiefziehvorgang, – unter Verwendung eines Kunststoff-Prägebendes – nicht mehr ausreichend erhaben.

Auf Nachfrage hin wurden die folgenden weiteren Angaben gemacht:

- Die Größe des Modells wird als angemessen eingeschätzt: Es kann aus einer sitzenden Position heraus vollständig ertastet werden.
- Das Modell vermittelt durch seine Größe eine gewisse Vorstellung von den räumlichen Dimensionen des Sternbildes.
- Die Dichte der Drähte ist angemessen: Eine Gefahr der Überforderung beim Ertasten besteht nicht.

Als Verbesserungsvorschlag im Hinblick auf einen Einsatz in der Schule wurde angeregt, die Stabilität des Modells zu erhöhen.

Sonnenflecken

Die Erkundung des Modells wird zunächst ohne Bereitstellung weiterer Informationen durchgeführt, um den Tester nicht bereits auf die zu erwartende Wahrnehmung einzustimmen und das Ergebnis zu verfälschen. Die Basis des Modells wird dabei unmittelbar als ehemaliger Globus identifiziert. Nach kurzen Betasten der Oberfläche der Kugel rücken zunächst die Halterung sowie der Fuß des Modells in den Fokus. Die Anschlussbuchsen der Spannungsversorgung werden entdeckt – obwohl diese aus Sicht des Probanden nach hinten gedreht sind. Sie sollten so weniger Aufmerksamkeit erregen, da sie im Hinblick auf die dargestellten Inhalte nicht relevant sind. Die Untersuchung der Kugeloberfläche wird gründlich vorgenommen, dabei kamen nicht nur die Fingerspitzen, sondern auch die Handflächen zum Einsatz.

Zunächst ist die einzige Entdeckung auf der Oberfläche der Kugel der kleine Rand, der beim Zerlegen der Kugelhälften entstand und am Äquator des Globus verläuft. Er wird als leicht fransig beschrieben. Weitere Entdeckungen können nicht gemacht werden.

Dem Probanden wird nun der Zweck des Modells erläutert. Zusätzlich wird auf den Umstand hingewiesen, dass die Sonnenflecken durch kühlere Stellen auf der Kugeloberfläche dargestellt sind. Der Proband beginnt daraufhin wiederum mit dem Abtasten der Oberfläche. Als erste Auffälligkeit wird eine erhöhte Temperatur, die durch den Kühlkörper verursacht wird, um den Bereich der Fleckengruppe 1 herum auf der „Nordhalbkugel“ des Modells wahrgenommen (siehe Abb. 6.25, S. 121). Die beiden Einzelflecken werden erst als solche

erkannt, als helfend eingegriffen und der Zeigefinger des Probanden direkt zu den Flecken geführt wird.

An dieser Stelle zeigt sich, dass durch die längere Betriebsdauer von über einer Stunde, die Abwärme der Peltierelemente von den Kühlkörpern an die Kugeloberfläche abgegeben wurde. Die Kugel erwärmt sich dadurch im Ganzen, insbesondere im Bereich der Peltierelemente, während die Elemente selbst innerhalb des warmen Bereiches als kühlere Stellen tastbar bleiben.

Der Proband fährt mit der systematischen Erkundung des Modells fort. Auffällig und unerwartet ist, dass dabei die Handfläche als Ganzes eingesetzt und nicht ausschließlich auf die Fingerspitzen zurückgegriffen wird. Die Handfläche ist gegenüber den Fingerspitzen mit weniger Rezeptoren ausgestattet, woraus sich eine herabgesetzte Temperaturempfindlichkeit ergibt (vgl. Kapitel 4.1.4). Auch das räumliche Auflösungsvermögen wird bei der Verwendung der gesamten Handfläche reduziert. Damit lässt sich erklären, warum der Proband zwar die nächste Fleckengruppe selbstständig auffinden kann, diese jedoch zunächst nicht in die Einzelflecken aufzulösen vermag und sie als ein einzelnes Objekt ansieht (vgl. Kapitel 4).

Fleckengruppe 3 kann vom Tester zunächst nicht erkannt werden. Auch ein gezieltes Hinführen der Fingerspitzen direkt zu den Peltierelementen lässt keine Identifizierung anhand des Temperaturabfalls zu. Abhilfe kann jedoch durch Zuschalten der Ventilatoren im Inneren geschaffen werden. Die Temperaturdifferenz an der Oberfläche verstärkt sich innerhalb weniger Minuten, sodass die Flecken insgesamt deutlich leichter identifizierbar werden und auch die dritte Fleckengruppe als solche erkennbar wird.

Das dabei auftretende Betriebsgeräusch wird auf Nachfrage als nicht störend beschrieben.

Unter Verweis auf die Entstehung der Sonnenflecken durch starke Magnetfelder an der Oberfläche, wird dem Probanden der Magnet zur Verfügung gestellt, um mit der detaillierteren Analyse fortzufahren (vgl. Kapitel 6.3). Die Untersuchung der Polarität, bzw. der unterschiedlichen Polaritäten innerhalb der Fleckengruppen gelingt problemlos. Die Stärke der Magneten wird als angemessen bzw. trotz der starken Anziehungskräfte als angenehm beschrieben.

In einem abschließenden Gespräch zum Modell „Sonnenflecken“ wird die Nutzung des direkten Zusammenhangs zwischen der Temperatur der Sonnenflecken und der Temperatur auf der Modelloberfläche sowie der Verzicht auf zusätzliche Strukturierung der Oberfläche – etwa in Form eines Koordinatennetzes oder der taktilen Hervorhebung des Sonnenflecken – von der Testperson positiv betont.

Hauptreihensterne

Das Modell zu den Hauptreihensternen wird als letztes untersucht. Die Nutzung des Wärmeempfindens ist bei diesem Modell daher weniger überraschend, als bei dem Vorangegan-

genen. Dem Probanden wird zunächst die zugehörige tastbare Grafik zum HRD vorgelegt (siehe S. 93), um den Zweck des Modells anschaulich zu machen. Die Grafik wird als übersichtlich und gut nachvollziehbar beschrieben. Die Nutzung von Sand zur Darstellung der Sterne resultiert in einem Empfinden für die Häufigkeit für das Auftreten bzw. die Anzahl von Sternen an bestimmten Stellen im Diagramm, auch ohne dass dies explizit vorgegeben wurde.

Das Ertasten der Sterne erfolgt rasch und ohne Probleme. Die Temperatur der großen Kugel wird als angenehm beschrieben. Die kleinste Kugel erweckt beim Tester den Eindruck gekühlt zu sein, obwohl sie über keinerlei Mechanismen zur aktiven Kühlung verfügt. Die Metalloberflächen erscheinen dem Probanden angenehm. Er beschreibt den größten Modellstern als „große freundliche Kugel“. Es wird angeregt, die Temperatur der mittleren Kugel leicht zu steigern, um eine stärkere Abgrenzung zum kleinsten Modellstern zu erreichen.

Der Verzicht auf weitere Oberflächenstrukturierungen wird – wie bereits beim Modell „Sonnenflecken“ – positiv herausgehoben. Auch die durch die große Ausdehnung der Kugel erfahrbare Natur der Sterne als ausgedehnte Objekte wird selbstständig angesprochen. Ebenso stellt die Testperson den deutlichen Unterschied des Modells zur Fehlvorstellung von „zackigen Sternen“ heraus.

Anzumerken ist weiterhin, dass der Tester die Kugeln durch Anstoßen mit dem Fingernagel eingehend auf ihren Klang untersuchte. Der tiefe Ton der größten Kugel verstärkt, nach eigener Aussage, seinen Eindruck von der Größe des Sterns. Während sich dieser Eindruck bei der mittleren Kugel analog nachvollziehen lässt, weist die kleinste Kugel, durch den Verzicht auf eine Wasserfüllung, ein davon abweichendes Klangbild auf.

Auf das Betriebsgeräusch des Modells angesprochen, beschreibt der Proband dieses als etwas störend, was wahrscheinlich hauptsächlich auf die Tonhöhe zurückzuführen ist.

7.2 Zweiterprobung

7.2.1 Methodik

Konzept

Die Ziele des zweiten Erprobungsdurchlaufs ähneln jenen des Ersten. Auch an dieser Stelle sollen, neben den zentralen Lernzielen (s.u.), wahrnehmungsphysiologische Besonderheiten und sehbehindertendidaktische Aspekte im Vordergrund stehen. Daneben sollen die Qualität der Diagramme sowie die eigenständige Bedienbarkeit des Winkelmessers überprüft werden. Die Durchführung erfolgt daher in Form einer Einzelbefragung.

Die Vorabinformationen zu jedem Modell beschränken sich auf das notwendige Minimum. Die Testperson soll dadurch die Gelegenheit erhalten, sich unvoreingenommen mit dem dargebotenen Inhalt auseinanderzusetzen. Die vollständig eigenständig gemachten ersten Interpretationen mögen aus fachlicher Sicht unzureichend sein, erlauben jedoch wichtige Rückschlüsse auf die gemachten Erfahrungen und Eindrücke.

Die intendierte Wirkung und der fachliche Hintergrund wurden jeweils im Laufe des Gespräches eingebracht, um deren Nachvollziehbarkeit zu prüfen.

Die Gespräche wurden während der Durchführung aufgezeichnet. Da eine rein qualitative Auswertung erfolgt, wird in der Transkription auf die Angabe von Zeiten verzichtet. Kürzere (–) und längere (...) Pausen während des Sprechens sind markiert. Weitere Besonderheiten sind jeweils vor dem eigentlichen Text in Klammern angegeben. Nach- oder Zwischenfragen des Verfassers sind mit einem vorangestellten Kürzel (SK), erläuternde Hinweise mit eckigen Klammern gekennzeichnet.

Auswertungsraster

Die an dieser Stelle dargestellten Ziele entsprechen nicht exakt den Lernzielen, wie sie in den jeweiligen Kapiteln der Modelle aufgeführt sind. Die Abweichung ergibt sich zum einen aus der Tatsache, dass die Modelle hier außerhalb einer Unterrichtssequenz erprobt wurden, weshalb solche Ziele herausfallen, die eine ausgiebigere Beschäftigung der Testperson mit den theoretischen Grundlagen erfordern würden. Zum anderen sind zusätzliche Teilziele aufgenommen, die logische Schritte während der Modellerkundung und Nutzung darstellen (z.B. die Frage nach einer günstigen Anordnung der Bedienelemente des Winkelmessers) oder sich auf bestimmte zu erwartende Probleme beziehen (z.B. die Interpretation der Datenpunkte im HRD als einzelne Sterne).

Die hier aufgeführten Ziele werden am Ende des Kapitels (siehe Abschnitt 7.2.1) in tabellarischer Form zusammengefasst. Für die einzelnen Modelle bzw. das Messgerät ergeben sich für die Erprobung als wesentliche Ziele:

Hauptreihensterne:

1. Jede Kugel entspricht einem Stern,
2. die Sterne lassen sich anhand von Größe und Temperatur deutlich voneinander unterscheiden,
3. Sterne lassen sich über die Zustandsgrößen Temperatur und Größe beschreiben,
4. Temperatur und Größe des Modellsterns sind korreliert, der Zusammenhang ist eindeutig,
5. Datenpunkte im HRD stellen einzelne Sterne dar,
6. es existieren verschiedene Klassen von Sternen (von denen nur eine Klasse im Modell dargestellt wird),
7. die Modellsterne lassen sich auf der Hauptreihe an bestimmten Positionen wiederfinden.

Tastbares Sternbild:

1. Sterne scheinen uns an der Himmelskugel befestigt zu sein,
2. Sterne werden willkürlich (kulturabhängig) zu Mustern zusammengefasst,
3. der Anblick der Cassiopeia als Sternbild ist auf der Seite dargestellt,
4. die Größe der Halbkugel entspricht der scheinbaren Helligkeit, alle Sterne erscheinen (etwa) gleich hell,
5. der Abstand der Kugeln vom „W“ entspricht ihrem Abstand vom irdischen Beobachter,
6. die Sterne eines Sternbildes stehen i.d.R. in keiner physikalischen Verbindung zueinander,
7. die Größe der Kugeln entspricht deren Leuchtkraft,
8. die Leuchtkraft von Sternen kann sehr verschieden sein,
9. die Helligkeit steigt mit wachsender Entfernung an, scheinbare Helligkeit wird durch Kombination aus Verteilung im Raum und absoluter Helligkeit hervorgerufen.

Sonnenflecken:

1. Sonne hat Kugelgestalt,
2. Sonnenflecken lassen sich durch Temperaturabfall identifizieren,
3. im Modell sind sechs Sonnenflecken vorhanden,
4. der Temperaturabfall äußert sich für einen Beobachter in einer unterschiedlichen Farbe der Sonnenoberfläche,

5. Sonnenflecken treten in Gruppen auf,
6. die Sonnenflecken sind nur modellhaft als kalt dargestellt, d.h. die Temperatur ist als relative Temperatur zu verstehen,
7. Sonnenflecken verfügen im Modell und auf der Sonne über ein Magnetfeld,
8. die Sonnenflecken innerhalb einer Gruppe sind gegensätzlich polarisiert,
9. optional: der p-Fleck liegt näher am Äquator,
10. optional: gegensätzliche Magnetisierung auf den Hemisphären,
11. optional: Sonnenflecken sind ein veränderliches Phänomen.

Winkelmesser:

1. Sonne beschreibt einen Bogen am Himmel, dessen Lage und Länge sich im Jahresverlauf verändert,
2. Position der Sonne lässt sich u.a. im horizontalen Koordinatensystem beschreiben,
3. Bedienelemente auffindbar, Rolle der Elemente klar,
4. Einnorden des Instruments durchführbar und Einsicht in Notwendigkeit,
5. Bedienung eigenständig durchführbar,
6. Bedeutung der Tonhöhe als Repräsentation der gemessenen Helligkeit,
7. Einsicht in Notwendigkeit der Messung der absoluten Helligkeit,
8. erfolgreiches Ablesen der Messwerte und Bestimmung der Position der Sonne,
9. Verständnis der Darstellung der Tagbögen für verschiedene Jahreszeiten.

Um über einen subjektiven Eindruck hinaus eine Vorstellung von der Qualität der Modelle zu entwickeln, werden die oben aufgeführten Ziele in ein Raster eingetragen. Darin wird für jedes Modell erfasst, ob das jeweilige Ziel erreicht wurde.

7.2.2 Voraussetzungen

Die Voraussetzungen und Bedingungen der Zweiterprobung sind mit denen des ersten Erprobungslaufs vergleichbar. Die drei Modelle sind gemeinsam in einem Raum aufgebaut. Der Winkelmesser wird, aufgrund der Beleuchtungssituation, in einem separaten Raum getestet. Die Erprobung nimmt etwa 2,5 Stunden in Anspruch.

Die Testerin ist – im Gegensatz zum Probanden der Ersterprobung – nicht vollständig erblindet. Das Restsehvermögen, welches auf einem Auge verblieben ist, reicht aus, um z.B.

die helle Lampe beim Test des Winkelmessers erkennen zu können.⁴⁴ Schwache Lichtquellen – wie etwa Sterne – können nicht wahrgenommen werden und sind aus eigener Erfahrung nicht bekannt.

Astronomisches Vorwissen ist bei der Probandin kaum vorhanden. Die Erprobung offenbart jedoch, dass sie im Umgang mit Tastmodellen und tastbaren Darstellungen aus dem Bereich der Geografie geübt ist.⁴⁵

7.2.3 Ergebnisse

Tastbares Sternbild

Die Erprobung des tastbaren Sternbildes beginnt mit einer kurzen Einführung zur Orientierung am Sternenhimmel mittels gedachter Muster. Die Zufälligkeit der gesehenen Strukturen wird durch einen Verweis auf die unterschiedlichen Sternbilder in verschiedenen Kulturkreisen nochmals hervorgehoben. Weitere Informationen werden zunächst nicht gegeben um ein möglichst authentisches Bild des ersten Eindrucks zu erhalten.

Das Modell wird vor der Testperson auf dem Tisch platziert. Die Testerin beginnt daraufhin mit dem eigenständigen Ertasten des Modells. Es zeigt sich, dass die Größe des Modells gut an den Handtastraum für beidhändiges Tasten angepasst ist (siehe dazu Kapitel 5.2). Auf das Ertasten der Holzverstrebungen folgen die beiden äußeren Platten und die metallenen Stäbe mit den Holzkugeln (zum Aufbau des Modells siehe S. 103).

Ohne weitere Hinweise werden die Außenseiten der Platten nicht weiter abgetastet, sie kommen aus Sicht der Testperson scheinbar nicht als Informationsträger in Betracht. Die Probandin wird daher gebeten, auch den Außenbereich abzusuchen. Aus Sicht der Testperson befindet sich die scheinbare Ansicht an der Himmelskugel auf der rechten Platte.

Es folgt eine kurze Hinweis zum dargestellten Sternbild und seiner umgangssprachlichen Bezeichnung als „Himmels-W“. Die dort aufgefundenen Holzhalbkugeln werden zunächst nicht als Buchstabe erkannt. Auf Nachfrage bezüglich der Nachvollziehbarkeit dieser Bezeichnung wird angegeben, dass dies erfüllbar sei.⁴⁶

ES: Weil das vielleicht der Buchstabe, vielleicht, aber das habe ich jetzt im Moment nicht so, aber man könnte das . . . stimmt . . . jetzt kriege ich es . . . genau, doch das könnte man jetzt ein bisschen rausfühlen. Das muss man erstmal wissen . . . ich hatte jetzt erst so gedacht, das ist so eine Anordnung von der Astronomie, dass die Sterne oder die Himmelskörper so zusammengesetzt sind.

⁴⁴Siehe S. 177 ff. für weitere Informationen zum Testaufbau.

⁴⁵Es werden geografische Darstellungen als Vergleich herangezogen (siehe S. 166 und S. 173), auch werden die Himmelsrichtungen zur Beschreibung der Lage von Objekten auf Grafiken benutzt (siehe S. 176).

⁴⁶Eine Möglichkeit zur Optimierung wird in der Zusammenfassung vorgeschlagen (siehe S. 184).

Die Darstellung der scheinbaren Anordnung wird hier zunächst als eine Abbildung des inneren Aufbaus der Sterne bzw. bestimmter Himmelskörper im Allgemeinen aufgefasst. Es wird daher nochmals auf die Erscheinung der Sterne an der Himmelskugel hingewiesen.

Es folgt eine Überleitung zur inneren Anordnung mit den auf Metallstäben befestigten Kugeln. Es wird geschildert, dass man sich nun in die Perspektive eines Beobachters fernab der Erde begibt. Auf das Wiederauffinden der Kugeln folgt die spontane Nachfrage der Testperson:

ES: Diese Kugeln sollen auch Sterne sein?

Die unterschiedliche Größe der Holzkugeln bzw. Modellsterne wird selbstständig erkannt:

ES: Sie sind ein bisschen unterschiedlich, wohl? Der ist ein bisschen dick und der . . . dünner.

Die Testperson findet problemlos die Modellsterne im mittleren Bereich. Auf den Hinweis hin, dass insgesamt fünf Sterne vorhanden sind, wird jeder Stab einzeln abgetastet:

ES: Jetzt habe ich drei Sterne erstmal gefunden. . . Vier. . . Fünf. Ja! Die sind jetzt so auseinander. Da könnte man jetzt nicht so feststellen, dass es jetzt ein „W“ ist. . .

Aus der Aussage ist nicht klar ersichtlich, inwiefern die Testerin an dieser Stelle erwartet auch hier den Buchstaben W oder eine andere besondere Struktur zu erkennen. Um Konfusion auszuschließen, wird nochmals auf die besondere Erscheinung als Buchstabenform aus Sicht der Erde hingewiesen.

ES: Wenn man dann der Sache näherkommt, sich mehr mit dem Himmel befasst, dann oder man guckt oder sie verstreuen sich vielleicht, dass sie dann auch auseinander gehen. . .

Anhand dieser Aussage lässt sich nicht zweifelsfrei erkennen, ob hier von einer Bewegung der Sterne im Raum ausgegangen wird, die zu der vorgefundenen Anordnung führt. Auf Nachfrage hin erklärt die Testerin, dass der Perspektivenwechsel klar ist und auch mit dieser Aussage gemeint war. Mit „auseinander gehen“ ist damit nicht eine tatsächliche Bewegung, sondern nur eine relative Verschiebung zueinander gemeint, die allein durch den Wechsel der Beobachterperspektive hervorgerufen wird.

Da von der Probandin bislang kein Zusammenhang zwischen der Größe der Modellsterne und ihrer Position innerhalb des Modells angesprochen wurde, wird nach einem solchen direkt gefragt.

SK⁴⁷: Wo haben Sie den größten Stern gefunden?

⁴⁷Nachfrage des Verfassers, im Folgenden stets mit SK abgekürzt.

ES: Wenn mich nicht täuscht das dürfte der hier ... rechts ... den habe ich rechts gefunden – ja ne ziemlich links betrachtet – rechts habe ich ja den kleinen Stern betrachtet und wenn man auf der Mitte der Ebene geht, kann man dann auch langsam fühlen – stimmt nicht auf der einen Ebene ist der kleine Stern und auf der zweiten Ebene ist der große Stern, dann muss man sich nach links mehr orientieren – dürfte ungefähr so 30 cm auseinander sein.

SK: Und den größten...

ES: Den müsste ich noch suchen, wenn es da noch einen gibt.

Der ist – wenn mich nicht alles irrt – ganz links ... ja auch auf der zweiten Ebene dann – ne auf der dritten Ebene ist der ...

Die Stangen innerhalb des Modells werden von der Testperson in Ebenen eingeteilt. Eine solche Unterteilung war nicht intendiert, ist jedoch naheliegend, wenn es darum geht die Position eines Modellsterns verbal zu beschreiben.

Es zeigt sich an dieser Stelle, dass es auch bei einer Anordnung, die aus nur fünf Sternen besteht, durchaus mit Schwierigkeiten verbunden sein kann, einen vollständigen Überblick zu erlangen und die Orientierung innerhalb des Modells nicht zu verlieren.

Sind alle Sterne gefunden, so wird auch an dieser Stelle wiederum versucht eine Struktur auszumachen:

ES: Wenn man das genauer jetzt betrachtet könnte das ja auch wieder irgendwie ... das auseinandner könnte auch wieder ne Bezeichnung von irgendwie einem Buchstaben werden...

Bislang wurde noch kein direkter Zusammenhang zwischen der Entfernung der Sterne von der Erde und ihrer Größe ermittelt. Es wird daher direkt nach einer Größenabnahme der Sterne von links nach rechts gefragt:

ES: Das müsste ich erstmal rausfinden. Ich habe jetzt ja erstmal nach und nach alles untersucht. Also weil sie immer mehr nach [unverständlich] kommen, jetzt habe noch einen größeren Stern, die beiden Sterne ganz links, der nach hinten geht Richtung rechts, ich mein der wäre ein klein bisschen kleiner, könnte man aber noch zu nem großen Stern bezeichnen. Der ist auch weit ab von rechts.

Und dann habe ich, beim vorsichtigen Ertasten, noch einen kleinen Stern gefunden. Der ziemlich auch links rüber geht. Also das der sich mehr sich mit rechts ... ja und der ... und das würde ich so mittelgroß bezeichnen.

Der Zusammenhang ist demnach nicht direkt aus dem Modell ersichtlich, da eine Korrelation von Entfernung und Größe hier nicht erwartet wird. Auf einen solchen Zusammenhang direkt angesprochen ist die Testerin jedoch in der Lage diese Verbindung nachzuvollziehen.

Die Testerin stellt an dieser Stelle eine spontane Zwischenfrage zum Verständnis:

ES: Dürfte das hier unten der Himmel sein? [deutet auf den Tisch zwischen den unteren Verbindungen]

Also wenn man jetzt, wir Menschen, zum Himmel gucken, die Luft [deutet auf den Zwischenraum zwischen den Metallstäben] und das hier geht dann rüber zum Universum und hier oben drüber die andere Himmelschicht [zeigt auf den Raum oberhalb des Modells]?

Die Testerin zeigt dabei zunächst auf den Tisch, danach auf den Zwischenraum zwischen Tisch und den Metallstäben und im dritten Schritt auf den Bereich oberhalb der Stäbe. Sie stellt damit die Frage nach der Perspektive des Beobachters, der von der Erde aus gesehen die Struktur betrachtet. Die Ausgangsposition und die imaginäre Möglichkeiten der freien Bewegung im Raum werden daraufhin nochmals erläutert.

Es folgt eine weitere technische Frage zu einer eventuellen zusätzlichen Bedeutung der Stäbe:

ES: Hier diese Stäbe haben aber keine Bedeutung? Das hat jetzt nur, also die Sterne hängen ja jetzt in der Luft, aber das wo die dran sind, das hat jetzt keine Bedeutung. Ist jetzt nur eine technische Frage.

Auf den Zusammenhang zwischen Sterngröße und Stabdurchmesser wird hingewiesen. Der Umstand, dass der größte der Stern auch auf dem Stab mit dem größten Durchmesser sitzt, wurde bislang offenbar nicht erkannt.

Die Testerin hält die Darstellung für einen schulischen Einsatz für geeignet. Sie regt an, das Modell in eine bzw. zwei Karten umzusetzen, auf denen der scheinbare Anblick in Form des Buchstaben „W“ der tatsächlichen Anordnung im Raum gegenübergestellt wird.

Zum Abschluss wird die Frage nach eventuellen Problemen mit den Metallstäben, insbesondere deren Abstand voneinander betreffend, gestellt. Die Testerin antwortet darauf verallgemeinernd für das Modell als Ganzes:

ES: Also es ist nicht unangenehm. Das Material ist warm, fühlt sich schon warm ... Holz ist sowieso ein angenehmes Material ...

Es wird von der Probandin angeregt die Festigkeit der Stäbe (d.h. deren Spannung) zu erhöhen. Dies soll das Ertasten des Modells begünstigen. Es wird weiterhin vorgeschlagen Kurznotizen in Brailleschrift auf dem bislang unbeschrifteten Modell anzubringen.

Tastbare Grafik

Auf die Erkundung des Modells folgt die Betrachtung der tastbaren Grafik, auf der das Prinzip der Entfernungsbestimmung durch die Parallaxe dargestellt ist.

Nach kurzen Ertasten wird nach der Qualität der Brailleschrift gefragt. Diese wurde – im Gegensatz zur Ersterprobung – für das Positiv der tastbaren Darstellung als Pappkärtchen ausgeführt.

ES: Also die Blindenschriftqualität ist schlecht

Die Aussagen überrascht an dieser Stelle, da durch die Verwendung von Pappe anstelle von Folie eine objektiv besser Qualität erreicht wurde. Hier zeigt sich das stark subjektive Empfinden für die Qualität der Punktschrift. Die Beurteilung macht eine weitere Verbesserung des Herstellungsverfahrens notwendig und legt den Umstieg auf eine Tiefziehmaschine aus dem professionellen Bereich nahe sowie eine Prägung auf Metall anstelle von Pappe (siehe unten).

Für die Brailleschrift ergibt sich, dass die Qualität bei allen folgenden tastbaren Darstellungen gleich beurteilt wird. Die Schrift ist damit durchgängig nicht oder nur schlecht lesbar. Auf Hinweise an den folgenden Stellen wird daher verzichtet. Das Problem wird in der Zusammenfassung nochmals aufgegriffen (siehe S. 186).

Um die Qualität der Brailleschrift direkt auf dem Positiv zu bewerten, wird dieses der Testerin vorlegt. Die Beschriftung der Ellipse vor dem Sternhintergrund lautet „Projektion“. Sie wird gelesen als:

Sch r [o oder y] nem 0

Die in Pappe geprägt Brailleschrift wird als abgenutzt beschrieben. Die Beschriftung im unteren rechten Bereich („Erde“) ist dagegen lesbar.

Die Testerin gibt eine Hinweis zu Erklärung der Darstellung. So könnte z.B. der Auftrag gegeben werden die Erde zu suchen um darauf aufbauend eine schrittweise weitere Erklärung zu geben und so der sequentiellen Erfassung der Grafik durch eine blinde Person entgegenzukommen.

Es wird die Frage nach einer abschließenden Beurteilung der vorliegenden tastbaren Darstellung gestellt:

ES: Also ich finde es schon interessant, also wie sie das so aufgezogen haben, also so wie ich das auch als Laie, bin kein Astronom, aber ich denke schon, wenn ich jetzt mal an die Erdkundebilder zurückdenke ... Relief und so, denke ich schon, dass das ... schon ... dem blinden Menschen – dem sehbehinderten Menschen schon eindeutig klar gemacht werden kann, so dass man dann schon ein Bild von den Himmelskörpern finden kann.

Solche Modelle würde ich auf jeden Fall für den Unterricht nehmen und wenn sie da auch erklären – plastisch – und dann würde ich auch Reliefkarten erstellen, getrennt mit dem „W“ extra und dann die Himmelskörper, die sie jetzt auch an dem Gestänge gemacht haben. . .

Hauptreihensterne

Die Erkundung des Modells Hauptreihensterne beginnt mit einem kurzen Hinweis auf den Zusammenhang zwischen der Größe und der Temperatur von Sternen. Weiterhin wird erwähnt, dass in diesem Modell drei Sterne präsentiert werden. Die Testperson beginnt daraufhin mit dem eigenständigen Ertasten des Modells.

ES: Ah, da ist ja schon ein Stern!

SK: Genau, das sollen diese drei Sterne sein . . .

ES: Ahja, dieses W, oder?

Es zeigt sich, dass die Modelle als zusammengehörig empfunden werden. Es wird daher versucht die bereits bekannte Struktur im neuen Modell wiederzufinden.

Die Testerin berührt die Sterne von links nach rechts in aufsteigender Reihenfolge ihrer Größe. Beim ersten Kontakt mit dem größten Modellstern wird geäußert:

ES (spontan): Hier der ist an, der ist warm!

Es folgt eine Beschreibung des Ersteindrucks der vorgefundenen Struktur:

ES: Also einfach so drei Sterne die so nebeneinander sind . . . Ein bisschen ungeordnet – nicht geradlinig, aber das muss ja nicht sein. So ein bisschen versetzte auch, wohl. Einer der ordnungsliebend ist würde sagen: müssen ein bisschen gerader sein. Aber das ist ja – die Himmelskörper bewegen sich ja frei und das ist ja ok so und ich habe da jetzt auch keine Empfindung . . .

Es wird nun versucht die vorgefundene Anordnung als eine sinnvolle Struktur zu interpretieren. Da weder Schwarzschrift- noch Braillebuchstaben erkannt werden, wird als Erklärung nun eine zufällige Anordnung der Sterne durch ihre freie Bewegung herangezogen. Rein technische Überlegungen für die Anordnung auf einer Höhe werden hingegen nicht selbstständig als möglicher Grund angesehen.

ES: Was das jetzt so als Buchstabe kann man das jetzt nicht herausfinden, auch als Blindenschriftbuchstaben nicht . . . so eine Ordnung einfach – so eine Himmelskörperordnung vielleicht wie man das nenne möchte oder die haben sich so zusammen so bewegt, vielleicht metaphysisch . . .

Es wird daher der Hinweis auf die völlig beliebige Anordnung der Sterne im Modell gegeben:

ES: Genau, beliebig, genau. Genau . . . So hab ich das jetzt auch aufgefasst, ohne das man da irgendwas reininterpretieren kann oder . . .

Der Kern der Aussage oben ist damit Bedeutungslosigkeit der vorgefundenen Anordnung hinsichtlich der Kernaussage des Modells.

Die Aufmerksamkeit wird zurück auf die Modellsterne und ihre Eigenschaft gelenkt:

SK: Fällt Ihnen etwas auf an diesen Sternen?

ES: Ja, also sind auch wieder unterschiedlich. Ein ganz großer, ein mittlerer und ein kleiner Stern. Der eine andere ist auch dick so und die anderen sind eigentlich gleichbleibend und der ganz links kleiner.

Die Beschreibung bleibt an dieser Stelle bei der äußeren Erscheinung. Die Aussagen „gleichbleibend“ bzw. „kleiner“ beziehen sich dabei nicht auf den Durchmesser, sondern auf die Tatsache, dass die Kugeln unterschiedlich weit aus der Frontplatte herausragen. Die unterschiedliche Größe der Kugeln zu erfassen ist demnach mit keinerlei Problemen behaftet.

Da die unterschiedliche Temperatur bis auf eine kurze Äußerung zu Beginn bisher unbeachtet blieb, wird jetzt direkt danach gefragt:

SK: Sie sagten der Eine wäre an?

ES: Der rechts ist an, der große Dicke ist an.

SK: Also der strahlt Wärme aus?

ES: Ja, der strahlt Wärme aus und ich könnte mir auch vorstellen Licht. Also das er so eine Funktion hätte wie eine Sonne, dass er ein warmer Stern ist, der viel Wärme ausstrahlt. Also nicht nur Licht sondern aus Wärme. Und die anderen sind kalt. Also die – also die haben keine Wärme.

SK: Also die sind für sie gleich warm?

ES: Ja, würde ich sagen. Also gleich warm. Die haben – also kalt würde ich jetzt auch nicht sagen, aber – einfach – es gibt ja Temperaturmessung, ich würde jetzt sagen auch nicht unter Null, ich würde vielleicht sagen, vielleicht 10, also eine gleichbleibende Temperatur.

Die erwünschte unterschiedliche Temperatur zwischen dem kleinen und mittleren Stern wird offenbar nicht erkannt. Dazu beitragen könnte zum einen eine wahrnehmungspysiologische Erscheinung. So wird von der Testerin die kleinste Kugel mit der linken Hand umfasst während mit der rechten Hand die mittlere und große Kugel ertastet wird. Es findet damit kein direkter Vergleich mit der gleichen Hand zwischen den Kugeln statt. Auch erwärmt sich die kleinste Kugel bei längerem Kontakt mit der Haut relativ schnell. Ferner ist nach längerem Betrieb des Modells eine leichte Erwärmung der kleinsten Kugel festzustellen, da diese sich in der Nähe eines der nach oben offenen Wasserbehälter befindet.

Die Testerin vermutet, dass es sich bei dem größten und wärmsten Stern um die Sonne bzw. einen sonnenähnlichen Stern handeln könnten. Es wird daher erklärt, dass es sich vielmehr

bei dem linken Modellstern um die Sonne handeln könnte. Die Testerin reagiert auf diese Information mit Überraschung.

Es folgt die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Größe und Temperatur von Sternen sowie die Information, dass sehr große Sterne Oberflächentemperaturen von mehreren 10 000°C erreichen können.

Als Reaktion ergibt sich eine Rückfrage der Testerin:

ES: Also, wenn ich nochmal zurückfragen darf: Es heißt nicht, dass wenn man immer geglaubt hat die Sonne wäre extrem heiß, das stimmt dann nicht so ganz? Weil sie ja hier die Sonne ja haben und dann gibts dann größere Sterne noch, die noch mehr Wärme und – vielleicht mehr Wärme dann ausstrahlen. Aber die Sonne die leuchtet ja.

Es folgt eine kurze Erklärung, dass auch die Sonne Wärme abstrahlt, jedoch Sterne existieren die dies in deutlich größerem Maße tun.

Um die Möglichkeiten einer eventuellen Temperaturerhöhung⁴⁸ der größten Kugel auszuloten, wird nach den Empfindungen beim Ertasten gefragt.

SK: Wie erscheint Ihnen denn die Temperatur der Kugel rechts. Ist es angenehm, ist das unangenehm?

ES: Ist zwar angenehm, wenn man das weiß – aber vielleicht ein bisschen zu heiß, würde ich sagen, ahja könnte vielleicht gleich was durchschmoren. Das habe ich schon so rausgefunden . . . Der muss schon eine gewaltige Kraft haben der Stern.

SK: Wenn ich Ihnen jetzt sage, es besteht ein Temperaturunterschied zwischen linkem und mittlerem . . .

ES: Kann ich nicht feststellen.

Die geäußerten Empfindungen passen gut zur intendierten Wirkung des Modells. Sie machen jedoch gleichzeitig eine spürbare Temperaturerhöhung unmöglich um nicht eine unangenehme Empfindung zu provozieren oder gar Angst vor dem Modell auszulösen.

Es folgt eine kurze Ausführung zur Funktionsweise des Modells mit dem Hinweis, dass die linke (kleinste) Kugel ungekühlt ist. Die Temperaturen der beiden anderen Kugeln betragen während der Durchführung 33°C und 42°C.

⁴⁸Eine solche Erhöhung der Temperatur würde einen größeren Spielraum für die Temperatur der mittleren Kugel ermöglichen und zu einer leichteren Unterscheidbarkeit führen. Die Frage wurde nach dem Auftreten der weiter oben beschriebenen Problemen spontan gestellt.

ES: Ja die ist ungekühlt – ja hier die hier hat Temperatur [zeigt auf die mittlere Kugel], also das merkt man, aber das merke ich, die ist, wenn man anpackt die ist kühl

SK: Aber beim ersten Kontakt war es schon schwierig das jetzt rauszukriegen?

ES: Genau.

Es lässt sich nicht bestimmen, inwiefern die Information zur fehlenden Kühlung Einfluss auf die Empfindung der Testerin hatte. Da die Kugel während des vorangegangenen Gesprächs nicht berührt wurde, käme eine tatsächliche Abkühlung mit einer anschließend besseren Unterscheidbarkeit der Temperaturen in Betracht.

Bereits oben wird die Empfindung eines baldigen „durchschmorens“ der größten Kugel beschrieben. Es wird dennoch nochmals direkt nach einer möglichen Erhöhung der Temperatur gefragt:

SK: Wäre es ein Problem, wenn ich die große Kugel noch wärmer mache, so dass ich die mittlere auch ein weiter erwärmen kann und so den Temperaturunterschied ein bisschen besser darstellen kann?

ES: Können Sie gerne machen, ist kein Problem. Nur das war ja eben halt Empfindungen gewesen.

SK: Oder würden sie sagen, die rechte ist schon so grenzwertig gewesen, dass ich das nicht machen sollte?

ES: Die rechte würde ich schon sagen ist ein bisschen grenzwertig.

SK: Besser nicht hochgehen?

ES: Besser nicht.

Eine Steigerung der Temperatur über 42°C kommt mit dieser Aussage auf keinen Fall in Frage.

Tastbare Grafik zum HRD

Bei der tastbaren Grafik zum HRD fällt gleich zu Beginn die Beschränkung des Tastbereichs auf die Diagrammfläche auf. Der äußere Bereich mit der umfangreichen Beschriftung wird in Erwartung der niedrigen Qualität (siehe S. 165) weitgehend ignoriert.

Der Diagrammbereich wird als deutlich erkennbar beschrieben. Getastet wird bei der folgenden Beschreibung ausgehend vom oberen linken Bereich des Diagramms.

ES: Also das es hier Unterscheide gibt das fühlt man schon, das hier so rau das es irgendwie ne Bedeutung haben sollte ... vielleicht so ein kleiner Punkt, vielleicht eine Andeutung – also den kann man auch nur minimal fühlen – das könnt vielleicht ein Stern sein den man vielleicht so eben sieht, also sind jetzt zwei die ich gefunden habe.

Bei den Erhebungen, die hier als kaum sichtbare Sterne beschrieben werden, handelt es sich um minimale Ausbuchtungen die bei der Produktion entstanden und unerwünscht sind. Bei dem als rau beschriebenen Bereich handelt es sich um die Hauptreihe.

Nach der ersten Erkundung erfolgt eine knappe Erklärung zum Diagramm und der Hauptreihe. Es wird eine beispielhafte Zuordnung der Kugeln zum Diagramm vorgenommen. Die einzelnen Bereiche des Diagramms wie die Hauptreihe und die Insel der weißen Zwerge werden in ihrer Bedeutung erklärt.

Die Testerin macht die Anregung die Darstellung zu erneuern. Sie wird als anschaulich für den Schulbereich beschrieben. Eine Optimierung wäre hinsichtlich eines größeren Formats möglich. Denkbar wäre die Größe einer Tafel für einen plastischen Eindruck. Alternativ wird eine Vergrößerung auf etwa das Doppelte angeregt (im Bereich von 40 cm · 40 cm).

Nach dem Gesamteindruck der Grafik gefragt äußert die Testerin:

ES: Sehr gutes plastisches Bild, da kann man nichts beanstanden. Das man dann wirklich die Unterschiede beim Unterricht feststellt, das was sie eben auch erklärt haben, finde ich das ganz gut so.

Weiterhin geht die Testperson auf die Möglichkeit der Übertragung des Modells in eine Karte ein. Hierbei könne das Format kleiner ausfallen. Ein Anbringen von kurzen Beschriftungen direkt auf dem Modell wird ebenfalls anregt.

Tastbare Grafik zum Größenvergleich von Sternen

Der Viertelkreis in der oberen linken Ecke der Darstellung (siehe Abb. 6.17, S.108) stellt einen besonders großen Stern dar. Mit dem Verzicht auf die vollständige Darstellung sollte zum einen Platz gespart werden, zum anderen sollte diese Maßnahme für ein Gefühl der immensen Größe des Sterns führen.⁴⁹

Die Testerin beschreibt ihre Eindrücke dagegen wie folgt:

ES: Das ist so schräg ... die umkreisen ja auch die Sonne, das es eben halt, die bewegen sich ja auch. Das der eben der große Stern, sich ein bisschen mehr im Vordergrund der Sonne sich bewegt hat und der kleine Stern ist wieder nach hinten gezogen...

⁴⁹Diese tastbare Abbildung gehört als Begleitmaterial zum Modell „Tastbares Sternbild“. Der Test an dieser Stelle bot sich aufgrund des Gesprächsverlaufs an.

Es wird ein auf Bewegungen zurückzuführendes Phänomen vermutet. Auf Nachfrage, ob dieser teilweise dargestellte Stern in Form eines Viertelkreises zu Erkennen ist, wird angegeben:

ES: Also man fühlt es so . . . wie ein Oval oder so irgendwas . . . oder er ist sichtbar, das er eben halb zu sehen ist . . . den Mond sieht man ja manchmal auch nicht immer so . . .

Es wird hier auf eine mögliche Phasengestalt verwiesen. Ohne weitere Erklärungen ist auch die Darstellung als Viertelkreis in einer der Ecken nicht eindeutig als Ausschnitt zu erkennen. Eine entsprechende Information ist unverzichtbar.

Die Probandin erklärt dazu:

ES: Wenn eine Erklärung dabei ist, Sie würden das ja auch mit Text machen, dann ist das nicht dramatisch.

Zur Anpassung der Darstellung wird nochmals die Art der Zeichnung angesprochen:

SK: Als Viertelkreis würde man ihn spontan nicht zu erkennen?

ES: Nein, würde man spontan nicht so, aber das eben halt Sterne sind... wenn sie das als Erklärung als Text haben, dann könnte man sich ein Bild erstellen im Kopf... Ich habe jetzt den Text gelesen und das ist eben der große Stern, den kann man jetzt nicht so, der ist eben halt jetzt nur so am Rande mit erwähnt worden. Das könnte man schon so auch verstehen.

Im Rahmen der Ersterprobung wurde das Betriebsgeräusch des Modells bemängelt (siehe S. 158). Es wird daher gezielt nach einer möglichen diesbezüglichen Empfindung gefragt:

SK: Das Gerät brummt ja jetzt ein bisschen. Stört sie das?

ES: Nein.

Es folgt eine kurze Erklärung zum Aufbau des Modells um den Sinn der Frage zu erläutern.

ES (spontan): Die fühlen sich sonst schön an die Kugeln. Warm auch.

Sonnenflecken

Um einen möglichst unverfälschten Eindruck zu erhalten, wird auch bei diesem Modell die Einführung sehr knapp gehalten. Sie beschränkt sich im Wesentlichen auf die Information, dass es sich bei dem Objekt auf dem Tisch um ein Modell der Sonne handelt.

ES: Im ersten Moment befindet [?] die sich wie eine Weltkugel. Und da sind auch Striche festzustellen [deutet auf den Bereich des Äquators] ähnlich wie bei einer Weltkugel, in der Mitte ein Strich, die Teilung. . .

Die Testerin versucht das Modell zu drehen. Auf die Einschränkung der Drehbarkeit aufgrund der installierten Technik wird hingewiesen.

Die Probandin beschreibt weiter ihre Eindrücke:

ES: Das Material fühlt sich warm an, lässt sich schön antasten und wie gesagt, wie eine Weltkugel, in der Mitte auch der Strich wo die Weltkugel sich auch teilt.

Nach meinen Eindrücken könnte das vielleicht auch ein Stern sein, der... auch irgendwie identisch ist mit der Weltkugel. Und da ist gar nichts hügeliges drauf, ganz flach nur.

Nach einiger Zeit des intensiven Tastens werden keine weiteren neuen Eindrücke gefunden. Die Probandin wird daraufhin mit der Hand in den Bereich der Fleckengruppe 1 (zur Nummerierung der Fleckengruppen siehe S. 121) geführt.

SK: Fällt ihnen da irgendwas auf, in dem Bereich?

ES: Ne, da fällt mir nichts auf, ist glatt irgendwie.

Um die Kühlungseffekt zu vergrößern werden nun die Lüfter zugeschaltet. Beim weiteren Ertasten findet die Probandin eine kleine Unebenheit im Bereich des „Sonnennordpols“, bei der es sich um einen Produktionsrückstand handelt.

ES: Ist eigentlich gleichbleibend.

Der Zeigefinger der Testerin wird jetzt direkt zu einem der Flecken der Fleckengruppe 1 geführt.

SK: Fällt ihnen da was auf, jetzt am rechten Zeigefinger?

ES: Ne, da fällt mir auch nichts auf.

Nachdem auch dieser Versuch nicht den gewünschten Eindruck hervorruft, wird die beabsichtigte Erzeugung einer kühlen Stelle enthüllt. Gleichzeitig wird die Spannung für Peltierelemente und Lüfter erhöht.

Die Testerin tastet weiterhin im Bereich der Fleckengruppe 1:

ES: Ja, jetzt merkt man so ein klein bisschen kühl.

SK: In dem Bereich?

ES: Auch. Minimal fühlt man jetzt, dass der Stern kühl wird langsam.

SK: Im Ganzen oder ist das eine bestimmte Stelle?

ES: Vorhin war es eine bestimmte Stelle gewesen. Ja, jetzt fühle ich es hier oben. Ziemlich oben, da habe ich auf einmal gemerkt, dass da eine Kühlung

da war, an bestimmten Stellen. Jetzt fühle ich es noch deutlicher. Also der ... also das merkt man oben ... das könnte vielleicht sein, wenn der Stern sich von der Sonne oder von den heißen Sternen sich entfernt, dass er dann eine Abkühlung dann hat, könnte ich mir vorstellen.

Mit der erhöhten Kühlleistung werden die Flecken wie gewünscht sichtbar. Eine Entstehung von Kondenswasser an der Oberfläche ist dabei nicht festzustellen.

Die Testperson verweist dabei direkt auf eine mögliche Darstellung einer Entwicklung. Sie hält eine Abkühlung des Sterns im Laufe seiner Existenz für möglich.

An dieser Stelle erfolgt eine Erklärung des dargestellten Phänomens der Sonnenflecken. Die Probandin gibt an, dass ihr dieses Phänomen unbekannt ist. Ein Vergleich der unterschiedlichen Farben an Stellen unterschiedlicher Temperatur, über rot- und weißglühendes Eisen herleitet, wird als verständlich angegeben.

Die Testperson wird gebeten, mit der Untersuchung der südlichen Hemisphäre fortzufahren.

ES: Links habe ich, glaube ich, eine Kühlung festgestellt.

Gemeint ist hier die Region der Fleckengruppe 2. Beim Auffinden der Fleckengruppe 3 werden Hinweis zu deren Lage gegeben. Die Gruppe kann jedoch zunächst nicht als kühle Stelle erkannt werden.

Zur Gruppe 2 wird weiter geäußert:

ES: Ja, da habe ich gerade eine Abkühlung gefunden.

Ja, jetzt fühle ich wieder eine, genau mit der Hand bin drauf gekommen, die ist ganz deutlich – der Sonnenfleck.

SK: Ist das für sie ein großer Bereich, der da kühl ist? Kann man das irgendwie noch weiter beschreiben?

ES: Also, es war ein kleiner Bereich war das gewesen, ich weiß nicht in wieweit das für den Unterricht ... also man hatte den Flecken schon gefühlt. Es war so ein kleiner Punkt. ... Ich weiß jetzt nicht wie sie das verwirklichen wollen, wenn das realitätsbezogen ist, dass man nur minimal so einen Flecken sehen soll, ist es in Ordnung, aber wenn sie sagen, gut der Fleck ist eindeutig sichtbar zu sehen, dann würde ich sagen, dann war es zu minimal. ...

SK: Es sollte jetzt im Modell so sein, dass sie paarweise auftreten. Das heißt jetzt im Bereich der linken Hand müsste man eigentlich zwei Stellen finden. ...

ES (unterbricht): Eine habe ich gefunden ... hier unten ... und hier oben, ein bisschen mehr nach oben rechts ... aber die, da muss man schon bisschen sensibel sein ... aber man könnte die schon erfassen.

Also die sind ungefähr – würde ich sagen – so 2 oder 3 cm auseinander.

SK: Gewinnt man da den Eindruck, dass die zusammengehören oder hat man den Eindruck eher nicht?

ES: Also ich würde sagen, Flecken ... ja die könnten ... was sie gerade erklärt haben ... das hat dann mit dem System dann zu tun, dass die unabhängig sind die beiden Flecken, aber irgendwo vielleicht gleichzeitig, je nachdem wie die Umdrehung der Sonne ist, die Bewegung der Sonne, dass sie auf einmal dann da sind ... könnten zwar vielleicht zwei verwandte Flecken sein aber so genau kann man das irgendwie ... wenn man sich bekleckert mit dem Kuchen, sind vielleicht auch auf einmal zwei Flecken da.

SK: Aber rein zufällig

ES: Rein zufällig würde ich sagen, sind dann eben halt Flecken da oder durch die Bewegung können dann auch zwei Flecken erzeugt werden ... bestehen, also nicht erzeugt, aber bestehen dann.

Ist bekannt welches Phänomen sich auf der Oberfläche der Kugel verbirgt, so lässt sich dieses schließlich auch auffinden. Die beschriebene Empfindung „es war so ein kleiner Punkt“ entspricht genau der Intention bei einem typischen Sonnenfleck, der nur einen sehr kleinen Teil der Sonnenoberfläche einnimmt.

Bezüglich der Fleckengruppen ist festzustellen, dass selbst dann, wenn beide Flecken einer Gruppe aufgefunden wurden, kein Gefühl von Zusammengehörigkeit entsteht. Die Verteilung wird vielmehr als rein zufällig angesehen. Es wird dabei eine Dynamik auf der Sonnenoberfläche vermutet, die für die vorgefundene Anordnung der Flecken ausschlaggebend sein soll.

Zur weiteren Erkundung des Modells wird der Testerin jetzt ein kleiner Magnet gereicht. Dieses „rastet“ auf den starken Neodymmagneten des Modells ein:

ES (überrascht): Da!

SK: Etwas ruckartig.

ES: Das stimmt!

Es folgt eine kurze Erklärung zu den starken Magnetfeldern auf der Sonnenoberfläche und der verwendeten Technik innerhalb des Modells.

Die Probandin verwendet den Südpol des Magneten um die Oberfläche der Kugel zu untersuchen. Die weitere Inspektion im Bereich der Fleckengruppe 2 bleibt erfolglos. Diese abstoßende Wirkung des zweiten Flecks (der Südpol liegt bei diesem Fleck auf der Außenseite) wird trotz der Stärke des eingebauten Magneten nicht gespürt. Der Magnet wird daher probeweise direkt zum Fleck geführt:

SK: Merken sie das?

ES: Ja. Der ist schwach der Fleck.

Der Magnet der Testerin wird nun mit dem Nordpol zum Modell gedreht und die umgekehrte Magnetisierung der Flecken innerhalb der Gruppe erläutert. Der Effekt kann so verständlich gemacht werden.

Abschließend äußert die Probandin:

ES: Aber dieses Modell ist schon sehr schön.

Tastbare Übersichtsgrafik zu den Sonnenflecken

Die tastbare Grafik wird der Testerin nach einer kurzen Information über den Übersichtscharakter der Darstellung vorgelegt:

ES: Ich habe jetzt zwei Sterne wieder gefunden, einen ein bisschen außerhalb. Der Äquator der Sonne ist ... ne des ... oder soll das wieder ganz die Sonne sein?

Und diese Punkte, die Flecken darstellen sollen, also die stärkeren Punkte, das sind die Flecken sichtbar, aber hier auf dem Bild ist das glaube ich mehr zum Osten hin. Und der kleinere Punkt, den ich gerade erwischt habe, wie gesagt westlich orientiert und südlich sind dann auch wieder Flecken festzustellen. Jetzt will ich mal in den Norden mal gucken... da ist ganz dünn Flecken festzustellen ...

Die punktartige Darstellung der Sonnenflecken wird hier mit der Darstellung des HRD verknüpft und zunächst entsprechend interpretiert. Anhand der äußeren kreisförmigen Begrenzung wird die Darstellung dann als Bild der Sonne erkannt. Im folgenden werden geografische Bezeichnungen (Äquator, westlich, östlich etc.) verwendet, obwohl diese in der Darstellung nicht vorhanden sind. Die Orientierung im Bild gestaltet sich für die Testerin mühelos. Alle Flecken werden aufgefunden und in ihrer Lage richtig beschrieben.

Entsprechend positiv fällt das Fazit aus:

ES: Das Bild ist eigentlich optimal, ich meine ich würde es ein bisschen verstärken, so aber ich meine man kann damit so zufrieden sein. Es ist ... das braucht auch nicht unbedingt jetzt größer erstellt werden, weil dann nur jetzt ein Bild da drauf gezeigt ist, die Sonne mit den Punkten und den Entfernungen...

Tastbare Detaildarstellung eines Sonnenflecks

Nach der Überblicksdarstellung wird das vergrößerte Bild eines Einzelflecks begutachtet:

ES: Die Struktur des Fleckens, das finde ich auch ganz gut, wenn man das erläutert, wie man das jetzt über das Teleskop betrachten kann. Dass man jetzt nicht nur so einen Flecken sieht – so einen Kleks – sondern das man eben den Fleck jetzt näher betrachtet, weil seine Anschauung, dass man eben jetzt ... Sie sagten ja die sehen dunkel aus und wenn man jetzt den jetzt

genauer betrachtet, dass der vielleicht auch irgendwie rau ist oder irgendwie mit Einwebungen mit drin sind, das könnte man herausfinden. Also rau – oder raue Stellen hat der Fleck – vielleicht Verbrennungen oder das es darstellen sollte wo der Fleck, der eben halt nur ganz glatt ist, das würde dies Bild auszeichnen dann ... Das man dann vielleicht ein Bild macht wo die Flecken die Rauheit zeigt und dann vielleicht extra Bild, dass es eben Flecken gibt, die ganz glatt sind, dass es eben auch unterschiedliche Flecken gibt, die man auch so betrachten kann übers Teleskop.

Die starke Vergrößerung mit der Darstellung der Details wird begrüßt. Die Struktur mit ihrer Rauheit und ihren „Einwebungen“ wird mit Interesse betastet und positiv beschrieben. Die dargestellte Struktur innerhalb der Penumbra, mit ihren radial nach außen gerichteten filamentartigen Röhren, wird nicht explizit erwähnt. Inwieweit die beschriebenen Einwebungen mit dieser Struktur assoziiert sind, lässt sich nicht mit Gewissheit ermitteln. Die Quelle der Vermutung, dass neben „rauen“ auch „glatte“ Flecken existieren, dürfte im Modell zu finden sein. Die Tatsache, dass es bei der Modelldarstellung lediglich um das Auffinden anhand des Temperaturunterschiedes geht, ohne dass dort die innere Struktur des Flecken dargestellt werden soll, muss deutlich gemacht werden.

Nach Auffälligkeiten der Darstellung befragt, gibt die Probandin an:

ES: Ich würde vielleicht – wie auch bei dem anderen Bild – die Sonne auch so abzeichnen wie Sie es vorhin gemacht haben mit diesem Äquator auch da drin, dass man auch sieht, dass die Flecken sich in allen Himmelsrichtungen sich bewegen oben und unten links und rechts das es dann auch klar ist und das ist jetzt einfach nur ein Bild mit dem Flecken. ... Das würde plastisch ein bisschen mehr hergeben.

Der Wunsch nach einem Orientierungsrahmen ist sehr wohl verständlich. Offenbar handelt es sich an dieser Stelle jedoch um ein Missverständnis, welches den Maßstab des gezeigten Sonnenflecks betrifft. Gleichwohl ist die Einbindung eines Vergleichmaßstabes zu bedenken. Vorstellbar wäre etwa eine Darstellung der Erde als Kreis, um die Abmessungen zu veranschaulichen und den Wechsel des Größenmaßstabes deutlicher hervortreten zu lassen.

Winkelmesser

Der Test des Messinstruments muss, bedingt durch die Witterung und Jahreszeit, mit Hilfe einer Lampe durchgeführt werden. Die 100 W-Lampe wird dabei in etwa 4 m Entfernung zum Instrument in ca. 1,70 m Höhe angebracht. Der Winkelmesser selbst steht vor der Testerin auf einem Tisch.

Nach kurzem Ertasten, um einen Überblick zu erhalten, versucht die Testerin die Braille-Beschriftung auf dem Azimutring (bei 260°) zu lesen. Die Zahl wird gelesen als:

0 – N – Punkt – N

Die vertikale Ausrichtung der Schrift bringt zusätzliche Verwirrung mit sich. Nochmaliges Ablesen ergibt.

a – b – 0

Ein Grund für die Schwierigkeiten ist die geringe Distanz der Zahlzeichen zur Skalierung. Nach dem Hinweis, dass es sich um Zahlen handelt wird nun gelesen:

ES: 2-6-2.

SK: 260 müsste es sein.

ES: Genau, hier oben habe ich, glaube ich, auch die Null gefunden.

Auch der Abstand der Holzkonstruktion oberhalb des Azimutringes zu den Zahlen ist zu gering. Empfehlenswert erscheint ein Abstand von etwa einem Zentimeter.

Die Funktionsweise des Rings sowie des Höhenzeigers werden nun erläutert. Das Messprinzip wird mittels einer Analogie verdeutlicht, bei der die ungleichmäßige Sonneneinstrahlung auf das Gesicht herangezogen wird.

Hinweis: Die Lampe ist aufgrund des vorhandenen Restsehvermögens für die Testperson sichtbar. Eine Grobeinstellung des Instruments kann damit anhand des visuellen Eindrucks erfolgen. Die Gültigkeit der hier gewonnenen Erkenntnisse für vollständige erblindete Personen dürfte hierdurch jedoch nicht nennenswert beeinträchtigt werden.

Während der Nutzung wird eine Nachfrage zur Funktion gestellt:

ES: Wenn der Ton verschwindet heißt das, dass wir von der Sonne weg sind?

Auf die tatsächliche Funktionsweise (ein tieferer Ton bedeutet eine Annäherung an die Position der Sonne) wird nochmals hingewiesen.

Der Winkelmesser produziert bei einer Stellung von etwa 90° abseits der Richtung der Lichteinstrahlung einen relativ tiefen Ton.⁵⁰ Es wird nochmals eine technische Frage gestellt:

ES: Also jetzt befinden wir uns in der Nähe der Sonne?

Auf den Zusammenhang zwischen einem hohen Ton und einer „schlechten“ Ausrichtung wird hingewiesen.

Mit dem Vorübergang des Winkelmessers an der Richtung der Lichteinstrahlung wird die deutlich unterschiedliche Tonhöhe hörbar. Die Probandin wird gebeten das Instrument zurückzudrehen und möglichst exakt den Punkt zu suchen, an dem die Tonhöhe wechselt.

⁵⁰Der Ton wird durch Streulicht hervorgerufen, welches im Anschluss unterdrückt wurde. Der Ton war dennoch sehr deutlich von der angestrebten minimalen Frequenz zu unterscheiden.

Eine exakte Ausrichtung (erkennbar durch die Tonhöhe von 50 Hz) ist schwierig zu erreichen. Für die Messgenauigkeit ist dies nicht relevant, da die Ablesefehler an der Skala die Fehler in der Ausrichtung deutlich übertreffen.⁵¹

Nach der Einschätzung befragt, ob sich ein so eingestellter Messwert ermitteln lassen würde, wird angegeben:

ES: Das ist ... das lässt sich, wenn die Punktsschrift jetzt besser wäre, also das ist optimal dann, weil hier der Zeiger ist und man hat gerade den Ton gehört und man will es jetzt gerade überprüfen dann kann man das ... dann auch so ablesen ... ist das auch identisch dann vielleicht.

Zur Ermittlung der Höhe greift die Testerin zunächst den Zeiger an seinem Ende, im Bereich der Fotowiderstände. Das leicht verdickte Griffstück (siehe Bild auf S. 132) wird nach einem Hinweis als bessere Alternative angenommen. Anzumerken ist, dass die versenkt angebrachten Fotowiderstände kaum zu tasten sind. Dementsprechend kann von dem Bediener kaum eine selbstständige Rücksichtnahme auf deren Funktionsfähigkeit erwartet werden.

Bei der Durchführung stellt sich heraus, dass bei dem gegebenen Abstand von etwa 4 m und den Beleuchtungsverhältnissen im Raum die Funktion der Höhenmessung gestört ist. Eine Veränderung der Tonhöhe stellte sich erst bei einer deutlichen Verringerung des Abstands ein, was jedoch die Positionierung durch die nun stark ausgedehnt erscheinende Lichtquelle erschwert. Die Messung der Höhe wurde daher nur demonstriert.

Die Messung der absoluten Helligkeit, zur Verifizierung der Natur des aufgefundenen Objektes, wird an der Lampe getestet. Es stellte sich erwartungsgemäß ein relativ tiefer, jedoch von 50 Hz deutlich zu unterscheidender Ton ein.

Zum Messinstrument wird abschließend spontan angemerkt:

ES: Also ich finde das als Anschauungsmaterial als Modell finde ich das gut, also das für den Unterricht, dass man das so plastisch erklärt ...

Es ist sehr authentisch auch. Mit dem Fühler und den Zahlen so ...

Es folgt ein Hinweis zur Materialauswahl:

ES: Wenn man vorsichtig auch drüber tastet, das Material fühlt sich ... man muss schon ein bisschen ... gut fest sein, damit auch nichts kaputt geht ... fühlt sich auch angenehm an das Material.

Ich habe gerade festgestellt, das Holz, das könnte vielleicht durch mehreres antasten abbröseln vielleicht.

⁵¹Dies würde auch bei der Methode der visuellen Interpolation der Fall sein.

Nach einem optimalen Material für dieses Modell gefragt, gibt die Testerin an, dass Holz generell zu empfehlen ist. Auch Metall wird als angenehmes und empfehlenswertes Material angesehen. Angeführt wird als Beispiel das Modell der Hauptreihensterne.

Nochmal nach dem Ablesen der Winkel von der Skala gefragt, gibt die Probandin an:

SK: Sie meinen die Winkel abzulesen auf der Skala, das ist möglich?

ES: Denke ich schon. Man muss dann nur wissen wenn man den Schülern sagt, dass man muss von oben nach unten lesen⁵², manch einer findet das sofort raus, aber manchmal ist das, wenn die Blindenschrift auf dem Kopf steht, kommt man sich manchmal ein bisschen . . . hast du jetzt das Gefühl verloren oder so. Aber das muss man das wissen, dass man sagt, wie sie es auch gerade gesagt haben, man muss jetzt von oben nach unten lesen . . .

Die (spontan geäußerte) abschließende Bemerkung der Testerin zur Bereitstellung und dem Einsatz von Modellen fasst das Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit sehr deutlich zusammen:

ES: Als Geburtsblinder könnte ich mir schon vorstellen, wenn man alles nur erklärt oder nur Theorie hat, dann ist es doch mal ganz schön wenn man etwas anfühlen kann, wie sieht ein Mond aus, eine Sonne aus oder zum Beispiel die Erkunde und so, man kann nicht alles theoretisch mit dem Kopf begreifen. Es ist schon gut wenn es irgendwelche Modelle gibt . . . oder das man zumindest irgendwas mal antastet, dass man zumindest mal ein Bild von hat.

Sehr positiv fällt auch die Bemerkung zu den tastbaren Grafiken und Bildern aus:

ES: Also diese Tastbilder die haben mir schon viel gegeben . . . also die sie jetzt auch gegeben haben.

⁵²Hierbei handelt es sich um eine Verwechslung: Die Aufschrift ist von unten nach oben zu lesen.

7.2.4 Auswertungsraster

Die Ergebnisse der Zweiterprobung werden im Folgenden in komprimierter Form als Raster dargestellt.⁵³

Tabelle 7.1: Auswertungsraster zum Modell „Tastbare Hauptreihensterne“ (✓ erfüllt, □ teilweise erfüllt, ■ nicht erfüllt).

Kriterium	erfüllt?
Jede Kugel entspricht einem Stern	✓
Die Sterne lassen sich anhand von Größe und Temperatur deutlich voneinander unterscheiden	□
Sterne lassen sich über die Zustandsgrößen Temperatur und Größe beschreiben	✓
Temperatur und Größe des Modellsterns sind korreliert, der Zusammenhang ist eindeutig	□
Datenpunkte im HRD stellen einzelne Sterne dar	■
Es existieren verschiedene Klassen von Sternen (von denen nur eine Klasse im Modell dargestellt wird)	□
Die Modellsterne lassen sich auf der Hauptreihe an bestimmten Positionen wiederfinden	✓

⁵³Vgl. Kapitel 7.2.1

Tabelle 7.2: Auswertungsraster zum Modell „Tastbares Sternbild“ (✓ erfüllt, □ teilweise erfüllt, ■ nicht erfüllt).

Kriterium	erfüllt?
Sterne scheinen uns an der Himmelskugel befestigt zu sein	✓
Sterne werden willkürlich (kulturabhängig) zu Mustern zusammengefasst	✓
Anblick der Cassiopeia als Sternbild ist auf der Seite dargestellt	✓
Größe der Halbkugel entspricht der scheinbaren Helligkeit, alle Sterne erscheinen (etwa) gleich hell	✓
Abstand der Kugeln vom „W“ entspricht ihrem Abstand vom irdischen Beobachter	✓
Sterne eines Sternbildes stehen i.d.R. in keiner physikalischen Verbindung zueinander	✓
Größe der Kugeln entspricht deren Leuchtkraft	✓
Leuchtkraft von Sternen kann sehr verschieden sein	✓
Helligkeit steigt mit wachsender Entfernung an, scheinbare Helligkeit wird durch Kombination aus Verteilung im Raum und absoluter Helligkeit hervorgerufen	✓

Tabelle 7.3: Auswertungsraster zum Modell „Sonnenflecken“ (✓ erfüllt, □ teilweise erfüllt, ■ nicht erfüllt, leer: hier nicht getestet).

Kriterium	erfüllt?
Sonne hat Kugelgestalt	✓
Sonnenflecken lassen sich durch Temperaturabfall identifizieren	□
Im Modell sind sechs Sonnenflecken vorhanden	□
Der Temperaturabfall äußert sich für einen Beobachter in einer unterschiedlichen Farbe der Sonnenoberfläche	✓
Sonnenflecken treten in Gruppen auf	■
Die Sonnenflecken sind nur modellhaft als kalt dargestellt, d.h. die Temperatur ist als relative Temperatur zu verstehen	✓
Sonnenflecken verfügen im Modell und auf der Sonne über eine Magnetfeld	✓
Die Sonnenflecken innerhalb einer Gruppe sind gegensätzlich polarisiert	□
p-Fleck liegt näher am Äquator	
Gegensätzliche Magnetisierung auf den Hemisphären	
Sonnenflecken sind ein veränderliches Phänomen	✓

Tabelle 7.4: Auswertungsraster zum Modell „Winkelmesser“ (✓ erfüllt, □ teilweise erfüllt, ■ nicht erfüllt, leer: hier nicht getestet).

Kriterium	erfüllt?
Sonne beschreibt einen Bogen am Himmel, dessen Lage und Länge sich im Jahresverlauf verändert	
Position der Sonne lässt sich u.a. im horizontalen Koordinatensystem beschreiben	✓
Bedienelemente auffindbar, Rolle der Elemente klar	✓
Bedienung eigenständig durchführbar	✓
Bedeutung der Tonhöhe als Repräsentation der gemessenen Helligkeit	□
Einsicht in Notwendigkeit der Messung der absoluten Helligkeit	✓
Die Messwerte zur Bestimmung der Sonnenposition können erfolgreich abgelesen werden	■
Verständnis der Darstellung der Tagbögen für verschiedene Jahreszeiten	

7.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Erst- und Zweiterprobung sollen in ihren Grundzügen an dieser Stelle zusammengefasst werden. Auf die wesentlichen Gemeinsamkeiten und bedeutsame Unterschiede wird gesondert verwiesen. Die Besprechung gliedert sich in die drei Modelle und das Messgerät sowie einen allgemeinen Teil.

7.3.1 Tastbares Sternbild

Im Rahmen der Ersterprobung wurde angegeben, dass das Sternbild bereits bekannt ist. Im Falle der Zweiterprobung war dies nicht der Fall. Daraus lassen sich die Schwierigkeiten im letztgenannten Fall erklären, die auftraten, als die scheinbare Ansicht am Himmel dargeboten wurde. Derartigen Problemen könnte mit einer leichten Erhöhung des Abstandes der Halbkugeln entgegengewirkt werden. Auch bietet sich ein zusätzliches Anbringen von dünnen Verbindungslinien an, wie sie auch auf Sternkarten zu finden sind. Als Alternative, ohne Änderungen am Modell, kann das dargestellte Sternbild (ggf. als Teil einer größeren Auswahl) vorab als tastbare Grafik zu Verfügung gestellt werden.

Die beiden Erprobungen zeigten unterschiedliche Herangehensweisen beim Ertasten des Modells. Im ersten Fall wurde das Modell sehr systematisch entlang der Metallstäbe untersucht. Im zweiten Fall war das Vorgehen zunächst unsystematisch. Erst im weiteren Verlauf wurde gezielt nach bestimmten Informationsträgern gesucht.

Die tastbare Grafik (im Fall der Zweiterprobung abseits des Modells getestet) brachte bei der zweiten Erprobung ein Problem mit sich. So wurde der nur ausschnittsweise dargestellte Stern hier gar nicht als solcher erkannt. In der Ersterprobung wurde er hingegen direkt als Ausschnitt einer sehr großen Sterns wahrgenommen.

In beiden Fällen war die Größe des Modells gut an den Handtastraum angepasst. Auch die Dichte der Metallstäbe wurde als angemessen beschrieben. Das Modell erwies sich als gut geeignet, um einen plastischen Eindruck von der räumlichen Anordnung der Sterne zu vermitteln. Beide Testpersonen regten an, die Stabilität des Modells zu erhöhen.

7.3.2 Hauptreihensterne

Das Modell der Hauptreihensterne zeigt deutliche Unterschiede bei der unmittelbaren Erkennbarkeit der zentralen Aussage. Während in der Ersterprobung die unterschiedliche Temperatur aller drei Kugeln direkt erkannt wurde, war dies bei der Zweiterprobung nicht mehr der Fall. Dies kann zum einen durch eine langsame Erwärmung der kleinsten Kugel erklärt werden. Zum anderen kommt als Erklärungsansatz auch eine unterschiedliche Vorgehensweise beim Ertasten in Betracht. Optimal ist ein Abtasten des Modells mit einer Hand, bzw. mit beiden Händen, sofern nicht eine Hand auf einer Kugel ruhen bleibt. Der Effekt der

sensorischen Adaption (siehe Kapitel 4.1.1) muss in jedem Fall berücksichtigt und für die selbstständige Arbeit mit dem Modell in den Handreichungen vermerkt werden. Weiterhin kann eine wärmeisolierende Abschirmung hinter der kleinsten Kugel angebracht werden, um einer unbeabsichtigten Erwärmung entgegenzuwirken.

In beiden Fällen wurde die angenehme Erscheinung des Modells hervorgehoben. Dies spricht für die Materialwahl in Form einer Holz-Metall-Kombination sowie für die gewählten Temperaturen.

Die tastbare Grafik zum HRD wurde in der Ersterprobung als Darstellung einer Häufung von Sternen mit verschiedenen Zustandsgrößen verstanden. Inwiefern dies auch in der Zweiterprobung der Fall war, lässt sich nicht mit hinreichender Sicherheit bestimmen. In jedem Fall könnten, im Zuge einer Vergrößerung der Darstellung, zusätzliche Beschriftungen im Bereich der Diagrammfläche angebracht werden.

7.3.3 Sonnenflecken

Die für das Modell der Sonnenflecken zentrale Information der kühlen Stellen wird weiter unten behandelt. Zunächst soll auf die Differenzen zwischen beiden Erprobungen eingegangen werden. Während bei der Ersterprobung das Magnetfeld problemlos erkannt und die unterschiedlichen Magnetpole der Sonnenflecken identifiziert werden konnten, stellte dies bei der zweiten Erprobung ein Hindernis dar. Zwar war auch hier die anziehende Wirkung des einen Flecks innerhalb einer Gruppe sofort spürbar. Jedoch konnte die abstoßende Wirkung des zweiten Flecks nicht als solche erkannt werden. Erst mit dem Wenden des Magnets konnte an dieser Stelle Abhilfe geschaffen werden.

Beiden Durchführungen gemeinsam war die Erkenntnis, dass es sich bei dem Modell um einen ehemaligen Globus handelt. Auf Basis dieser vertrauten Empfindung konnte damit der nähere Untersuchung beginnen. Der deutlich fühlbare Ring entlang des Äquators war bei der Herstellung zwar nicht beabsichtigt, erleichtert jedoch die Orientierung auf dem und die Verständigung über das Modell.

Schwierig gestaltete sich in beiden Fällen die Entdeckung der Modellsonnenflecken in Form der kühlen Stellen. Beide Male musste die höchstmögliche Kühlleistung aufgewendet werden. Anzumerken ist dabei, dass in beiden Fällen vorab keine Information über die Art des vorzufindenden Effekts gegeben wurden. Folglich konzentrierten sich beide Probanden auf die äußere Form und die Beschaffenheit ihrer Oberfläche. Dabei wurde selbst die kleinsten Unebenheiten erkannt. Die kälteren Flächen blieben dagegen zunächst unentdeckt.

Mögliche Abhilfe könnte ein anbringen von rauen Stellen über den Peltierelementen sein. Dagegen spricht jedoch die Intention, den Effekt auf die Temperatur zu reduzieren. Auch wurde während der Ersterprobung der Verzicht auf das Vorhandensein von Oberflächenstrukturen explizit positiv hervorgerufen. Daher wird zur Verbesserung der Qualität des Modells eine

Erhöhung der Kühlleistung als zielführend angesehen. Dies könnte, ohne die Geräuschkulisse zu verändern, aus dem Anbringen einer weiteren Lage Peltierelemente auf der Ersten bestehen. Es ist in diesem Fall jedoch mit dem vermehrten Auftreten von Kondenswasser auf der Oberfläche zu rechnen.

7.3.4 Winkelmesser

Da der Test des Winkelmessers auf die Zweiterprobung beschränkt war, werden an dieser Stelle die dort gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst.

Während das Messprinzip grundsätzlich nachvollziehbar ist und die Handhabung des Gerätes kein Hindernis darstellt, ergeben sich auch einige Mängel. So ist die Skalierung nicht lesbar. Unabhängig von der Qualität der Brailleschrift (s. u.) ist der Abstand der Skalenstriche bzw. der Holzelemente von den Braillezeichen zu gering. Ein Mindestabstand von einem Zentimeter erscheint empfehlenswert.

Die Verknüpfung eines tiefen Tons mit einer großen Helligkeit stellte sich als nicht besonders eingängig heraus. Die plötzliche Änderung der Tonhöhe bei einem Schwenk über die Sonnenposition hinweg, ist jedoch gut geeignet, um die Funktionsweise zu demonstrieren.

Angedacht werden könnte eine Anpassung der Materialwahl, da diese als möglicher Schwachpunkt (hinsichtlich der Haltbarkeit) identifiziert wurde.

7.3.5 Allgemeines

Für alle Modelle signifikant ist die Feststellung, dass das Vorwissen der Testperson ein wesentliches Kriterium für die Tastleistung und die darauf folgende Interpretation ist. Der sehr unterschiedliche Erfahrungsschatz der Probanden der Erst- und Zweiterprobung bringt diesen Aspekt deutlich zum Ausdruck. Während im ersten Erprobungsschritt bereits das selbstständige Ertasten Ergebnisse erbrachte, die nahe an die intendierten Zielsetzung heranreichten, wurden im Rahmen der Zweiterprobung deutlich häufiger lenkende Eingriffe notwendig.

Es bleibt festzuhalten, dass die Einbettung der Modelle in einen interpretatorischen Rahmen für Blinde und Sehbehinderte von größerer Bedeutung ist als für Sehende. Die Möglichkeit des selbstständigen Erkundens bleibt auf eine kleine Zahl von Fällen beschränkt und kann nicht als allgemein geeignete Methode zur Erschließung angesehen werden.

Abschließend soll an dieser Stelle nochmals auf die Qualität der Brailleschrift eingegangen werden. Im Rahmen der Ersterprobung wurde diese als lesbar bezeichnet. Angemerkt wurde jedoch, dass die Qualität womöglich nicht für jeden Leser ausreichend sein könnte. Daraufhin wurde bei der Herstellung der Positive der tastbaren Darstellungen von geprägten Folien auf geprägte Pappe gewechselt. Damit ließen sich auf der Tiefziehfolie deutlich stärker ausgeprägte Braillepunkte erzeugen. Wie die Zweiterprobung zeigt, sind jedoch auch diese

Ergebnisse nicht für jeden Leser geeignet. Selbst die Originalprägungen in Pappe wurden in diesem Test bereits als abgenutzt bezeichnet.⁵⁴

Im Hinblick auf diese Erkenntnisse ist die eigenständige Herstellung von tastbaren Darstellungen mit Brailleschrift generell in Frage zu stellen. Sofern kein professionelles Werkzeug in Form von Metallprägungen und leistungsstarken Tiefziehmaschinen zur Verfügung steht, kann nicht für jeden Leser eine ausreichende Qualität garantiert werden. Ein nachträgliches Anbringen von Beschriftungen auf den Folien könnte das Problem lindern, bringt jedoch Nachteile im Hinblick auf die Haltbarkeit mit sich.

⁵⁴Die Positive wurden meist nur für einen einzigen Tiefziehvorgang genutzt. Eine Verschlechterung des Zustands der Prägungen in der Pappe konnte dabei nicht festgestellt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass bereits die ursprüngliche und ungenutzte Prägung als mangelhaft empfunden würde.

8 Resultate und Ausblick

8.1 Ergebnisse und Thesen

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen nun zusammenfassend, als Antworten auf die eingangs aufgestellten Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1.3), dargestellt werden. Darüber hinaus ist zu betonen, dass ein wesentlicher Teil der eigenständigen Leistungen gerade in der Entwicklung, dem Bau und der Erprobung neuartiger blindengerechter Demonstrationsmodelle besteht. Die Forschungsarbeit über die nachfolgend referiert wird wäre ohne diese Vorleistung überhaupt nicht möglich gewesen.

- **Warum sollten Astronomie und Astrophysik auch an Blindenschulen gelehrt werden?**

Kapitel 2 widmet sich der Beantwortung dieser Frage durch eine Erweiterung der Fragestellung auf die Bedeutung der Astronomie über die Schule hinaus auf die Gesellschaft im Ganzen. Sie lässt sich somit ausgehend von diesen Teilbereichen beantworten:

- Die Bedeutung astronomischer Inhalte für Blindenschulen ergibt sich aus den allgemein positiven Aspekten derartiger Themen auf den Schulunterricht. Der Förderung des Verständnisses von Modellen kommt allgemein im naturwissenschaftlichen Unterricht eine große Bedeutung zu und hier können die Astronomie und Astrophysik wertvolle Beiträge leisten. Ihre Untersuchungsgegenstände bleiben für eine Analyse vor Ort unzugänglich und sie sind daher selbst stark auf die Verwendung von Modellen angewiesen.

Astronomische Themen lassen sich als Anlass für fächerübergreifenden Unterricht einsetzen, der einerseits das Vorgehen der modernen Wissenschaft abbildet und andererseits auch als wichtiger Weg zu guter schulischer Bildung gilt. Weiter wurde gezeigt, wie sich durch astronomische Kontexte das Interesse Lernender an physikalischen Themen im Unterricht steigern lässt.

Bei den genannten Punkten handelt es sich um Erkenntnisse der allgemeinen Didaktik sowie der Fachdidaktik des Faches Physik. Diese lassen sich ohne Einschränkungen auch auf Blindenschulen übertragen.

- Die zweite Teilfrage nach der gesellschaftlichen Bedeutung der Astronomie lässt sich mit ihrer allgemeinbildenden Funktion beantworten. Diese Funktion ist dabei unabhängig vom herrschenden Zeitgeist bezüglich der gewünschten Art und des Umfang von Allgemeinbildung. Es handelt sich vielmehr um dauerhaft bestehende Aspekte, die etwa die Generierung eines Weltbildes und die fundamentale Rolle der Astronomie als Lebensgrundlage der Menschheit betreffen.

Auch typische astronomische Fehlvorstellungen, etwa zur Entstehung der Mondphasen oder der Jahreszeiten, welche noch weit verbreitet sind, können durch Integration astronomischer Inhalte in den Unterricht zurückgedrängt werden.

- Die Frage nach der optimalen Art der Einbindung astronomischer Inhalte – sei es mittels eigenem Fachs oder durch Einbindung in den bestehenden Physikunterricht – soll hier nicht beantwortet werden.

These 1

Astronomie und Astrophysik sollten u.a. aufgrund ihrer spezifischen Methoden und ihres fächerübergreifenden Charakters sowie wegen ihres herausragenden Beitrages zu einer umfassenden Allgemeinbildung auch an Blindenschulen in den Unterricht integriert werden.

- **Welche Themen kommen für eine Umsetzung in Modelle besonders in Betracht?** Dieser Frage wurde methodisch durch eine Lehrplananalyse (Kapitel 3.2) nachgegangen. Nach der Einteilung bestimmter Themenfelder wurde gezeigt, welchen Themen für den Schulunterricht gegenwärtig die größte Bedeutung beigemessen wird.
 - Innerhalb der Themenfelder der Astronomie finden sich dabei sowohl Inhalte der klassischen Astronomie als auch solche der modernen Astrophysik. Die häufig auftretenden Inhalte betreffen oft die Lebenswelt der Lernenden, da alltägliche Phänomene behandelt werden.
 - Diejenigen Inhalte die sich zunächst keiner Kategorie zuordnen lassen und dennoch sehr häufig zur Behandlung in der Schule vorgesehen sind, deuten wiederum zwei Aspekte der schulischen bzw. gesamtgesellschaftlichen Bedeutung der Astronomie an. Zum einen ist dies die Analyse von Weltbildern, die die Generierung eines eigenen naturwissenschaftlichen Weltbildes befördern soll. Zum anderen ist es die Behandlung der möglichen Existenz außerirdischen Lebens, welche stark motivationsfördernd wirken kann.

These 2

Für eine Umsetzung in blindenspezifischen Modelle eignen sich solche Themen, die auch in den Lehrplänen eine weite Verbreitung aufweisen. Ihre Bedeutung ist sowohl innerhalb der Fachsystematik als auch bei einer in den Physikunterricht integrierten Behandlung besonders groß.

- **Welche Sinneskanäle eignen sich zur Vermittlung astronomischer Inhalte? Lässt sich das Spektrum der Wahrnehmung über den Tastsinn hinaus nutzen?**

Bislang entwickelte Modelle (vgl. Kapitel 1.5) zur Astronomie sprechen primär und in den meisten Fällen ausschließlich den Tastsinn an. Dieser ist ohne Zweifel für die Vermittlung grundsätzlich geeignet. Als ergänzende Zugänge wurden hier das Wärmeempfinden sowie das Gehör genutzt.

- Die Nutzung des Wärmeempfindens bietet besonders in der Astronomie bzw. Astrophysik einige Vorteile gegenüber einer Beschränkung auf den Tastsinn. So äußern sich etwa Eigenschaften von Sternen in ihrer Temperatur. Will man solche Daten in ein Modell übertragen, so ist das Ausweichen auf einen anderen Sinneskanal mit einem Verlust der direkten Assoziation verbunden. Die Nutzung des Wärmeempfindens zur Informationsvermittlung ist zudem ungewohnt, sodass erwartet werden kann, dass die so vermittelten Inhalte nachhaltiger im Gedächtnis verankert werden.⁵⁵
- Im Gegensatz zum Wärmeempfinden findet sich für das Gehör keine direkte Assoziation zu astronomischen Phänomenen. Verbreitet ist dagegen die Darstellung der Lichtintensität durch eine Variation der Frequenz eines Tongenerators. Es wird ein Messinstrument vorgestellt⁵⁶, welches mittels dieser Methode die Ermittlung der hellsten Stelle des Himmels und damit die Bestimmung der Position der Sonne eigenständig ermöglicht.

These 3

Neben dem Tastsinn eignen sich auch das Wärmeempfinden sowie das Gehör zur Vermittlung astronomischer Inhalte. Die Thermorezeption macht dabei eine direkte Assoziation zwischen Modell und Phänomen möglich.

- **Lassen sich himmelskundliche Modelle für blinde und sehbehinderte Lernende mit einfachen Mitteln herstellen?**

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass hierbei speziell die Astrophysik, d.h. die Untersuchung astronomischer Objekte und Phänomene mittels physikalischer Methoden, angesprochen ist. Dieser Frage wurde in praktischer Form durch das Erstellen entsprechender Modelle nachgegangen. Astrophysikalischer Natur sind dabei die Inhalte der Modelle „tastbare Hauptreihensterne“⁵⁷ und „Sonnenflecken“⁵⁸. Derartige Modelle lassen sich durchaus mit relativ einfachen Mitteln herstellen, es sollen hier jedoch nochmals wichtige Vor- und Nachteile der Umsetzung zusammengefasst werden:

⁵⁵Siehe Kapitel 6.1 und 6.3.

⁵⁶Siehe hierzu Kapitel 6.4.

⁵⁷Siehe Kapitel 6.1.

⁵⁸Siehe Kapitel 6.3.

- Die modellhafte Darstellung der astrophysikalischer Eigenschaften eines Objektes erfordert zunächst eine konsequente didaktische Reduktion. Nachdem die grundlegenden Sachverhalte identifiziert wurden, lassen sich diese in ein Modell übertragen. Dabei ist jeweils eine möglichst direkte Assoziation anzustreben. Dort wo sich ein Inhalt der direkten Wahrnehmung entzieht – unabhängig davon ob dies durch eine funktionale Einschränkung eines Sinneskanals oder durch das generelle Fehlen eines solchen Sinnes begründet ist –, muss eine möglichst transparente Kompensation geschaffen werden. Ist ein wesentliches Element des Phänomens etwa ein Magnetfeld, so kann dieses direkt im Modell abgebildet werden. Ein Magnet als einfaches Werkzeug macht es für den Nutzer zugänglich. Eine Überfrachtung des Modells durch eine Informationsflut oder eine zu große Zahl angesprochener Sinne muss vermieden werden. Dies erfordert unter Umständen den Rückgriff auf ein zweites Modell und zusätzliche Medien, die das Modell vervollständigen.
- Das auf wenige Eigenschaften eines Phänomens reduzierte Modell muss eben diese Eigenschaften fehlerfrei wiedergeben. Als konkretes Beispiel sei hier das Modell „tastbare Hauptreihensterne“ genannt. Die Temperatur der Kugeln soll hier den Vergleich zwischen verschieden großen Modellsternen ermöglichen. Diese Modellsterne sollen dabei eine gleichmäßige Oberflächentemperatur aufweisen, da Temperaturvariationen auf der Oberfläche eines Einzelsterns in diesem Modell nicht relevant sind. Dieser Anspruch bringt einige technische Schwierigkeiten mit sich. So lässt sich eine Kugel kaum, auf einfachem Wege über eine längere Zeit, auf eine konstante und an der Oberfläche einheitliche Temperatur erwärmen. Das Modell zeigt damit die Grenzen dessen, was noch als Umsetzung mit einfachen Mitteln gelten kann.

These 4

Die Entwicklung astrophysikalischer Modelle ist auch mit einfachen Mitteln möglich. Die korrekte Darstellung der stark reduzierten Eigenschaften erfordert jedoch bisweilen auch umfangreichere technische Lösungen, die in Art und Umfang einer erfolgreichen Realisierung mit schulischen Mitteln jedoch nicht entgegen stehen.

- **Lassen sich wahrnehmungsphysiologische Hindernisse und Paradoxien umgehen bzw. ausschließen?**
 - Eine bekannte wahrnehmungsphysiologische Paradoxie tritt beim Weberschen 3-Schalen-Versuch auf. Derartige Paradoxien konnten während der Erprobung nicht beobachtet werden.
 - Als wahrnehmungsphysiologisches Hindernis können etwa die teils schwierig zu bemerkenden Modell-Sonnenflecken gelten.⁵⁹ Der Temperaturabfall – ohne zusätzliche Kühlung der Peltierelemente durch die angebrachten Lüfter – ist hier,

⁵⁹Siehe Kapitel 7.

je nach Umgebungstemperatur und individuellem Empfinden des Testers unter Umständen nicht groß genug bzw. die Ausdehnung des Modellflecks ist zu gering, um auf Anrieb gespürt zu werden.

Die Lösung kann einerseits in der (technisch bereits vorgesehenen) Vergrößerung der Temperaturdifferenz oder andererseits in einer aktiven Hinführung zu einer der kälteren Stellen bestehen. Sofern die Reizintensität nicht tatsächlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt, kann auch die zweite Variante ausreichend für ein weiteres selbstständiges Entdecken des Phänomens sein.

These 5

Ein Auftreten wahrnehmungsphysiologischer Paradoxien kann verhindert werden. Die physiologischen Bedingungen müssen während der Designphase berücksichtigt werden. Möglichkeiten zur Anpassung an die individuellen Voraussetzungen der Lernenden sollten vorhanden sein.

• Können astronomische Modelle von Blinden und Sehbehinderten weitgehend selbstständig erschlossen werden?

- Der Vergleich beider Erprobungsschritte zeigt deutlich, dass die Interpretation der Tastleistung extrem vom Vorwissen der jeweiligen Testperson abhängt. Was für den Einen die Darstellung einer räumlichen Anordnung von Sternen ist, kann in einem anderen Fall als deren innerer Aufbau aufgefasst werden.⁶⁰
- Aufgrund der – im Vergleich zu Sehenden – höheren Abstraktionsleistung, ist bei Blinden und Sehbehinderten die Einbettung von Modellen in einen interpretatorischen Rahmen von besonders hoher Bedeutung.
- Das Spektrum möglicher Fehlinterpretationen ist ohne entsprechendes Vorwissen sehr groß. Stellenweise ist auch die Fehldeutung möglicher Zusammenhänge zwischen einzelnen Modellen festzustellen, die der ursprünglichen Intention entgegenwirkt. Dies betrifft zunächst die Modelle direkt.⁶¹ Weiterhin sind auch die tastbaren Abbildungen von dieser Beeinflussung betroffen.⁶²

These 6

Astronomische Modelle sind in sehr hohem Maße auf ein einschlägiges Vorwissen angewiesen. Ist ein derartiger Bildungskontext nicht im notwendigen Umfang vorhanden, muss auf die Einbettung des Modells in entsprechendes Informationsmaterial zurückgegriffen werden. Für eine selbsterkundende Arbeitsweise eignen sich Modelle des hier präsentierten Abstraktionsgrades nur für die sehr kleine

⁶⁰Zur den Interpretationen des Modells „räumliches Sternbild“ siehe S. 155 und S. 162.

⁶¹Ein Beispiel aus dem zweiten Erprobungsschritt ist die Erwartung, im Modell der Hauptreihensterne das Himmels-W aus dem vorher erprobten Modell wiederzufinden (siehe S. 167).

⁶²So kann ein Wechsel des Maßstabes zwischen zwei Abbildungen zu Fehlinterpretationen führen (siehe S. 177).

Zielgruppe, die bereits über einen stark ausgeprägten astronomischen Bildungskontext verfügt. Darüber hinaus sollten die Modelle in einen Fachunterricht eingebettet sein.

8.2 Ausblick und offene Fragen

Zum Abschluss sollen Ansatzpunkte für weitere Forschungen aufgezeigt und Fragen und Ansätze dargestellt werden, für die bisher keine Lösung zu benennen ist⁶³.

Es wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht zu allen Themenbereich der Astronomie Modellvorschläge entwickelt. Die Lehrplananalyse (Kapitel 3.2.3) zeigt, dass der Bereich der Bewegungen einen großen Stellenwert aufweist. Mechanische Modelle, sofern sie nicht in sehr einfacher Form durch Alltagsgegenstände realisiert sind, können hier schnell komplexere technische Lösungen erfordern. Eine Alternative könnte in der Nutzung von 3D-Audio-Systemen bestehen, durch die sich nicht nur Richtungen statisch angeben lassen⁶⁴, sondern auch Bewegungsabläufe dargestellt werden können.

Ein weiteres bislang unbearbeitetes Feld ist der Vergleich der Fehlvorstellung zu astronomischen Themen zwischen Blinden, Sehbehinderten und Normalsichtigen. So stellt sich etwa die Frage, ob sich für Blinde ähnliche Entwicklungsschritte im Weltbild erkennen lassen, wie es bei sehenden Schülern der Fall ist. Auch wäre ein Vergleich der Vorstellung zur Entstehung der Mondphasen und der Jahreszeiten interessant, um den Grad der Einflussnahme von visuell bedingten Fehlvorstellungen auf diese Zusammenhänge zu untersuchen.

Nur teilweise beantwortet ist die Eignung und der Nutzen blindenspezifischer Modelle für Sehende. Erste Erfahrungen dazu beziehen sich bislang (vgl. Hecker und Mohr [2012]) auf reine Tastmodelle. Die Nutzung weiterer Sinneskanäle, in diesem Fall neben dem Sehsinn, lässt auch hier positive Effekte erwarten. Bereits ein Tastmodell, bei dem etwa Oberflächenmerkmale fühlbar oder bestimmte physikalische Eigenschaften durch einen weiteren Sinn zugänglich gemacht werden, kann auch hier das Verständnis fördern und der langfristigen Verankerung im Gedächtnis zuträglich sein. Der Annahme, dass auch für Sehende die direkte Assoziation von astronomischem Inhalt und seiner Analogie im Modell Vorteile mit sich bringt, stehen auf theoretischer Ebene keine Einwände entgegen. Der empirische Nachweis war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung und steht noch aus.

Unbeantwortet ist bislang die Frage nach der Darstellung von hoch dynamischen Phänomenen. Damit sind etwa Modelle zum Ablauf des Urknalls oder auch einer Nova bzw. Supernova gemeint. Für eine gegenständliche Umsetzung existiert bisher kein Ansatzpunkt und auch in der vorliegenden Untersuchung konnte dazu kein neuer Zugang erarbeitet werden. Dies ist insofern bedauerlich, als dass es sich bei solchen Phänomenen um medial sehr präsent und auch für die breite Öffentlichkeit interessante Themen handelt.

Ein weiteres wichtiges astronomisches Phänomen entzieht sich bislang ebenfalls einer Umsetzung in ein blindengerechtes Modell, sofern eine sinnvolle Analogie zwischen Objekt und seiner Repräsentation angestrebt wird. Dies betrifft das Auftreten gasförmiger Materieansammlungen, die in sehr unterschiedlicher Dichte und Temperatur zu beobachten sind. Ein

⁶³Siehe hierzu auch Kapitel 6.6.

⁶⁴Dies findet bereits innerhalb von Planetariumspräsentationen Anwendung, siehe Kapitel 1.5.

gegenständliches Modell müsste dazu sowohl den gasartigen Charakter als auch die Temperatur – etwa eine recht niedrige für eine Sternentstehungsregion – abbilden können.

Die beiden letztgenannten Probleme führen auf ein weiteres Themenfeld, welchem eine hohe Bedeutung zuzumessen ist, die Kosmogonie. Es wurde gezeigt⁶⁵, dass sich gerade hierdurch eine sinnvolle Ergänzung des Physikunterrichts erreichen lässt. Auch abseits der hochdynamischen Vorgänge gestaltet sich eine Umsetzung hierbei schwierig. Möglich erscheint die Darstellung – im Stil eines Comics – in Einzelbilder aufzuspalten und sie als Ablauf von Entwicklungsschritten darzustellen. Der Unterschied zu einer klassischen Abbildung bestünde in diesem Fall im Wesentlichen in einer Kompensation der visuellen Wahrnehmung und im optimalen Fall in einer Erweiterung um einen zusätzlichen Sinneskanal. Dadurch ließen sich weitere Informationen – wie etwa die Temperatur – in die Darstellung aufnehmen.

⁶⁵Vgl. Kapitel 3.1.5.

Literaturverzeichnis

- [Aldrige 2000] ALDRIGE, Vivian: *Punktabstand in der Brailleschrift*. 2000. – URL <http://www.braille.ch/abstand.htm>. – Zugriffsdatum: 04.04.2013
- [Andersicht e.V. 2009] ANDERSICHT E.V.: *Die Ohren folgen den Augen ins All - Hörproben aus der Audiodeskription zur Planetariumshow*. 2009. – URL <http://www.andersicht.net/index.php?menuid=49&reporeid=50>. – Zugriffsdatum: 30.10.2013
- [Balona und Dziembowski 1999] BALONA, L.A ; DZIEMBOWSKI, W. A.: Excitation and visibility of high-degree modes in stars. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 309 (1999), S. 221–232
- [Beck-Winchatz 2002] BECK-WINCHATZ, Bernhard: *Can Blind People be Astronomers*. 2002. – URL <http://nfb.org/legacy/fr/fr9/fr03co23.htm>. – Zugriffsdatum: 21.07.2011
- [Beck-Winchatz und Ostro 2004] BECK-WINCHATZ, Bernhard ; OSTRO, Steven J.: Using Asteroid Scale Models in Space Science Education for Blind and Visually Impaired Students. In: *Astronomy Education Review* (2004), Nr. 2. – URL <http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=AERSCZ000002000002000118000001&idtype=cvips&prog=normal>. – Zugriffsdatum: 21.07.2011
- [Beckmann 2011] BECKMANN, Dieter: *Astrophysik*. 1. Aufl. Bamberg : Buchner, 2011. – ISBN 9783766167019
- [Bernhard 2005] BERNHARD, Helmut: Astronomie in der Schule. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 42 (2005), Nr. 4, S. 4–7
- [Bertram 2005] BERTRAM, Bernd: Blindheit und Sehbehinderung in Deutschland. In: *Der Augenarzt* 39 (2005), Nr. 6, S. 267–268
- [Betz 2010] BETZ, Brigitte: *Internationale Braille-Mathematiksschrift: Sechs-Punkt-Systematik ("Marburger Systematik"): unveröffentlichtes Manuskript*. 2010
- [Beyer 1995] BEYER, Martin: Aspekte der Gestaltung und Herstellung taktiler Medien anhand ausgewählter Beispiele. In: LAUFENBERG, Wilfried (Hrsg.): *Taktile Medien : Kolloquium über tastbare Abbildungen für Blinde, 24. - 26. November 1995, Freital bei Dresden*. Dresden, 1995, S. 32–37

- [Bundestag] BUNDESTAG, Deutscher: *Gesetz zu dem Übereinkommen der Vereinten Nationen vom 13. Dezember 2006 über die Rechte von Menschen mit Behinderungen sowie zu dem Fakultativprotokoll vom 13. Dezember 2006 zum Übereinkommen der Vereinten Nationen über die Rechte von Menschen mit Behinderungen: Übereinkommen über die Rechte von Menschen mit Behinderungen.* – URL <http://www.un.org/Depts/german/uebereinkommen/ar61106-dbgbl.pdf>. – Zugriffsdatum: 02.10.2013
- [Campenhausen 1981a] CAMPENHAUSEN, Christoph v.: *Die Sinne des Menschen*. Bd. 2: *Anleitung zu Beobachtungen und Experimenten*. 1981. – ISBN 3136034015
- [Campenhausen 1981b] CAMPENHAUSEN, Christoph v.: *Die Sinne des Menschen*. Bd. 1: *Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung*. Stuttgart : Thieme, 1981. – ISBN 3136033019
- [CDS Strasbourg 2013] CDS STRASBOURG: *VizieR catalogue*. 2013. – URL http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/239/hip_main. – Zugriffsdatum: 17.04.2013
- [Che u. a. 2011] CHE, X. ; MONNIER, J. D. ; ZHAO, M. ; PEDRETTI, E. ; THUREAU, N. ; MÉRAND, A. ; BRUMMELAAR, T. t. ; MCALISTER, H. ; RIDGWAY, S. T. ; TURNER, N. ; STURMANN, J. ; STURMANN, L.: COLDER AND HOTTER: INTERFEROMETRIC IMAGING OF BETA CASSIOPEIAE AND ALPHA LEONIS. In: *The Astrophysical Journal* 732 (2011), Nr. 2, S. 68. – ISSN 0004-637X
- [Comenius Stiftung 2013] COMENIUS STIFTUNG: *Zitate von Johann Amos Comenius*. 2013. – URL <http://www.comenius-stiftung.de/Zitate-von-J-A-Comenius.html>. – Zugriffsdatum: 18.10.2013
- [Comins 2011] COMINS, Neil F.: *Astronomie*. Heidelberg : Spektrum, Akad. Verl, 2011. – ISBN 978-3-8274-2498-3
- [de Boer 2001] DE BOER, Klaas: *Astronomie*. Berlin : Paetec, 2001. – ISBN 3895177989
- [Deutsche Blindenstudienanstalt 2005] DEUTSCHE BLINDENSTUDIENANSTALT: *10 Jahre weltweit erster blindengerechter Planetenlehrpfad*. 2005. – URL <http://www.blista.de/aktuelles/blista-news/ausgaben/20053/a08.php>. – Zugriffsdatum: 30.10.2013
- [Dittmann und Schneider 1993] DITTMANN, Helmut ; SCHNEIDER, Werner B.: Experimente zur Sinneswahrnehmung. In: SCHNEIDER, Werner B. (Hrsg.): *Rückblick und Perspektive*. Erlangen : Palm & Enke, 1993 (Wege in der Physikdidaktik), S. 261–275. – ISBN 3-7896-0513-1
- [Dorschner 2011] DORSCHNER, Johann (Hrsg.): *Handbuch der Experimentellen Physik*. Bd. 11N: *Astronomie, Astrophysik, Kosmologie*. 2011. – ISBN 978-3-7614-2396-7

- [Dubs 2002] DUBS, Rolf: Science Literacy: Eine Herausforderung für die Pädagogik. In: EVANS, Robert (Hrsg.) ; GRÄBER, Wolfgang (Hrsg.) ; KOBALLA, Thomas (Hrsg.) ; NENTWIG, Peter (Hrsg.): *Scientific Literacy*. Opladen : Leske + Budrich, 2002. – ISBN 978-3810027337
- [Eysel 2007] EYSEL, Ulf: Sehen und Augenbewegungen. In: SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.) ; LANG, Florian (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Heidelberg : Springer, 2007, S. 377–420. – ISBN 978-3-540-32908-4
- [Fischer 2005] FISCHER, Olaf: *Modelle und Experimente – Brücken zu Vorstellungen und Erkenntnissen der Astronomie: Habilitationsschrift*. 2005
- [Fromm 1995] FROMM, Wolfgang: Grundzüge taktilen Erkennens und taktilen Darstellens. In: LAUFENBERG, Wilfried (Hrsg.): *Taktile Medien : Kolloquium über tastbare Abbildungen für Blinde, 24. - 26. November 1995, Freital bei Dresden*. Dresden, 1995, S. 23–31
- [Gerber 2001] GERBER, Wolfgang: Geographie und Astronomie - fächerübergreifende Aspekte. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 38 (2001), Nr. 1, S. 37–39
- [Grice 2002] GRICE, Noreen: *Touch the universe: A NASA braille book of astronomy*. Washington, DC : Joseph Henry Press, 2002. – ISBN 9780309083324
- [Grice 2004] GRICE, Noreen: Astronomy for Blind and visually-impaired people. In: HECK, André (Hrsg.): *Organizations and strategies in Astronomy* Bd. 5. Dordrecht : Springer, 2004, S. 217–231. – ISBN 978-1-4020-2570-9
- [Grice 2007] GRICE, Noreen: Resources for Making Astronomy More Accessible for Blind and Visually Impaired Students. In: *Astronomy Education Review* (2007), Nr. 5. – URL <http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=AERSCZ000005000001000154000001&idtype=cvips&prog=normal>. – Zugriffsdatum: 21.07.2011
- [Grice u. a.] GRICE, Noreen ; DAWSON, Dennis ; HOETTE, Vivian ; RICCOBONO, Mark ; BECK-WINCHATZ, Bernhard ; WENTWORTH, Ben ; WINCHATZ, Michaela ; WALTON, Lindy: *The SEE (Space Exploration Experience for the Blind and Visually Impaired) Project: An Example of Making Science, Technology, Engineering, and Math (STEM) Accessible*. – URL http://analyzer.depaul.edu/see_project/ASP/ASP2006.ppt
- [Grice u. a. 2007] GRICE, Noreen ; STEEL, Simon ; DAOU, Doris: *Touch the invisible sky: A multi-wavelength braille book featuring tactile NASA images*. 1. San Juan, PR : Ozone Publishing, 2007. – ISBN 9780977328550
- [Gürtler 2011] GÜRTLER, Joachim: Erscheinungen der Sonnenatmosphäre. In: DORSCHNER, Johann (Hrsg.): *Astronomie, Astrophysik, Kosmologie* Bd. 11N. 2011, S. 116–133. – ISBN 978-3-7614-2396-7

- [Hamel 2013] HAMEL, Jürgen: Scheibe oder Kugel: Was dachten die Gelehrten des Mittelalters über die Erdgestalt. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 50 (2013), Nr. 2, S. 31–34
- [Handwerker und Schmelz 2007] HANDWERKER, Hermann ; SCHMELZ, Martin: Allgemeine Sinnesphysiologie. In: SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.) ; LANG, Florian (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Heidelberg : Springer, 2007, S. 273–295. – ISBN 978-3-540-32908-4
- [Handwerker 2001] HANDWERKER, H.O: Somatosensorik. In: SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.) ; SCHAIBLE, Hans-Georg (Hrsg.) ; BIRBAUMER, Niels (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Berlin [u.a.] : Springer, 2001 (Springer-Lehrbuch), S. 227–256. – ISBN 3540413472
- [Hanslmeier 2002] HANSLMEIER, Arnold: *Einführung in die Astronomie und Astrophysik*. Heidelberg [u.a.] : Spektrum, Akad. Verl., 2002. – ISBN 9783827411273
- [Hathaway 2006] HATHAWAY, David: *Daily sunspot area averaged over individual solar rotations*. 2006. – URL http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/solar_cycle_graphics.html. – Zugriffsdatum: 17.03.2014
- [Hecker und Mohr 2012] HECKER, Andreas ; MOHR, Petra: Astronomie im Dunkeln: Ein weltweit einmaliger Ansatz zur naturwissenschaftlichen Kommunikation. In: *MNU* 65 (2012), Nr. 4, S. 211–214
- [Heimerl 1995] HEIMERL, Franz: Einführung der "Sternhelligkeit". In: *Sterne und Weltraum* (1995), Nr. 1, S. 34–35
- [Heiser u. a. 2012] HEISER, E. ; GROSS, R. ; BACKHAUS, U.: Die Parallaxe von 61 Cygni selbst bestimmt. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 49 (2012), Nr. 1, S. 29–31
- [Henschel 1965] HENSCHEL, Gerhard: Astronomie in der Oberschule für Sehgeschädigte. In: *Blick in das Weltall* (1965), Nr. 9, S. 80–87
- [Henschel 1967] HENSCHEL, Gerhard: Neue astronomische Lehrmittel für Sehgeschädigte. In: *Die Gegenwart: Magazin für blinde und sehbehinderte Menschen und ihre Freunde* (1967), Nr. 6, S. 9–11
- [Heuer u. a. 2005] HEUER, Richard ; LORENZ, Ernst-Dietrich ; MEIER, Günther ; SCHWYTER, Thomas ; SLABY, Wolfgang A. ; WALDVOGEL, Christian: *Das System der deutschen Blindenschrift*. Marburg : Deutsche Blindenstudienanstalt Marburg, 2005
- [Heymann 1997] HEYMANN, Hans W. (Hrsg.): *PB-Buch*. Bd. 34: *Allgemeinbildung und Fachunterricht*. 1. Hamburg : Bergmann + Helbig, 1997. – ISBN 3-925836-39-X
- [Höfler 1913] HÖFLER, Alois: *Didaktische Handbücher für den realistischen Unterricht an höheren Schulen*. Bd. 2: *Didaktik der Himmelskunde und der astronomischen Geographie*. Leipzig und Berlin : Teubner, 1913

- [Holstermann und Bögeholz 2007] HOLSTERMANN, Nina ; BÖGEHOLZ, Susanne: Interesse von Jungen und Mädchen an naturwissenschaftlichen Themen am Ende der Sekundarstufe I. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 13 (2007), S. 71–85. – URL http://www.ipn.uni-kiel.de/zfdn/pdf/006_Holster_13.pdf. – Zugriffsdatum: 28.03.2013
- [INAF - Astronomical Observatory of Padua 2001] INAF - ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF PADUA: *Sky at your Fingertips*. 2001. – URL www.touchthesky.eu/. – Zugriffsdatum: 19.11.2012
- [Junker 1995] JUNKER, Hans: Der Marburger Planetenlehrpfad, das Unerlebbare erfahrbar machen. In: LAUFENBERG, Wilfried (Hrsg.): *Taktile Medien : Kolloquium über tastbare Abbildungen für Blinde, 24. - 26. November 1995, Freital bei Dresden*. Dresden, 1995
- [Keller 2011] KELLER, Hans-Ulrich: Der Ursprung der chemischen Elemente. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 48 (2011), Nr. 1, S. 5–10
- [Kircher 1995] KIRCHER, Ernst: *Studien zur Physikdidaktik: Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen*. Kiel : Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, 1995. – ISBN 3-89088-098-3
- [Kircher 2009a] KIRCHER, Ernst: Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In: KIRCHER, Ernst (Hrsg.): *Physikdidaktik*. Heidelberg [u.a.] : Springer, 2009 (Springer-Lehrbuch), S. 115–148. – ISBN 978-3-642-01601-1
- [Kircher 2009b] KIRCHER, Ernst: Modellbegriff und Modellbildung in der Physikdidaktik. In: KIRCHER, Ernst (Hrsg.): *Physikdidaktik*. Heidelberg [u.a.] : Springer, 2009 (Springer-Lehrbuch), S. 735–762. – ISBN 978-3-642-01601-1
- [Kraus 2012] KRAUS, Simon: Hauptreihensterne als tastbares Modell für Blinde. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 49 (2012), Nr. 6, S. 33–35
- [Kraus 2013] KRAUS, Simon: Blindengerechte Zugänge zur Astronomie: Unter besonderer Berücksichtigung von Beobachtungen des Sonnenstandes im Tages- und Jahresverlauf. In: *PhyDid B - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2013). – URL <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/436/575>. – Zugriffsdatum: 30.01.2014
- [Kretschmer 2000] KRETSCHMER, Michael: Raumfahrt im Sozialkundeunterricht. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 37 (2000), Nr. 4, S. 19–20
- [Kuhn 1977] KUHN, Wilfried: Modelle in der Physik. In: SCHAEFER, Gerhard (Hrsg.): *Denken in Modellen*. Braunschweig : Westermann, 1977, S. 38–48. – ISBN 3-14-167154-0
- [Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt 2003] KULTUSMINISTERIUM DES LANDES SACHSEN-ANHALT: *Rahmenrichtlinien Gymnasium Astronomie*. 2003
- [Kultusministerium Sachsen-Anhalt 2009] KULTUSMINISTERIUM SACHSEN-ANHALT: *Lehrplan Sekundarschule Astronomie*. 2009

- [Kultusministerkonferenz 2013] KULTUSMINISTERKONFERENZ: *Vereinbarung zur Gestaltung der gymnasialen Oberstufe in der Sekundarstufe II*. URL http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1972/1972_07_07-Vereinbarung-Gestaltung-Sek2.pdf. – Zugriffsdatum: 25.03.2013, 2013
- [Lanzara 2009] LANZARA, Mariana ; GRUPO DE TRABAJO DE ACTIVIDADES ASTRONÓMICAS DIRIGIDAS A PERSONAS CON DISCAPACIDAD (Hrsg.): *Manual de uso planetario “El Cielo en tus Manos”*. 2009
- [Laufenberg und Löttsch 1995] LAUFENBERG, Wilfried ; LÖTZSCH, Jürgen: Tastbare Abbildungen für Blinde: Thesen zu Bedarf, Entwurf, Fertigung, Zugriff. In: LAUFENBERG, Wilfried (Hrsg.): *Taktile Medien : Kolloquium über tastbare Abbildungen für Blinde, 24. - 26. November 1995, Freital bei Dresden*. Dresden, 1995, S. 11–22
- [Ledrew 2001] LEDREW, Glenn: The Real Starry Sky. In: *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 95 (2001), S. 32–33. – URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001JRASC...95...32L>
- [Leisner-Bodenthin 2006] LEISNER-BODENTHIN, Antje: Zur Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 12 (2006), S. 91–109. – URL http://www.ipn.uni-kiel.de/zfdn/pdf/006_12.pdf. – Zugriffsdatum: 28.03.2013
- [Lichtenfeld 2000] LICHTENFELD, Jörg: Astronomische Darstellungen in der Kunst. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 37 (2000), Nr. 4, S. 15–18
- [Lindner 2005] LINDNER, Klaus: Astronomie im Physikunterricht. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 42 (2005), Nr. 1, S. 4–5
- [Lotze 2011] LOTZE, Karl-Heinz: Sphärische Astronomie. In: DORSCHNER, Johann (Hrsg.): *Astronomie, Astrophysik, Kosmologie* Bd. 11N. 2011, S. 11–40. – ISBN 978-3-7614-2396-7
- [Mayring 2010] MAYRING, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse*. 11. Weinheim [u.a.] : Beltz, 2010 (Pädagogik). – ISBN 3-407-25533-0
- [Meinike 2013] MEINIKE, Mechthild: Der Himmel unserer Vorfahren: Eine Anleitung zur Untersuchung archäologischer Fundstätten. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 50 (2013), Nr. 2, S. 19–21
- [Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern 2004] MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND KULTUR MECKLENBURG-VORPOMMERN: *Rahmenlehrplan Astronomie*. 2004
- [Ministerium für Schule und Weiterbildung 2008] MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG: *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen Physik*. 2008

- [Ministerium für Schule und Weiterbildung 2013] MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG: *Kernlehrplan für das Gymnasium / Gesamtschule – Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen Physik*. 2013
- [Muckenfuss 1995] MUCKENFUSS, Heinz: *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemässen Didaktik des Physikunterrichts*. 1. Berlin : Cornelsen, 1995. – ISBN 9783464033395
- [Müller 2011] MÜLLER, Andreas: Fotos und Gemälde als Quellen von astronomisch-physikalischen Fragestellungen. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 48 (2011), Nr. 2, S. 13–17
- [Müller 2006] MÜLLER, Rainer: *Physik in interessanten Kontexten*. 2006. – URL <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/physik-in-interessanten-kontexten-rmueller.pdf>. – Zugriffsdatum: 18.03.2013
- [Niebling 1985] NIEBLING, Peter: Sechschwache Sterngucker? In: *Die Gegenwart: Magazin für blinde und sehbehinderte Menschen und ihre Freunde* (1985), Nr. 4, S. 111–112
- [Nussbaum 1979] NUSSBAUM, Joseph: Childrens’s Conceptions of the Earth as a Cosmic Body: A Cross Age Study. In: *Science Education* (1979), Nr. 63(1), S. 83–93
- [Ortiz-Gil a] ORTIZ-GIL, Amelia: *Astronomical activities with disabled people during IYA 2009 in Spain*. – URL http://www.communicatingastronomy.org/cap2010/presentations/ortizgil_100317.pdf
- [Ortiz-Gil b] ORTIZ-GIL, Amelia: *Full moon feeling*. – URL <http://www.communicatingastronomy.org/cap2011/presentations/ortiz-gil.pdf>
- [Ortiz-Gil u. a. 2011] ORTIZ-GIL, Amelia ; BLAY, Pere ; GALLEGO CALVENTE, A. T. ; GOMEZ COLLADO, Miquel ; CARLOS GUIRADO, Jose ; LANZARA, Mariana ; MARTINEZ NUÑEZ, Silvia: Communicating Astronomy to Special Needs Audiences. In: *CAP-journal* (2011), Nr. 11, S. 12–15. – URL http://www.capjournal.org/issues/11/11_12.pdf. – Zugriffsdatum: 04.02.2013
- [Paturi 1996] PATURI, Felix R.: *Harenberg Schlüsseldaten Astronomie: Von den Sonnenuhren der Babylonier bis zu den Raumsonden im 21. Jahrhundert*. Dortmund : Harenberg, 1996. – ISBN 3611005371
- [Pfaff 2010] PFAFF, Heiko: *Schwerbehinderte Menschen 2007*. 2010. – URL https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/Sozialleistungen/Schwerbehinderte2007_22010.pdf?__blob=publicationFile
- [Reichert 2011] REICHERT, Uwe: Das Steckplanetarium der Füssener Sternfreunde. In: *Sterne und Weltraum* (2011), Nr. 3, S. 102

- [Reinboth 2012] REINBOTH, Christian: *Sternenkarten für Blinde und Sehbehinderte – das Weltall mit allen Sinnen entdecken*. 2012. – URL <http://scienceblogs.de/frischer-wind/2012/08/22/sternenkarten-fur-blinde-und-sehbehinderte-das-weltall-mit-allen-sinnen-erfuhlen/>. – Zugriffsdatum: 30.10.2013
- [Resnikoff u. a. 2004] RESNIKOFF, Serge ; PASCOLINI, Donatella ; ETYA'ALE, Daniel ; KOCUR, Ivo ; PARARAJASEGARAM, Ramachandra ; POKHAREL, Gopal P. ; MARIOTTI, Silvio P.: Global data on visual impairment in the year 2002. In: *Bulletin of the World Health Organization* 82 (2004), Nr. 11, S. 844–851
- [Richter 2000] RICHTER, Volker: Fächerübergreifendes Lernen und moderner Fachunterricht. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 37 (2000), Nr. 4, S. 4–6
- [Ries u. a. 2004] RIES, Judit G. ; BAGUIO, M.R ; JURGENS, T.D ; PRUETT, K.M.: *Space Vision 2004: Making Astronomy Accessible to Visually Impaired Students*. 2004. – URL http://www.as.utexas.edu/astronomy/research/people/ries/space_vision.html. – Zugriffsdatum: 21.07.2011
- [Scharf und Buus 1986] SCHARF, Bertram ; BUUS, Søren: Audition I: Stimulus, Physiology, Thresholds. In: BOFF, Kenneth R. (Hrsg.) ; KAUFMAN, Lloyd (Hrsg.) ; THOMAS, James P. (Hrsg.): *Handbook of perception and human performance*. New York : Wiley, 1986. – ISBN 0471829560
- [Schmidt und Schmidt-Thews 1997] SCHMIDT, Robert F. ; SCHMIDT-THEWS: *Physiologie des Menschen: Mit 100 Tabellen*. 27. Berlin : Springer, 1997 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3540630309
- [Sächsisches Staatsministerium für Kultus 2004] SÄCHSISCHES STAATSMIMISTERIUM FÜR KULTUS: *Lehrplan Gymnasium Astronomie*. 2004
- [Schultz 2011] SCHULTZ, Albrecht: Astronomie mit Tabellenkalkulation: Fünfter Teil: Der Erdmond - Bahn und Umlaufzeiten. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 48 (2011), Nr. 5, S. 46–50
- [Schwarz 2007] SCHWARZ, Oliver: *Ausgewählte kosmische und anthropogene Einflüsse auf die Energiebilanz der Erde in elementarisierter Darstellung: Habilitationsschrift*. 2007
- [Schwarz 2010] SCHWARZ, Oliver: Astronomie im Physikunterricht. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 47 (2010), Nr. 3-4, S. 13–16
- [Schwarz 2011] SCHWARZ, Oliver: Die „Gradmessung“ - ein fächerübergreifendes Thema. In: *wissenschaft in die schulen* (2011). – URL <http://www.wissenschaftschulen.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2011-060S-Gradmessung.pdf>. – Zugriffsdatum: 08.05.2013
- [Schwarz 2013] SCHWARZ, Oliver: Was soll die Astronomiedidaktik zukünftig leisten? In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 50 (2013), Nr. 1, S. 9–12

- [Schwarz und Deitersen 2013] SCHWARZ, Oliver ; DEITERSEN, Christian: Die Energiewende aus fachdidaktischer Sicht. In: *PhyDid B - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2013). – URL <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/454>. – Zugriffsdatum: 30.01.2014
- [Sherrick und Cholewiak 1986] SHERRICK, Carl E. ; CHOLEWIAK, Roger W.: Cutaneous Sensitivity. In: BOFF, Kenneth R. (Hrsg.) ; KAUFMAN, Lloyd (Hrsg.) ; THOMAS, James P. (Hrsg.): *Handbook of perception and human performance*. New York : Wiley, 1986. – ISBN 0471829560
- [Skarits 2011] SKARITS, Hatice: Astronomische Symbolik auf dem Krönungsmantel des Heiligen Römischen Reiches. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 48 (2011), Nr. 2, S. 29–31
- [Sommer 2004] SOMMER, Cornelia: Wie Grundschüler sich die Erde im Weltall vorstellen - eine Untersuchung von Schülervorstellungen. In: MÜLLER, Rainer (Hrsg.) ; WODZINSKI, Rita (Hrsg.) ; HOPF, Martin (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln : Aulis Verlag Deubner, 2004, S. 91–103. – ISBN 978-3-7614-2555-8
- [Spering und Schmidt 2009] SPERING, Miriam ; SCHMIDT, Thomas: *Allgemeine Psychologie: Kompakt ; Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Denken, Sprache ; mit Online-Materialien*. 1. Weinheim : Beltz, PVU, 2009. – ISBN 3621277528
- [Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München 2009] STAATSINSTITUT FÜR SCHULQUALITÄT UND BILDUNGSFORSCHUNG MÜNCHEN: *Lehrplan Physik 11/12*. 2009. – URL <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=27147>. – Zugriffsdatum: 10.08.2014
- [Statistisches Bundesamt 2008] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Datenreport 2008: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. Bonn : Bundeszentrale für politische Bildung, 2008. – ISBN 3893319093
- [Sternwarte Sankt Andreasberg 2013] STERNWARTE SANKT ANDREASBERG: *Barrierefreiheit*. 2013. – URL <http://sternwarte-sankt-andreasberg.de/barrierefreiheit/>. – Zugriffsdatum: 30.10.2013
- [Stevens 1975] STEVENS, S. S.: *Psychophysics introduction to its perceptual, neural, and social prospects*. New York : Wiley, 1975. – ISBN 0471824372
- [Strassl 1946] STRASSL, H.: Die erste Bestimmung der Fixsternentfernung: Zum hundertsten Todestag von F. W. Bessel. In: *Die Naturwissenschaften* 33 (1946), Nr. 3, S. 65–71
- [STScI 2012] STSCI: *Tactile astronomy*. 2012. – URL <http://amazing-space.stsci.edu/tactile-astronomy/>. – Zugriffsdatum: 05.11.2013
- [Suhrweiler 1966a] SUHRWEILER, Horst: Können Blinde besser fühlen? In: *Die Gegenwart: Magazin für blinde und sehbehinderte Menschen und ihre Freunde* (1966), Nr. 11, S. 16–21

- [Suhrweiler 1966b] SUHRWEILER, Horst: Können Blinde besser fühlen? (Schluss). In: *Die Gegenwart: Magazin für blinde und sehbehinderte Menschen und ihre Freunde* (1966), Nr. 12, S. 16–18
- [Thüringer Kultusministerium 1999a] THÜRINGER KULTUSMINISTERIUM: *Lehrplan für das Gymnasium Astronomie*. 1999
- [Thüringer Kultusministerium 1999b] THÜRINGER KULTUSMINISTERIUM: *Lehrplan für die Regelschule Astronomie*. 1999
- [Thüringer Kultusministerium 2009] THÜRINGER KULTUSMINISTERIUM: *Lehrplan für das Gymnasium Astronomie*. 2009
- [Tran Ngoc Chat und Kraus 2013] TRAN NGOC CHAT ; KRAUS, Simon: Der Sonnennavigator: Ein astronomisches Messinstrument für Blinde und Sehbehinderte. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 62 (2013), Nr. 8, S. 46–49
- [Trumper 2001] TRUMPER, Ricardo: A cross-age study of junior high school students' conceptions of basic astronomy concepts. In: *International Journal of Science Education* 23 (2001), Nr. 11, S. 1111–1123
- [Voigt 2012] VOIGT, Hans-Heinrich: *Abriss der Astronomie*. 6. Weinheim : WILEY-VCH, 2012. – ISBN 9783527411238
- [Vosniadou und Brewer 1992] VOSNIADOU, Stella ; BREWER, William F.: Mental Models of the Earth: A Study of Conceptual Change in Childhood. In: *Cognitive Psychology* 24 (1992), S. 535–585
- [Waitz u. a. 2013] WAITZ, Thomas ; CAOTARANI, Bastian ; GRÖGER, Martin: Eisenmeteorite chemisch analysieren. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 50 (2013), Nr. 1, S. 31–37
- [Weferling 2007] WEFERLING, Bernd: Astronomy for the Blind and Visually Impaired: An Introductory Lesson. In: *Astronomy Education Review* (2007), Nr. 5. – URL <http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=AERSCZ000005000001000102000001&idtype=cvips&prog=normal>. – Zugriffsdatum: 21.07.2011
- [Winchatz 2004] WINCHATZ, Michaela R.: *Taking Matters Into Their own Hands: Blind Students' perspectives on Teaching, Trust, and Telescops*. 2004. – URL <http://nfb.org/legacy/fr/fr15/fr04fa04.htm>. – Zugriffsdatum: 21.07.2011
- [Winnenburg 1974] WINNENBURG, Wolfram: Gedanken zum Unterricht in Astronomie. In: *Der Physikunterricht* 8 (1974), Nr. 2, S. 5–42
- [Zenkert 2008] ZENKERT, Arnold: Sternkarten für Blinde und Sehbehinderte. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 45 (2008), Nr. 1, S. 40

- [Zenkert 2011] ZENKERT, Arnold: Bildende Kunst und Astronomie: Historische Treue und astronomische Wirklichkeit. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 48 (2011), Nr. 3-4, S. 53–54
- [Zenner 2001] ZENNER, H. P.: Hören. In: SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.) ; SCHAIBLE, Hans-Georg (Hrsg.) ; BIRBAUMER, Niels (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Berlin [u.a.] : Springer, 2001 (Springer-Lehrbuch), S. 317–342. – ISBN 3540413472
- [Zimmermann 2002] ZIMMERMANN, Helmut: Warum Astronomieunterricht in den Schulen. In: LOTZE, Karl-Heinz (Hrsg.): *Naturphänomene und Astronomie*. Erlangen : Palm u. Enke, 2002 (Wege in der Physikdidaktik), S. 99–109. – URL <http://www.solstice.de/cms/upload/wege/band5/Wege5-99-109.pdf>. – Zugriffsdatum: 13.02.2013. – ISBN 3789606669

Abbildungsverzeichnis

1.1	Sternentstehungsregion 30 Doradus als Vorlage für eine taktile Darstellung.	9
1.2	Halbkugel zur Unterstützung der Planetariumspräsentation.	11
1.3	Modell des Jupiter aus der Ausstellung „Astronomie im Dunkeln“.	12
2.1	Die Nutzung regenerativer Energien durch den Menschen muss in der energetischen Bilanz der Erde versteckt werden.	19
2.2	Beispielhafte Darstellung zum Modell 4.	20
2.3	Interesse an sowie Einschätzung der Bedeutung von Physik im Lauf der Schulzeit.	25
2.4	Interesse von Mädchen und Jungen an verschiedenen naturwissenschaftlichen Kontexten.	26
3.1	Schema der strukturierten Inhaltsanalyse.	34
4.1	Zusammenhang zwischen physikalischem Reiz und Empfindung nach Fechner.	49
4.2	Beurteilung der Leuchtkraft von Sternen mittels visueller Beobachtung (Stellar magnitude) und fotometrische Helligkeit.	50
4.3	Vergleich zwischen den Empfindungen zu elektrischen Schocks (Stevens-Konstante $n=3,5$), zur scheinbaren Länge einer Linie ($n=1,1$) und zur Helligkeit ($n=0,33$) – lineare Skalierung der Achsen.	51
4.4	Vergleich zwischen den Empfindungen zu elektrischen Schocks (Stevens-Konstante $n=3,5$), zur scheinbaren Länge einer Linie ($n=1,1$) und zur Helligkeit ($n=0,33$) – doppelt logarithmische Skalierung der Achsen.	52
4.5	Dunkeladaptionskurve einer konditionierten Taube.	54
4.6	Auflösungsvermögen des Tastsinns an verschiedenen Körperstellen.	55
5.1	Zählung der Braillepunkte im 6-Punkt-System.	62
5.2	Tastraum einer Erwachsenen Person.	66
5.3	Prozess der Erkenntnisgewinnung am Modell.	70
5.4	Modellklassifikation nach Kircher.	73
6.1	Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Farbe eines Sterns.	79
6.2	Hertzsprung-Russell-Diagramm – In der Form eines Leuchtkraft-Temperatur-Diagramms.	82
6.3	Idealisiertes Hertzsprung-Russell-Diagramm.	83
6.4	HRD des alten Kugelsternhaufens M 3.	84
6.5	HRD des jungen Sternhaufens M 44.	85

6.6	Modell I: Hauptreihensterne – Vorderansicht.	87
6.7	Skizze zur technischen Realisierung des Modells „Hauptreihensterne“.	88
6.8	Modell I: Hauptreihensterne – Rückwärtige Ansicht.	89
6.9	Vorlage zum HRD.	92
6.10	HRD als tastbare Darstellung.	93
6.11	Prinzip der Parallaxenmessung.	96
6.12	Seitenansicht des Modells zur räumlichen Verteilung der Sterne.	102
6.13	Ansicht scheinbaren Struktur des Sternbildes Kassiopeia, wie es für einen irdischen Beobachter zu sehen ist.	103
6.14	Vorlage zur tastbaren Darstellung zum Parallaxeneffekt.	106
6.15	Tastbare Darstellung zur Parallaxe.	106
6.16	Vorlage zur tastbaren Darstellung: Vergleich von Sternradien.	107
6.17	Tastbare Darstellung zum Vergleich von Sternradien.	108
6.18	Drei (idealtypische) bipolare Fleckengruppen unterschiedlicher Ausprägung – Solar Dynamics Observatory.	111
6.19	Schmetterlingsdiagramm – Gewonnen durch Auftragen des Breitengrades der Sonnenflecken gegen die Zeit.	113
6.20	Vertauschung der Polarität von Sonnenflecken, auf entgegengesetzten Hemisphären, im Zuge des Wechsels des Sonnenzyklus n zum folgenden Zyklus $n+1$	114
6.21	Aufbau aus Kühlkörper, Peltierelement und Magnet – Die im Modell verwendeten Kühlkörper sind deutlich größer.	117
6.22	Ansicht der geöffneten Kugel des Modells „Sonnenflecken“.	118
6.23	Schematische Darstellung zum Modell „Sonnenflecken“.	119
6.24	Kabelführung zum Sockel – Nahansicht.	120
6.25	Anordnung der Fleckengruppen und Sonnenflecken auf der Oberfläche des Modells.	121
6.26	Aufnahme zur Vorlage der tastbaren Darstellung: Sonnenfleck – Big Bear Solar Observatory.	124
6.27	Vorlage zur Detailabbildung des Einzelflecks.	125
6.28	Vorlage zur Übersichtsdarstellung der Sonne.	126
6.29	Festlegung von Himmelsrichtungen, Punkten und der Horizontebene in der scheinbaren Himmelskugel.	128
6.30	Bestimmung der Koordinaten eines Sterns im Horizontsystem.	128
6.31	Gesamtansicht des Messinstrumentes.	132
6.32	Zuordnung verschiedener Bewölkungsgrade und Tageszeiten zu den resultierenden Frequenzen.	134
6.33	Schaltplan des Winkelmessers.	135
6.34	Frequenz in Abhängigkeit der Abweichung von der optimalen Ausrichtung.	136
6.35	Vorlage zur tastbaren Darstellung: Tagbögen der Sonne im Jahresverlauf am 51. Breitengrad.	141
6.36	Tastbare Darstellung: Tagbögen der Sonne für den 51. Breitengrad zu den Extrempositionen im Juni und Dezember sowie einem Zwischenwert im März.	142

Abbildungsverzeichnis

6.37 Tiefziehmaschine mit angeschlossenem Staubsauger.	144
6.38 Tiefziehmaschine mit aufgelegter Folie und angehängten Gewichten.	145
6.39 Prägezange für Kunststoffprägeband – englischer Zeichensatz.	148
6.40 Schreibtafel und Griffel zum Stanzen von Brailleschrift in Pappe.	149
6.41 Nahansicht der tastbaren Skala des Winkelmessers.	150

Tabellenverzeichnis

1.1	Auswahl astronomischer Modelle und Medien.	13
3.1	Für die Lehrplananalyse herangezogene Lehrpläne.	33
3.2	Anzahl der Fundstellen nach Lehrplan und Inhaltsfeld.	37
3.3	Anzahl der Fundstellen nach Lehrplan und Inhaltsfeld nach der Komprimierung.	39
4.1	Auswahl von Stevens-Konstanten verschiedener physikalischer Reize.	53
4.2	Dichte der Wärme- und Kälterezeptoren pro cm^2 Hautoberfläche.	57
5.1	Beispiele zur Darstellung griechischer Buchstaben in Braille.	63
5.2	Ausgewählte Beispiele zur Umsetzung mathematischer Ausdrücke mittels Braille-Mathematikschrift.	64
5.3	Mustertabelle für einen Kriterienkatalog.	76
6.1	Harvard-Klassifikation mit Beispielen für Temperaturen und Farben der Sterne.	80
6.2	Leuchtkraftklassen.	80
6.3	Verweildauer auf der Hauptreihe für ausgewählte Spektralklassen und Sternmassen.	84
6.4	Ausführliche Materialliste zum Modell: „Hauptreihensterne“.	89
6.5	Kriterienkatalog für das Modell „Tastbare Hauptreihensterne“.	91
6.6	Die 10 Sterne mit der größten scheinbaren Helligkeit.	98
6.7	Hauptsterne des Sternbilds Kassiopeia geordnet nach gegenwärtiger Helligkeit.	100
6.8	Hauptsterne der Kassiopeia im Modell, geordnet nach der Entfernung vom Beobachter.	102
6.9	Ausführliche Materialliste zum Modell: Räumliches Sternbild.	104
6.10	Kriterienkatalog für das Modell „Räumliches Sternbild“.	104
6.11	Ausführliche Materialliste zum Modell: „Sonnenflecken“.	120
6.12	Kriterienkatalog für das Modell „Sonnenflecken“.	122
6.13	Ausführliche Materialliste zum Messgerät: Sonnennavigator.	136
6.14	Mess- und Referenzwerte zum Winkelmesser.	139
6.15	Kriterienkatalog für den Winkelmesser.	140
7.1	Auswertungsraster zum Modell „Tastbare Hauptreihensterne“.	181
7.2	Auswertungsraster zum Modell „Tastbares Sternbild“.	182
7.3	Auswertungsraster zum Modell „Sonnenflecken“.	183
7.4	Auswertungsraster zum Modell „Winkelmesser“.	183

A.1	Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (2009).	A 2
A.2	Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (1999).	A 7
A.3	Fundstellen im Lehrplan für Regelschulen des Landes Thüringen (1999).	A 11
A.4	Fundstellen im Lehrplan für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009).	A 14
A.5	Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003).	A 18
A.6	Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen (2004).	A 25
A.7	Fundstellen im Lehrplan für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004).	A 28
A.8	Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (2009).	A 32
A.9	Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (1999).	A 37
A.10	Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Regelschulen des Landes Thüringen (1999).	A 41
A.11	Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009).	A 44
A.12	Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003).	A 48
A.13	Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen (2004).	A 55
A.14	Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004).	A 58
A.15	Fundstellen zum Themenfeld Instrumente, Methoden und Beobachtungen.	A 63
A.16	Fundstellen zum Themenfeld Bewegungen und Jahreszeiten.	A 66
A.17	Fundstellen zum Themenfeld Bestandteile, Objekte und Modelle.	A 68
A.18	Fundstellen zum Themenfeld Strukturen und Anordnungen.	A 72
A.19	Fundstellen zum Themenfeld Entwicklung.	A 74
A.20	Fundstellen zum Themenfeld ohne Zuordnung.	A 75

A Fundstellennachweise zur strukturierten Inhaltsanalyse

A.1 Fundstellennachweise des ersten Materialdurchlaufs

Tabelle A.1: Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (2009).

Fundstelle	Inhalt	Seite
Instrumente, Methoden und Beobachtungen		
T.G09.M.1	astronomische Beobachtungen unter Anleitung vorbereiten, durchführen und protokollieren	8
T.G09.M.2	ausgewählte Himmelskörper beobachten, beschreiben und deren Bewegungen analysieren	8
T.G09.M.3	seine Beobachtungen darstellen, auswerten sowie daraus verschiedene Modelle entwickeln und diese durch weiterführende Beobachtungen oder auch Experimente prüfen	8
T.G09.M.4	durch wissenschaftshistorische und -theoretische Betrachtungen das Verhältnis von Experiment und Beobachtung zur Theorie an Beispielen belegen	8
T.G09.M.5	durch vergleichende Betrachtung elektromagnetischer Spektren auf physikalische und chemische Eigenschaften der Himmelskörper schließen	8
T.G09.M.6	die Grenzen und Gültigkeitsbedingungen ihm bekannter Naturgesetze benennen	9
T.G09.M.7	astronomische Beobachtungen auf der Grundlage geeigneter Literatur oder Sternkartensoftware vorbereiten, durchführen und protokollieren,	9
T.G09.M.8	in Abhängigkeit vom Beobachtungsziel die Beobachtungsgeräte begründet auswählen	9
T.G09.M.9	fotografische Aufnahmen (Strichspuren, Sternfelder, Planeten oder Mond) unter Nutzung elektronischer Medien und digitaler Technikanfertigen, bearbeiten und auswerten	9
T.G09.M.10	seine erworbenen astronomischen Kenntnisse unter anderem in Planetarien und Sternwarten praktisch anwenden	9
T.G09.M.11	die Bedeutung der Entfernungsmessung sowohl aus gesellschaftlicher als auch wissenschaftlicher Sicht an Hand historischer und aktueller Beispiele erklären	10
T.G09.M.12	die gebräuchlichen Entfernungsmesser in ihrer Funktion als auch ihrer Anwendung erklären,	10
T.G09.M.13	die Echoortung in Biologie (z. B. Fledermaus), Technik (z. B. Radar) und Astronomie (z. B. Magellan-Sonde) beschreiben und erklären	10
T.G09.M.14	die historische Entwicklung und Funktion von Messgeräten zur Positionsbestimmung an ausgewählten Beispielen beschreiben und erklären	10
T.G09.M.15	die historische Bedeutung der Merkur- und Venusdurchgänge für Entfernungsmessungen im Sonnensystem einordnen und Entfernungen berechnen,	11
T.G09.M.16	die Methode der Signallaufzeitmessungen erklären und betreffende Gleichungen interpretieren	11
T.G09.M.17	verschiedene Methoden zur Entfernungsbestimmung erklären und anwenden: - Parallaxenmessungen (auch mit Hilfe einer zeichnerischen Darstellung) - photometrische Entfernungsmessung - Auswertung der Sternstrahlung / absolute und scheinbare Helligkeit von Sternen - spektroskopische Entfernungsbestimmung (Hubble-Gesetz für kleine Rotverschiebungen),	11

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
T.G09.M.18	verschiedene Standardkerzen (Cepheiden, Supernovae Typ I) zum Aufbau einer Entfernungseitereinsätzen.	11
T.G09.M.19	Bau und Berechnung von historischen Zeitmessern, um verschiedene Methoden und Verfahren der Zeitbestimmung zu vergleichen und deren Genauigkeit abzuschätzen	11
T.G09.M.20	Planung, Durchführung und Auswertung eines trigonometrischen Verfahrens zur Entfernungsbestimmung (z. B. durch den Bau eines Winkelmessgerätes wie den Jacobsstab)	11
T.G09.M.21	Berechnung astronomischer Entfernungen mit Originaldaten von Großteleskopen und Satelliten sowie Interpretation der Ergebnisse	11
T.G09.M.22	den Aufbau von astronomischen Beobachtungsgeräten beschreiben und ihre Funktionsweise erklären	12
T.G09.M.23	Merkmale, Einsatzmöglichkeiten und Abbildungsfehler von Refraktor und Reflektor vergleichen	12
T.G09.M.24	selbstständig einen Überblick über die Entwicklung der Beobachtungstechnik erstellen und regionale Bezüge einbinden	12
T.G09.M.25	den Zusammenhang zwischen dem Entwicklungsstand der Technik und der Veränderung der Vorstellung von Mikrokosmos und Makrokosmos erläutern	12
T.G09.M.26	astronomische Beobachtungen der galileischen Monde, der Venusphasen sowie der Milchstraße und der Andromedagalaxie und Erstellen eigener Modelle sowie deren Vergleich mit den Vorstellungen des kopernikanischen Weltbildes	13
T.G09.M.27	Analyse von Abbildungsfehlern verschiedener optischer Beobachtungsgeräte und Entwicklung von Kriterien für deren sachgerechten Einsatz	13
Summe		27
Anteil am Lehrplan		42 %
Bewegungen und Jahreszeiten		
T.G09.B.1	die Inhalte des Gravitationsgesetzes, der keplerschen Gesetze und ausgewählter Erhaltungssätze erläutern und anwenden, themenbezogene Aufgaben lösen und die Ergebnisse interpretieren,	8
T.G09.B.2	die Bedeutung der Zeitmessung für die Menschen sowie die Notwendigkeit der Entstehung des Kalenders erklären	10
T.G09.B.3	den Zusammenhang zwischen den Zeiteinheiten Tag, Monat, Jahr und den Bewegungsvorgängen im Sonnensystem herstellen	10

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
T.G09.B.4	den Unterschied zwischen Sterntag und Sonntag, sowie siderischem und synodischem Monat beschreiben und mit Hilfe einer zeichnerischen Darstellung erklären	10
T.G09.B.5	Kalender aus verschiedenen Epochen und Kulturkreisen vergleichen (z. B. Mondkalender, Römischer Kalender, Gregorianischer Kalender) und die Notwendigkeit von Schaltregeln erklären	10
Summe		5
Anteil am Lehrplan		8%
Bestandteile, Objekte und Modelle		
T.G09.O.1	für bekannte Modelle Gültigkeitsbedingungen diskutieren	8
T.G09.O.2	durch Beobachtung und Vergleich von Sternfarben, bis hin zu Spektren auf die Eigenschaften der Himmelskörper schließen	9
T.G09.O.3	aus dem Vergleich verschiedener Sternspektren die Sterne klassifizieren und deren Aufbau ableiten	10
T.G09.O.4	astronomische Beobachtungen der galileischen Monde, der Venusphasen sowie der Milchstraße und der Andromedagalaxie und Erstellen eigener Modelle sowie deren Vergleich mit den Vorstellungen des kopernikanischen Weltbildes	13
T.G09.O.5	die Lebensbedingungen auf der Erde mit den Bedingungen auf anderen Himmelskörpern vergleichen und die Möglichkeiten von verschiedenen Lebensformen diskutieren	13
Summe		5
Anteil am Lehrplan		8%
Strukturen und Anordnungen		
T.G09.S.1	verschiedene Vorstellungen vom Aufbau, der Struktur und der Entwicklung des Universums beschreiben	12
T.G09.S.2	Strukturen des Mikrokosmos und Makrokosmos an ausgewählten Beispielen vergleichen,	12
Summe		2
Anteil am Lehrplan		3%

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
Entwicklung		
T.G09.E.1	die Lebenszyklen ausgewählter Sterne beschreiben sowie mit Hilfe des Herzsprung-Russell-Diagramms darstellen und erklären	10
Summe		1
Anteil am Lehrplan		2%
Ohne Zuordnung		
T.G09.oZ.1	die Bedeutung astronomischer Forschung für die Entwicklung philosophischer Modelle erläutern.	9
T.G09.oZ.2	an ausgewählten Beispielen historische Forschungsergebnisse nachvollziehen und deren Bedeutung für den Wissenschaftsfortschritt einordnen	9
T.G09.oZ.3	das dynamische Wechselspiel zwischen Erkenntnisstand und Weiterentwicklung von Forschung und Technik erläutern	9
T.G09.oZ.4	Lebenszyklen aus verschiedenen Bereichen mit Hilfe von historischen, biologischen, chemischen und weiteren charakteristischen Merkmalen beschreiben und vergleichen (Analogiebetrachtungen)	10
T.G09.oZ.5	die Begriffe Makrokosmos und Mikrokosmos mit Hilfe ausgewählter Beispiele erläutern	12
T.G09.oZ.6	ausgewählte Weltbilder beschreiben und unter Berücksichtigung philosophischer und religiöser Aspekte diskutieren sowie in den Kontext historischer Zusammenhänge einordnen,	12
T.G09.oZ.7	das kopernikanische Prinzip erläutern	12
T.G09.oZ.8	einen systematischen oder historischen Überblick über Geräte und Verfahren zur Erforschung des Mikrokosmos erstellen	12
T.G09.oZ.9	den Aufbau und die Wirkungsweise von Mikroskopen beschreiben und erklären	12
T.G09.oZ.10	ausgehend von Atommodellen die Vielfalt der Elementarteilchen in einer strukturierten Übersicht anschaulich darstellen	12
T.G09.oZ.11	die Schwierigkeiten bei der Suche nach einer Weltformel diskutieren	12
T.G09.oZ.12	die wesentlichen Voraussetzungen für die Entstehung und Entwicklung des Lebens auf der Erde beschreiben und begründen	13
T.G09.oZ.13	Darstellungen außerirdischer Lebensformen in Kunst und Literatur unter Berücksichtigung der Bedingungen auf der Erde und anderer Himmelskörper interpretieren,	13

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
T.G09.oZ.14	die Verantwortung des Menschen für die Erhaltung des Lebens auf der Erde an konkreten Beispielen erörtern	13
T.G09.oZ.15	Pionierleistungen verschiedener Nationen für die Entwicklung der Raumfahrt einordnen,	13
T.G09.oZ.16	die Notwendigkeit der internationalen Zusammenarbeit begründen und mit aktuellen Raumfahrtprojekten belegen,	13
T.G09.oZ.17	verschiedene Arten von Raketenantrieben beschreiben und deren prinzipielle Funktionsweise erklären,	14
T.G09.oZ.18	sich mit Ideen zur Besiedlung des Weltalls auseinandersetzen und ihre Möglichkeiten und Grenzen aufzeigen	14
T.G09.oZ.19	Möglichkeiten der Suche nach außerirdischen Zivilisationen diskutieren und die Wahrscheinlichkeit der Kontaktaufnahme abschätzen	14
T.G09.oZ.20	aktuelle globale Probleme und mögliche Ursachen benennen,	14
T.G09.oZ.21	konkrete Folgen des Klimawandels für sein Umfeld einschätzen und durch Beobachtungen belegen,	14
T.G09.oZ.22	die Endlichkeit nicht erneuerbarer energetischer Ressourcen und aktuelle Entwicklungen der Nutzung regenerativer Energien diskutieren, angestrebte Lösungen werten und mögliche Konsequenzen ableiten.	14
T.G09.oZ.23	Zusammenstellung von wichtigen Informationen über die Menschheit für eine mögliche Botschaft an außerirdische Zivilisationen	14
T.G09.oZ.24	Analyse von regionalen Umweltproblemen sowie Entwicklung und Bewertung von Lösungsvorschlägen	14
Summe		24
Anteil am Lehrplan		38%

Tabelle A.2: Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (1999).

Fundstelle	Inhalt	Seite
Instrumente, Methoden und Beobachtungen		
T.G99.M.1	Gegenstandsbestimmung der Astronomie	13
T.G99.M.2	Verhältnis von Beobachtung und Theorie bei der Erforschung astronomischer Sachverhalte	13
T.G99.M.3	Arbeitsgebiete: Klassische Astronomie, Astrophysik, Kosmologie, Kosmologie u. a.	13
T.G99.M.4	zur historischen Entwicklung der Astronomie	13
T.G99.M.5	Vorbereitung auf eigene Beobachtungen	13
T.G99.M.6	Strahlungsarten	14
T.G99.M.7	Durchlässigkeit der Erdatmosphäre, optisches Fenster und Radiofenster; Veränderung der Erdatmosphäre durch menschliche Einwirkungen	14
T.G99.M.8	historische und moderne Beobachtungsgeräte und -methoden	14
T.G99.M.9	Sternbilder als Hilfe zur Groborientierung	15
T.G99.M.10	scheinbare Himmelskugel, (mathematischer) Horizont, Zenit, Nadir, Meridian, Himmelsnordpol, Himmelsäquator	15
T.G99.M.11	Horizontsystem	15
T.G99.M.12	Entfernungsbestimmung	23
Summe		12
Anteil am Lehrplan		21 %
Bewegungen und Jahreszeiten		
T.G99.B.1	Zeitbestimmung, Kalender, Orientierung	13
T.G99.B.2	Rotation der Erde; der Tag; scheinbare tägliche Bewegung der Himmelskörper (Aufgang, Kulmination, Untergang, Zirkumpolarsterne); Sterntag und Sonnentag	15
T.G99.B.3	Umlauf der Erde um die Sonne (Revolution)	16
T.G99.B.4	das Jahr; Entstehung der Jahreszeiten als Folge der Neigung der Erdachse	16
T.G99.B.5	Sternbilder zu verschiedenen Jahreszeiten	16
T.G99.B.6	scheinbarer Jahreslauf der Sonne durch die Sternbilder der Ekliptik	16
T.G99.B.7	scheinbare und wahre Bewegung des Mondes	17
T.G99.B.8	Umlauf des Mondes um die Erde; gebundene Rotation; siderischer und synodischer Monat; Mondphasen	17

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
T.G99.B.9	Finsternisse; Arten von Finsternissen; Knoten der Mondbahn	17
T.G99.B.10	lunar-terrestrische Beziehungen (Gezeitenwirkung)	17
T.G99.B.11	scheinbare Bewegungen der Planeten	18
T.G99.B.12	wahre Bewegungen der Planeten um die Sonne	18
T.G99.B.13	keplersche Gesetze; Gravitationsgesetz	18
T.G99.B.14	Sichtbarkeit der Planeten	18
	Summe	14
	Anteil am Lehrplan	24 %
Bestandteile, Objekte und Modelle		
T.G99.O.1	Radius, Masse, Fallbeschleunigung (des Mondes)	17
T.G99.O.2	fehlende Atmosphäre; Folgen der fehlenden Atmosphäre	17
T.G99.O.3	Oberflächenformen des Mondes	17
T.G99.O.4	Einteilung der Planeten	19
T.G99.O.5	Oberflächen und Atmosphären der Planeten	19
T.G99.O.6	Satelliten anderer Planeten	20
T.G99.O.7	Planetoiden	20
T.G99.O.8	Meteorite; Kometen	20
T.G99.O.9	Gas und Staub im Sonnensystem	20
T.G99.O.10	Strahlungen und Felder im Sonnensystem	20
T.G99.O.11	Künstliche Himmelskörper	20
T.G99.O.12	Die Sonne als Stern	21
T.G99.O.13	Aufbau der Sonne vom Zentralgebiet zur Korona	21
T.G99.O.14	solar-terrestrische Beziehungen	21
T.G99.O.15	Sonnenaktivität; Erscheinungen der Sonnenaktivität	21
T.G99.O.16	Zustandsgrößen der Sonne: Oberflächentemperatur, Radius, Masse, Leuchtkraft, mittlere Dichte, Rotationsdauer, differentielle Rotation, chemische Zusammensetzung	22
T.G99.O.17	Energiefreisetzung durch Kernfusion	22
T.G99.O.18	Energietransport durch Strahlung und Konvektion	22
T.G99.O.19	absolute Helligkeit als Maß für die Leuchtkraft	23
T.G99.O.20	wichtige Zustandsgrößen der Sterne; wichtige Zusammenhänge zwischen Zustandsgrößen der Sterne	23

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
T.G99.O.21	Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) als Zustandsdiagramm	23
Summe		21
Anteil am Lehrplan		36 %
Strukturen und Anordnungen		
T.G99.S.1	Planeten und ihre räumliche Anordnung	18
T.G99.S.2	scheinbare Helligkeit in Abhängigkeit von Leuchtkraft und Entfernung	23
T.G99.S.3	Das Milchstraßensystem (Galaxis): Erscheinung, Struktur, Objekte, Rotation; Einordnen des Sonnensystems	25
Summe		3
Anteil am Lehrplan		5 %
Entwicklung		
T.G99.E.1	wesentliche Bedingungen und Prozesse bei der Sternentstehung und bei der Planetenentstehung	24
T.G99.E.2	Sternentwicklung	24
T.G99.E.3	mögliche Spätstadien der Sternentwicklung: weiße Zwerge, Neutronensterne (Supernovae), schwarze Löcher	24
T.G99.E.4	HRD als Entwicklungsdiagramm	24
T.G99.E.5	Entwicklung des Universums	25
Summe		5
Anteil am Lehrplan		9 %
Ohne Zuordnung		
T.G99.oZ.1	Astronomie in Thüringen	13
T.G99.oZ.2	Möglichkeiten der Existenz von Leben auf den Planeten	19
T.G99.oZ.3	Wandel der Vorstellungen vom Sonnensystem; Weltbilder	19

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
	Summe	3
	Anteil am Lehrplan	5 %

Tabelle A.3: Fundstellen im Lehrplan für Regelschulen des Landes Thüringen (1999).

Fundstelle	Inhalt	Seite
Instrumente, Methoden und Beobachtungen		
T.R.M.1	Gegenstandsbestimmung der Astronomie	13
T.R.M.2	Arbeitsgebiete: Klassische Astronomie, Astrophysik, Kosmogonie, Kosmologie u. a.	13
T.R.M.3	zur historischen Entwicklung der Astronomie; Astronomie in Thüringen	13
T.R.M.4	Vorbereitung auf eigene astronomische Beobachtungen	13
T.R.M.5	Strahlungsarten	14
T.R.M.6	Durchlässigkeit der Erdatmosphäre und deren Veränderung durch menschliche Einwirkung; optisches Fenster und Radiofenster	14
T.R.M.7	historische und moderne Beobachtungsgeräte und -methoden	14
T.R.M.8	Sternbilder als Hilfe zur Groborientierung	15
T.R.M.9	scheinbare Himmelskugel, (mathematischer) Horizont, Zenit, Meridian, Himmelsnordpol, Himmelsäquator	15
T.R.M.10	Horizontsystem	15
	Summe	10
	Anteil am Lehrplan	20%
Bewegungen und Jahreszeiten		
T.R.B.1	Zeitbestimmung, Kalender, Orientierung	13
T.R.B.2	Rotation der Erde; der Tag; scheinbare tägliche Bewegung der Himmelskörper (Aufgang, Kulmination, Untergang, Zirkumpolarsterne)	15
T.R.B.3	Umlauf der Erde um die Sonne; das Jahr	15
T.R.B.4	Sternbilder zu verschiedenen Jahreszeiten	15
T.R.B.5	scheinbarer Jahreslauf der Sonne durch die Sternbilder der Ekliptik	15
T.R.B.6	scheinbare und wahre Bewegung des Mondes	16
T.R.B.7	Umlauf des Mondes um die Erde; gebundene Rotation; synodischer Monat; Mondphasen	16
T.R.B.8	Finsternisse; Arten von Finsternissen	16
T.R.B.9	lunar-terrestrische Beziehungen (Gezeitenwirkung)	16
T.R.B.10	scheinbare Bewegungen der Planeten	17
T.R.B.11	wahre Bewegungen der Planeten um die Sonne	17

Fundstellen im Lehrplan für Regelschulen des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
T.R.B.12	keplersche Gesetze; Gravitationsgesetz	17
T.R.B.13	Sichtbarkeit der Planeten	17
	Summe	13
	Anteil am Lehrplan	26%
Bestandteile, Objekte und Modelle		
T.R.O.1	Radius, Masse, Fallbeschleunigung (des Mondes)	16
T.R.O.2	fehlende Atmosphäre; Folgen der fehlenden Atmosphäre	16
T.R.O.3	Oberflächenformen des Mondes	16
T.R.O.4	Einteilung der Planeten	17
T.R.O.5	Oberflächen und Atmosphären der Planeten	18
T.R.O.6	Satelliten anderer Planeten	19
T.R.O.7	Planetoiden	19
T.R.O.8	Meteorite; Kometen	19
T.R.O.9	Gas und Staub im Sonnensystem	19
T.R.O.10	Strahlungen und Felder im Sonnensystem	19
T.R.O.11	Künstliche Himmelskörper	19
T.R.O.12	Die Sonne als Stern	20
T.R.O.13	Aufbau der Sonne vom Zentralgebiet zur Korona	20
T.R.O.14	solar-terrestrische Beziehungen	20
T.R.O.15	Erscheinungen der Sonnenaktivität	20
T.R.O.16	Zustandsgrößen der Sonne: Oberflächentemperatur, Radius, Masse, Leuchtkraft, mittlere Dichte, Rotationsdauer, chemische Zusammensetzung	21
T.R.O.17	Energiefreisetzung; Energietransport	21
T.R.O.18	wichtige Zustandsgrößen der Sterne und wichtige Zusammenhänge zwischen Zustandsgrößen der Sterne	22
	Summe	18
	Anteil am Lehrplan	36%

Fundstellen im Lehrplan für Regelschulen des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
Strukturen und Anordnungen		
T.R.S.1	Planeten und ihre räumliche Anordnung	17
T.R.S.2	scheinbare Helligkeit in Abhängigkeit von Leuchtkraft und Entfernung	22
T.R.S.3	das Milchstraßensystem (Galaxis): Erscheinung, Struktur, Objekte, Rotation; Einordnen des Sonnensystems	23
T.R.S.4	andere Galaxien	23
	Summe	4
	Anteil am Lehrplan	8%
ohne Zuordnung		
T.R.oZ.1	Möglichkeit der Existenz von Leben auf den Planeten	18
T.R.oZ.2	Wandel der Vorstellungen vom Sonnensystem	18
	Summe	2
	Anteil am Lehrplan	4%
	Anzahl der Fundstellen	50

Tabelle A.4: Fundstellen im Lehrplan für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009).

Fundstelle	Inhalt	Seite
Instrumente, Methoden und Beobachtungen		
SA.R.M.1	das Modell der scheinbaren Himmelskugel erläutern	13
SA.R.M.2	Alltagsphänomene wahrnehmen, Hypothesen aufstellen	13
SA.R.M.3	eine Beobachtung des Sternhimmels durchführen und Sternbilder erkennen	13
SA.R.M.4	Modell der scheinbaren Himmelskugel mit Horizontsystem	13
SA.R.M.5	den Verlauf und die Ergebnisse einer Mondbeobachtung sach- und adressatengerecht präsentieren	14
SA.R.M.6	Beobachtungsbedingungen für Kleinkörper sowie Gefahren durch ihre Bewegungen ableiten	14
SA.R.M.7	Beobachtungsgeräte einteilen	15
SA.R.M.8	ausgewählte Gegenstände astronomischer Forschung erläutern	15
SA.R.M.9	Informationen zu Methoden und Ergebnissen astronomischer Forschung sowie deren Nutzung sammeln und aufbereiten	15
SA.R.M.10	den Gegenstand der Astronomie und der Astrologie unterscheiden	15
SA.R.M.11	Beobachtungsgeräte: optische und nichtoptische, historische und moderne, erd- und weltraumgebundene	15
SA.R.M.12	Himmelskarte von Nebra, Sonnenobservatorium Goseck	15
Summe		12
Anteil am Lehrplan		18%
Bewegungen und Jahreszeiten		
SA.R.B.1	beobachtbare Alltagsphänomene als Folge von Rotation und Revolution erklären	13
SA.R.B.2	ausgewählte Sterne und Sternbilder an der Sternkarte zeigen, entsprechenden Jahreszeiten zuordnen und als Orientierungshilfe nutzen	13
SA.R.B.3	unter Verwendung des Horizontsystems mit der drehbaren Sternkarte die Bewegung von Sternen beschreiben	13
SA.R.B.4	den Umgang mit der Sternkarte zur Sternortangabe beschreiben	13
SA.R.B.5	Unterschiede zwischen wahren und scheinbaren Bewegungen von Erde und anderen Himmelskörpern	13
SA.R.B.6	drehbare Sternkarte: Sternortangabe, Auf- und Untergang, Kulmination	13
SA.R.B.7	typische Sommer-, Winter- und zirkumpolare Sternbilder	13

Fundstellen im Lehrplan für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.R.B.8	die Bewegung der Objekte im Sonnensystem erläutern, mit Hilfe der Gravitation erklären und deren Auswirkungen exemplarisch nennen	14
SA.R.B.9	eine Beobachtung zu Phasen und Bewegungen des Mondes planen, mit bloßem Auge durchführen, protokollieren und auswerten	14
SA.R.B.10	Kepler'sche Gesetze	14
SA.R.B.11	Sonnen- und Mondfinsternis, Mondphasen	14
	Summe	11
	Anteil am Lehrplan	16%
Bestandteile, Objekte und Modelle		
SA.R.O.1	wesentliche Eigenschaften ausgewählter Planeten und des Mondes mit denen der Erde vergleichen	14
SA.R.O.2	ausgewählte Himmelskörper entsprechend ihren Eigenschaften den Gruppen von Objekten zuordnen; Planeten in erdähnlich und jupiterähnlich klassifizieren	14
SA.R.O.3	Eigenschaften der Objekte im Vergleich: Masse, Radius, mittlere Dichte, Oberflächenstruktur, Atmosphäre	14
SA.R.O.4	den Aufbau der Sonne beschreiben	16
SA.R.O.5	den Prozess der Energiefreisetzung durch Kernfusion vereinfacht beschreiben	16
SA.R.O.6	Objekte, Prozesse und Entwicklungen mit Hilfe von Modellen veranschaulichen	16
SA.R.O.7	Zusammenhänge zwischen Sonnenaktivität und Erscheinungen auf der Erde herstellen	16
SA.R.O.8	Zusammenhänge zwischen Leuchtkraft, scheinbarer Helligkeit und Entfernung sowie zwischen Oberflächentemperatur und Farbe von Sternen herstellen	16
SA.R.O.9	den Aufbau der Sonne und die Vorgänge in ihr modellhaft darstellen	16
SA.R.O.10	das Hertzsprung-Russell-Diagramm interpretieren	16
SA.R.O.11	Aufbau der Sonne und Sonnenaktivität	16
SA.R.O.12	Bedeutung der Sonne für das Leben auf der Erde	16
SA.R.O.13	Energiefreisetzung durch Kernfusion	16
SA.R.O.14	Hertzsprung-Russell-Diagramm	16
SA.R.O.15	naturwissenschaftliche Modelle verwenden, Modell und Realität unterscheiden	14
	Summe	15

Fundstellen im Lehrplan für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
Anteil am Lehrplan		
		22%
Strukturen und Anordnungen		
SA.R.S.1	den Aufbau des Sonnensystems beschreiben	14
SA.R.S.2	den Aufbau des Sonnensystems mit Hilfe von Zeichnungen oder Funktionsmodellen darstellen	14
SA.R.S.3	Aufbau des Sonnensystems aus Sonne, Planeten, Monden und Kleinkörpern	14
SA.R.S.4	den Platz der Sonne im Milchstraßensystem beschreiben	16
SA.R.S.5	die Entfernung von Sternen mit Hilfe der Parallaxe berechnen	16
SA.R.S.6	Zusammenhänge zwischen Leuchtkraft, scheinbarer Helligkeit und Entfernung sowie zwischen Oberflächentemperatur und Farbe von Sternen herstellen	16
SA.R.S.7	astronomische Entfernungseinheiten	16
SA.R.S.8	im Überblick: Aufbau der Milchstraße, Lebenslauf von Sternen, Urknalltheorie	16
Summe		8
Anteil am Lehrplan		12%
Entwicklung		
SA.R.E.1	den Lebenslauf von Sternen in Abhängigkeit von ihrer Masse beschreiben	16
SA.R.E.2	die Urknalltheorie als Grundlage des modernen Weltbildes vereinfacht darstellen	16
SA.R.E.3	Simulation als visuelle Darstellung vergangener, gegenwärtiger und möglicher zukünftiger Prozesse - astronomische Entfernungseinheiten	16
SA.R.E.4	im Überblick: Aufbau der Milchstraße, Lebenslauf von Sternen, Urknalltheorie	16
SA.R.E.5	im Überblick: Aufbau der Milchstraße, Lebenslauf von Sternen, Urknalltheorie	16
Summe		5
Anteil am Lehrplan		7%
ohne Zuordnung		
SA.R.oZ.1	Gültigkeit von Hypothesen diskutieren	13
SA.R.oZ.2	die Bedeutung von Alltagsphänomenen für das Leben bewerten	13

Fundstellen im Lehrplan für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.R.oZ.3	Bedingungen für irdisches Leben auf anderen Objekten des Sonnensystems diskutieren	14
SA.R.oZ.4	die Besonderheit des Planeten Erde als Lebensraum im Sonnensystem werten	14
SA.R.oZ.5	verschiedene Weltbilder beschreiben	15
SA.R.oZ.6	besondere astronomische Ereignisse verfolgen	15
SA.R.oZ.7	Ergebnisse astronomischer Forschung sach- und adressatengerecht präsentieren	15
SA.R.oZ.8	durch den Besuch eines außerschulischen Lernortes Informationen gewinnen	15
SA.R.oZ.9	Weltbilder vor ihrem historischen Hintergrund bewerten und mit dem modernen Weltbild vergleichen	15
SA.R.oZ.10	den Nutzen der Raumfahrt anhand ausgewählter Kriterien bewerten	15
SA.R.oZ.11	Weltbilder: Altertum, geozentrisches und heliozentrisches Weltbild, modernes Weltbild	15
SA.R.oZ.12	weltraumgestützte Navigation und Kommunikation	15
SA.R.oZ.13	aktuelle Ereignisse in Astronomie und Raumfahrt	15
SA.R.oZ.14	die Bedeutung der Sonne für das Leben auf der Erde auch unter Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit erläutern	16
SA.R.oZ.15	den Blick in den Weltraum als Blick in die Vergangenheit interpretieren	16
SA.R.oZ.16	Nachhaltig mit Ressourcen umgehen	16
	Summe	16
	Anteil am Lehrplan	24%
	Anzahl der Fundstellen	67

Tabelle A.5: Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003).

Fundstelle	Inhalt	Seite
Instrumente, Methoden und Beobachtungen		
SA.G.M.1	Gegenstand der Astronomie und Abgrenzung zur Astrologie	21
SA.G.M.2	Arbeitsmethoden der Astronomen	21
SA.G.M.3	Astronomie und Weltbild	21
SA.G.M.4	Scheinbare Himmelskugel	22
SA.G.M.5	Planetenerforschung mit Hilfe von Satelliten und Raumsonden	28
SA.G.M.6	Optisch nicht sichtbare Galaxien	31
SA.G.M.7	Erkunden von Beobachtungsmöglichkeiten mit und ohne Hilfsmittel	35
SA.G.M.8	direkte und mittelbare Beobachtungsmöglichkeiten	37
SA.G.M.9	Methoden der Planetenforschung	39
SA.G.M.10	Winkelmessgerät zum Messen von Höhe und Azimut	43
SA.G.M.11	Schattenstab zur Ermittlung der Mittagszeit (Gnomon)	43
SA.G.M.12	Fernrohr als Beobachtungsinstrument:	43
SA.G.M.13	Strahlung als Informationsquelle	43
SA.G.M.14	Äquatorsysteme und Horizontsystem	43
SA.G.M.15	Frühe Astronomie	46
SA.G.M.16	Klassische Astronomie	46
SA.G.M.17	Astrophysik	46
SA.G.M.18	Beobachtungstechnik im Überblick	52
SA.G.M.19	Aufbau, Wirkungsweise und Eigenschaften von Beobachtungshilfsmitteln	52
SA.G.M.20	Himmelsbeobachtung	52
SA.G.M.21	Spektroskopie als Analysemethode	52
SA.G.M.22	Koordinatensysteme	53
SA.G.M.23	Möglichkeiten der Bestimmung einzelner Größen (Zustandsgrößen von Sternen)	55
Summe		23
Anteil am Lehrplan		14%
Bewegungen und Jahreszeiten		
SA.G.B.1	Rotation und Revolution	22

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.G.B.2	Sterne und Sternbilder als Orientierungsmittel	22
SA.G.B.3	Sternortangabe mit Hilfe von Koordinaten	22
SA.G.B.4	Bewegungen der Planeten und ihre Gesetze	23
SA.G.B.5	Ermond (Bewegungen, gebundene Rotation; Phasen; Finsternisse)	24
SA.G.B.6	Planetenebeobachtung von der Erde	28
SA.G.B.7	unser Tag als mittlerer Sonnentag	36
SA.G.B.8	Woche und Monat	36
SA.G.B.9	unser Jahr als tropisches Jahr	36
SA.G.B.10	unser Kalender als Sonnenkalender	36
SA.G.B.11	wahre und scheinbare Bewegungen des Erdmondes	40
SA.G.B.12	der Mond im System Sonne-Erde-Mond	40
SA.G.B.13	Ephemeriden von Sonne, Mond und Planeten	43
SA.G.B.14	Einteilung der Sphäre in Sternbilder und deren Sichtbarkeit in Abhängigkeit von den Jahreszeiten	43
SA.G.B.15	Orientierung am Sternhimmel	53
SA.G.B.16	Erdrotation	53
SA.G.B.17	scheinbare Bewegung der Sterne	53
SA.G.B.18	Himmelskörper im Gravitationsfeld eines Zentralkörpers	53
SA.G.B.19	Sichtbarkeitsbedingungen für Körper im Sonnensystem	53
SA.G.B.20	astronomische Zeitrechnung und Messung	53
SA.G.B.21	Bewegung der Sterne (innerhalb der Galaxie; Dopplereffekt)	55
SA.G.B.22	physikalische Parameter (unserer Galaxis, Raumbewegung der Sonne, Rotationskurven)	58
Summe		22
Anteil am Lehrplan		14%
Bestandteile, Objekte und Modelle		
SA.G.O.1	Erd- und jupiterähnliche Planeten Venus, Mars, Jupiter, Saturn Verwendung vielfältiger Anschauungsmaterialien, z. B. Fotos und Videosequenzen Zuordnung grundlegender Eigenschaften	23
SA.G.O.2	Ermond (Aufbau und Oberfläche; Mondbeobachtungen)	24
SA.G.O.3	Kleinkörper des Sonnensystems	24
SA.G.O.4	Ausblick auf weitere Planeten außerhalb unseres Sonnensystems	24

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.G.O.5	der Aufbau der Sonne	25
SA.G.O.6	Erzeugung und Transport der Energie im Sonneninneren	25
SA.G.O.7	Erscheinungen der Sonnenaktivität	25
SA.G.O.8	die Sonne als Energiespender	25
SA.G.O.9	ökologische Wirkungen der Sonnenstrahlung: Erdatmosphäre als Schutzschild (Ozonschicht, Treibhauseffekt, Schutz vor Strahlung)	25
SA.G.O.10	Magnetfeld der Erde als Schutzschild (Polarlichter)	25
SA.G.O.11	Sternspektren und ihre Interpretation	26
SA.G.O.12	Zustandsgrößen der Sterne (Masse, Radius, Temperatur und Leuchtkraft)	26
SA.G.O.13	Planeteneobachtung von der Erde (Bestimmung von Masse und Volumen)	28
SA.G.O.14	Gesamtbetrachtung unseres Planetensystems	28
SA.G.O.15	Monde der Planeten unseres Sonnensystems	29
SA.G.O.16	Marsmonde	29
SA.G.O.17	Vergleich der Marsmonde mit Asteroiden	29
SA.G.O.18	Galilei'sche Monde des Jupiters (Io, Europa, Ganymed, Callisto)	29
SA.G.O.19	Vergleichen ausgewählter Monde anderer Planeten mit dem Erdmond	29
SA.G.O.20	Überblick über die Kleinkörper	30
SA.G.O.21	Eigenschaften der einzelnen Kleinkörper	30
SA.G.O.22	Naturscheinungen	30
SA.G.O.23	mögliche Gefahren für Erde und Raumfahrt	30
SA.G.O.24	Quasare als Formen der am weitesten entfernten Objekte	31
SA.G.O.25	Inhaltsschwerpunkt: Sonne	33
SA.G.O.26	Inhaltsschwerpunkt: Planeten und Erdmond	33
SA.G.O.27	Inhaltsschwerpunkt: Sterne	33
SA.G.O.28	Planetenoberfläche	39
SA.G.O.29	Atmosphären	39
SA.G.O.30	Satellitensysteme	39
SA.G.O.31	Magnetfelder	39
SA.G.O.32	Vergleich Erde ? Mond	40
SA.G.O.33	Monde im Sonnensystem	40
SA.G.O.34	Überblick über die Kleinkörper	41
SA.G.O.35	Eigenschaften der Kleinkörper	41

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.G.O.36	Naturscheinungen	41
SA.G.O.37	mögliche Gefahren für Planeten, Erde und Raumfahrt	41
SA.G.O.38	Erzeugung und Transport der Energie im Sonneninneren	44
SA.G.O.39	Sonnenaktivität	44
SA.G.O.40	Solarkonstante	44
SA.G.O.41	Hertzsprung-Russell-Diagramm als wichtigstes Zustandsdiagramm der Sterne	44
SA.G.O.42	Spektrum als Visitenkarte der Sonne, Fraunhofer'sche Linien	44
SA.G.O.43	Aufbau (der Sonne)	54
SA.G.O.44	Energieerzeugung	54
SA.G.O.45	Energietransport	54
SA.G.O.46	Abstrahlung der Energie	54
SA.G.O.47	Sonnenaktivität	54
SA.G.O.48	Zustandsgrößen der Sterne	55
SA.G.O.49	Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen	55
SA.G.O.50	Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)	55
SA.G.O.51	Doppelsterne	55
Summe		51
Anteil am Lehrplan		31%
Strukturen und Anordnungen		
SA.G.S.1	Aufbau des Sonnensystems	23
SA.G.S.2	Sternentfernungen	26
SA.G.S.3	Aufbau des Milchstraßensystems	27
SA.G.S.4	Extragalaktische Sternsysteme	27
SA.G.S.5	Problem der Veranschaulichung kosmischer Großstrukturen	27
SA.G.S.6	Gesamtbetrachtung unseres Planetensystems	28
SA.G.S.7	Aufbau einer Galaxie und ihr Rotationsverhalten	31
SA.G.S.8	Einteilung nach der Hubble-Klassifikation in drei Grundarten	31
SA.G.S.9	Wechselwirkende Galaxien	31

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.G.S.10	Lokale Gruppe, Galaxienhaufen und Superhaufen als Formen der Materieansammlung im Universum	31
SA.G.S.11	Galaxien als ?Bausteine? des Weltalls	45
SA.G.S.12	Lokale Gruppe und Galaxienhaufen	45
SA.G.S.13	Webenstruktur als größte Ordnung im All	45
SA.G.S.14	Gravitation als universelle Anziehungskraft	45
SA.G.S.15	Verteilung der Materie im Universum, Materiedichten	45
SA.G.S.16	Vorstellungen vom Aufbau (unserer Galaxis)	57
SA.G.S.17	Aufbau und Ausdehnung (unserer Galaxis)	57
SA.G.S.18	Objekte der Galaxis und des galaktischen Halos	57
SA.G.S.19	Lokale Gruppe	58
SA.G.S.20	Galaxienformen	58
SA.G.S.21	Superhaufen und großräumige Strukturen	58
Summe		21
Anteil am Lehrplan		13%
Entwicklung		
SA.G.E.1	Lebensweg von Sternen	26
SA.G.E.2	kosmologische Betrachtungen	27
SA.G.E.3	?Urknall? und 3 K-Strahlung Strukturbildung Galaxienflucht und Ausdehnung des Weltalls	27
SA.G.E.4	Beschreibung der Galaxienarten entsprechend der Lebensstufen	31
SA.G.E.5	Entstehung (der Sterne)	56
SA.G.E.6	Hauptreihenstadium	56
SA.G.E.7	Riesenstadium	56
SA.G.E.8	mögliche Endstadien in Abhängigkeit von der Masse	56
SA.G.E.9	Entwicklung der Sonne	56
SA.G.E.10	kosmologische Beobachtungen	59
SA.G.E.11	kosmologisches Prinzip	59
SA.G.E.12	Newton'sches Weltmodell	59
SA.G.E.13	Kosmologie und allgemeine Relativitätstheorie	59

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.G.E.14	Entwicklungsphasen des Universums	59
SA.G.E.15	Zukunft des Universums	59
	Summe	15
	Anteil am Lehrplan	9%
ohne Zuordnung		
SA.G.oZ.1	Physikalisch-technische Probleme	32
SA.G.oZ.2	Entwicklung der Raumfahrt	32
SA.G.oZ.3	Satelliten und Raumsonden	32
SA.G.oZ.4	Ziele einer ausgewählten Raumfahrtmission	34
SA.G.oZ.5	beteiligte Länder und Einbindung in Raumfahrtprogramme	34
SA.G.oZ.6	zeitlicher und räumlicher Verlauf	34
SA.G.oZ.7	erwartete bzw. schon gewonnene Ergebnisse in Form von Messdaten, Bildern und Materialien und deren Bedeutung	34
SA.G.oZ.8	Erkunden aktuell beobachtbarer Ereignisse	35
SA.G.oZ.9	Erfassen der Erscheinung und des physikalischen Hintergrundes	35
SA.G.oZ.10	Verfolgen und Dokumentieren des Verlaufs der Erscheinung	35
SA.G.oZ.11	Ergebnispräsentation	35
SA.G.oZ.12	Erkunden aktuell beobachtbarer Ereignisse und Erscheinungen	37
SA.G.oZ.13	Zeit- und Arbeitsplanung	37
SA.G.oZ.14	astronomische und physikalische Grundlagen der Erscheinung	37
SA.G.oZ.15	Ergebnisaufzeichnung, Dokumentation, Veranschaulichung und Präsentation	37
SA.G.oZ.16	Ziele einer ausgewählten abgeschlossenen Raumfahrtmission	38
SA.G.oZ.17	beteiligte Raumfahrtorganisationen und Länder, Einbindung in Raumfahrtprogramme	38
SA.G.oZ.18	zeitlicher und räumlicher Verlauf einer Mission	38
SA.G.oZ.19	erwartete bzw. schon gewonnene Ergebnisse in Form von Messdaten, Bildern und Materialien und deren Bedeutung	38
SA.G.oZ.20	physikalisch-technische Probleme	47
SA.G.oZ.21	Entwicklung der Raumfahrt	47
SA.G.oZ.22	Satelliten und Raumsonden	47

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
SA.G.oZ.23	Agenda 21 (Überblick)	48
SA.G.oZ.24	Nachhaltiges Wirtschaften in einem ausgewählten Problemfeld	49
SA.G.oZ.25	Energiebedarf und nachhaltige Entwicklung	49
SA.G.oZ.26	Umgang mit Stoffen und Material ? Recycling	50
SA.G.oZ.27	Aktionsplan: Ökologisch verantwortlich mit Ressourcen umgehen	50
SA.G.oZ.28	Lebensmöglichkeiten im Sonnensystem	60
SA.G.oZ.29	Lebensmöglichkeiten außerhalb des Sonnensystems	60
SA.G.oZ.30	Möglichkeiten der Kontaktaufnahme zu außerirdischen Kulturen	60
	Summe	30
	Anteil am Lehrplan	19%
	Anzahl der Fundstellen	162

Tabelle A.6: Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen (2004).

Fundstelle	Inhalt	Seite
Instrumente, Methoden und Beobachtungen		
S.G.M.1	Kennen wichtiger Etappen der historischen Entwicklung der Astronomie	7
S.G.M.2	Kennen von Leistungsmerkmalen optischer Teleskope	8
S.G.M.3	Anwenden der Kenntnisse zu Leistungsmerkmalen auf optische Großteleskope	8
S.G.M.4	Einblick gewinnen in die nichtoptische astronomische Forschung	8
S.G.M.5	Anwenden von Verfahren zur Beobachtung der Objekte des Sonnensystems	8
S.G.M.6	Beurteilen von Leistungsmerkmalen der Beobachtungstechnik	9
S.G.M.7	Beurteilen der Möglichkeiten, extrasolare Planeten und Leben außerhalb unseres Sonnensystems zu finden	9
S.G.M.8	Anwenden von Verfahren zur Beobachtung von Sternen, galaktischen und extragalaktischen Objekten	13
	Summe	8
	Anteil am Lehrplan	25%
Bewegungen und Jahreszeiten		
S.G.B.1	Kennen der Bewegungen und der Eigenschaften des Mondes	9
S.G.B.2	Kennen der Wechselwirkungen zwischen Mond und Erde	9
S.G.B.3	Einblick gewinnen in das Bewegungsverhalten und die räumliche Verteilung von Galaxien	12
S.G.B.4	Übertragen der Kenntnisse über Sterne und Planetenbewegungen auf Sterngruppierungen	13
	Summe	4
	Anteil am Lehrplan	13%
Bestandteile, Objekte und Modelle		
S.G.O.1	Kennen grundlegender Merkmale von Planeten	6
S.G.O.2	Einblick gewinnen in Satellitensysteme der Planeten	6
S.G.O.3	Beurteilen der Rolle von Kleinkörpern im Sonnensystem	6
S.G.O.4	Kennen der Prozesse zur Energiefreisetzung und zum Energietransport	7

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen (2004). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
S.G.O.5	Anwenden der Kenntnisse über die Strahlung der Sonne auf solar-terrestrische Beziehungen	7
S.G.O.6	Kennen der Bewegungen und der Eigenschaften des Mondes	9
S.G.O.7	Einblick gewinnen in die Natur und die Erscheinungsformen der interstellaren Materie	11
S.G.O.8	Kennen extremer Zustandsformen kosmischer Objekte	12
	Summe	8
	Anteil am Lehrplan	25%
Strukturen und Anordnungen		
S.G.S.1	Kennen des Milchstraßensystems als Beispielgalaxie	11
S.G.S.2	Anwenden der Kenntnisse zur Milchstraße auf andere Galaxien	11
S.G.S.3	Einblick gewinnen in das Bewegungsverhalten und die räumliche Verteilung von Galaxien	12
S.G.S.4	Kennen grundlegender Methoden und Prinzipien der kosmischen Entfernungsbestimmung	14
	Summe	4
	Anteil am Lehrplan	13%
Entwicklung		
S.G.E.1	Kennen grundlegender Vorgänge bei der Sternentstehung und -entwicklung sowie deren Widerspiegelung im Hertzsprung-Russell-Diagramm	11
S.G.E.2	Kennen der klassischen Beobachtungsgrundlagen und Annahmen der Kosmologie	12
S.G.E.3	Anwenden der Beobachtungsgrundlagen auf Modelle zur Entwicklung des Weltalls	12
S.G.E.4	Beurteilen der Zukunft des Weltalls nach bisheriger Kenntnis der Beobachtungsdaten	13
S.G.E.5	Übertragen der Kenntnisse aus Sternentstehung und -entwicklung auf die chemische Entwicklung im Weltall	14
	Summe	5
	Anteil am Lehrplan	16%
ohne Zuordnung		

Fundstellen im Lehrplan für Gymnasien des Landes Sachsen (2004). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
S.G.oZ.1	Kennen der Voraussetzungen für das Leben auf der Erde	6
S.G.oZ.2	Einblick gewinnen in die physikalischen Grundlagen der Raumfahrt	10
S.G.oZ.3	Sich positionieren zu bedeutenden Ereignissen und Problemen in der Entwicklung der Raumfahrt	10
	Summe	3
	Anteil am Lehrplan	9%
	Anzahl der Fundstellen	32

Tabelle A.7: Fundstellen im Lehrplan für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004).

Fundstelle	Inhalt	Seite
Instrumente, Methoden und Beobachtungen		
MV.A.M.1	Einordnung der Astronomie als Naturwissenschaft Gegenstand der Astronomie	20
MV.A.M.2	Erkennbarkeit des Universums	20
MV.A.M.3	Leistungen wichtiger Persönlichkeiten aus verschiedenen Epochen	20
MV.A.M.4	Licht als wichtiger Informationsträger	20
MV.A.M.5	Teilchenstrahlung	20
MV.A.M.6	Empfänger	20
MV.A.M.7	Geräte und Hilfsmittel	20
MV.A.M.8	Fernrohr	20
MV.A.M.9	Aufbau (des Fernrohrs)	20
MV.A.M.10	Einfluss der Atmosphäre auf die Beobachtung	20
MV.A.M.11	Moderne Teleskope	20
MV.A.M.12	Raumfahrt Erweiterung der Beobachtungsmöglichkeiten	20
MV.A.M.13	Scheinbare Himmelskugel	21
MV.A.M.14	Sommersdreieck, Wintersechseck, Tierkreis, zirkumpolare Sternbilder	21
MV.A.M.15	Himmelsrichtungen, astronomisches Koordinatensystem	21
MV.A.M.16	Erforschung der Planeten und der Raumfahrt zu den Planeten	23
MV.A.M.17	Beobachtungstechniken:	27
MV.A.M.18	Methoden der Entfernungbestimmung und ihre Grenzen	25
	Summe	18
	Anteil am Lehrplan	29%
Bewegungen und Jahreszeiten		
MV.A.B.1	Bewegung der Erde im Sonnensystem Umlauf der Erde um die Sonne	21
MV.A.B.2	Rotation der Erde; Entstehung von Tag und Nacht, scheinbare Bewegungen am Sternenhimmel	21
MV.A.B.3	Sommersdreieck, Wintersechseck, Tierkreis, zirkumpolare Sternbilder	21
MV.A.B.4	Arbeit mit der drehbaren Sternkarte	21
MV.A.B.5	Namen und Reihenfolge der Planeten Bewegung der Planeten Wahre und scheinbare Bewegungen	23
MV.A.B.6	Keplersche Gesetze	23
MV.A.B.7	Gravitationsgesetz	23

Fundstellen im Lehrplan für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
MV.A.B.8	Die Bewegungen des Mondes scheinbare und wahre Bewegung gebundene Rotation Mondphasen und Finsternisse Physikalische Daten	23
MV.A.B.9	Lage des Sonnensystems Bewegung der Galaxis	26
MV.A.B.10	Rotation der Erde; Veränderungen des Sternenhimmels im Verlauf des Jahres	21
	Summe	10
	Anteil am Lehrplan	16%
Bestandteile, Objekte und Modellen		
MV.A.O.1	Der Aufbau des Sonnensystems Sonne, Planeten, Monde, Asteroide, Kometen, Meteorite	23
MV.A.O.2	Namen und Reihenfolge der Planeten Bewegung der Planeten Wahre und scheinbare Bewegungen	23
MV.A.O.3	Oberfläche des Mondes Einfluss des Mondes auf die Erde Erforschung des Mondes und der Raumfahrt zum Mond	23
MV.A.O.4	Physik der Planeten Erdartige und jupiterartige Planeten	23
MV.A.O.5	Besonderheiten einzelner Planeten	23
MV.A.O.6	Die Erde als belebter Planet Aufbau des Erdkörpers und der Atmosphäre	24
MV.A.O.7	Sonne, unser Stern Zustandsgrößen, chemische Zusammensetzung	24
MV.A.O.8	Aufbau der Sonne und ihrer Atmosphäre	24
MV.A.O.9	Strahlungsarten der Sonne	24
MV.A.O.10	Sichtbare Erscheinungen	24
MV.A.O.11	Sonnenenergie	24
MV.A.O.12	Kernfusion	24
MV.A.O.13	Solar-terrestrische Beziehungen Bedeutung der Sonne für die Erde	24
MV.A.O.14	Zustandsgrößen der Sterne	25
MV.A.O.15	Zusammenhang zwischen Sternfarbe und Oberflächentemperatur	25
MV.A.O.16	HRD als Zustandsdiagramm	25
MV.A.O.17	Die Sonne	27
	Summe	17
	Anteil am Lehrplan	27%

Fundstellen im Lehrplan für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004). – Fortsetzung

Fundstelle	Inhalt	Seite
Entwicklung		
MV.A.E.1	Alter der Sonne	24
MV.A.E.2	Entstehung und Entwicklung der Sonne	24
MV.A.E.3	Sternentstehung und Sternentwicklung	25
MV.A.E.4	HRD als Entwicklungsdiagramm	25
MV.A.E.5	Kosmologie	26
MV.A.E.6	Sternentstehung - Sternentwicklung:	27
	Summe	6
	Anteil am Lehrplan	10%
ohne Zuordnung		
MV.A.oZ.1	Entwicklungen der Weltvorstellungen im Wandel der Geschichte Leistungen alter Kulturvölker	20
MV.A.oZ.2	Umgang mit Sternkartenprogrammen	22
MV.A.oZ.3	Veränderungen der Sonne (Regionalbezug)	24
MV.A.oZ.4	Geschichte der Astronomie:	27
	Summe	4
	Anteil am Lehrplan	6%
	Anzahl der Fundstellen	63

A.2 Fundstellennachweise zur lehrplaninternen Komprimierung

Tabelle A.8: Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (2009).

Inhalt	Fundstelle
Instrumente, Methoden und Beobachtungen	
astronomische Beobachtungen unter Anleitung vorbereiten, durchführen und protokollieren	T.G09.M.1 T.G09.M.7
ausgewählte Himmelskörper beobachten, beschreiben und deren Bewegungen analysieren	T.G09.M.2
seine Beobachtungen darstellen, auswerten sowie daraus verschiedene Modelle entwickeln und diese durch weiterführende Beobachtungen oder auch Experimente prüfen	T.G09.M.3
durch wissenschaftshistorische und -theoretische Betrachtungen das Verhältnis von Experiment und Beobachtung zur Theorie an Beispielen belegen	T.G09.M.4
durch vergleichende Betrachtung elektromagnetischer Spektren auf physikalische und chemische Eigenschaften der Himmelskörper schließen	T.G09.M.5
die Grenzen und Gültigkeitsbedingungen ihm bekannter Naturgesetze benennen	T.G09.M.6
in Abhängigkeit vom Beobachtungsziel die Beobachtungsgeräte begründet auswählen	T.G09.M.8
fotografische Aufnahmen (Strichspuren, Sternfelder, Planeten oder Mond) unter Nutzung elektronischer Medien und digitaler Technik anfertigen, bearbeiten und auswerten	T.G09.M.9
seine erworbenen astronomischen Kenntnisse unter anderem in Planetarien und Sternwarten praktisch anwenden	T.G09.M.10
die Bedeutung der Entfernungsmessung sowohl aus gesellschaftlicher als auch wissenschaftlicher Sicht an Hand historischer und aktueller Beispiele erklären	T.G09.M.11
die gebräuchlichen Entfernungsmesser in ihrer Funktion als auch ihrer Anwendung erklären,	T.G09.M.12
die Echoortung in Biologie (z. B. Fledermaus), Technik (z. B. Radar) und Astronomie (z. B. Magellan-Sonde) beschreiben und erklären	T.G09.M.13
die historische Entwicklung und Funktion von Messgeräten zur Positionsbestimmung an ausgewählten Beispielen beschreiben und erklären	T.G09.M.14
die historische Bedeutung der Merkur- und Venusdurchgänge für Entfernungsmessungen im Sonnensystem einordnen und Entfernungsberechnungen berechnen,	T.G09.M.15
die Methode der Signallaufzeitmessungen erklären und betreffende Gleichungen interpretieren	T.G09.M.16
verschiedene Methoden zur Entfernungsbestimmung erklären und anwenden: - Parallaxenmessungen (auch mit Hilfe einer zeichnerischen Darstellung) - photometrische Entfernungsmessung - Auswertung der Sternstrahlung / absolute und scheinbare Helligkeit von Sternen - spektroskopische Entfernungsbestimmung (Hubble-Gesetz für kleine Rotverschiebungen),	T.G09.M.17 T.G09.M.20

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Bau und Berechnung von historischen Zeitmessern, um verschiedene Methoden und Verfahren der Zeitbestimmung zu vergleichen und deren Genauigkeit abzuschätzen	T.G09.M.19
Berechnung astronomischer Entfernungen mit Originaldaten von Großteleskopen und Satelliten sowie Interpretation der Ergebnisse	T.G09.M.21
den Aufbau von astronomischen Beobachtungsgeräten beschreiben und ihre Funktionsweise erklären (Abbildungsfehler, Einsatz)	T.G09.M.22
Merkmale, Einsatzmöglichkeiten und Abbildungsfehler von Refraktor und Reflektor vergleichen selbstständig einen Überblick über die Entwicklung der Beobachtungstechnik erstellen und regionale Bezüge einbinden	T.G09.M.23 T.G09.M.24
den Zusammenhang zwischen dem Entwicklungsstand der Technik und der Veränderung der Vorstellung von Mikrokosmos und Makrokosmos erläutern	T.G09.M.25
astronomische Beobachtungen der galileischen Monde, der Venusphasen sowie der Milchstraße und der Andromedagalaxie und Erstellen eigener Modelle sowie deren Vergleich mit den Vorstellungen des kopernikanischen Weltbildes	T.G09.M.26
Analyse von Abbildungsfehlern verschiedener optischer Beobachtungsgeräte und Entwicklung von Kriterien für deren sachgerechten Einsatz	T.G09.M.27
Summe	24
Anteil	39%
Bewegungen und Jahreszeiten	
die Inhalte des Gravitationsgesetzes, der keplerschen Gesetze und ausgewählter Erhaltungssätze erläutern und anwenden, themenbezogene Aufgaben lösen und die Ergebnisse interpretieren,	T.G09.B.1
die Bedeutung der Zeitmessung für die Menschen sowie die Notwendigkeit der Entstehung des Kalenders erklären	T.G09.B.2
den Zusammenhang zwischen den Zeiteinheiten Tag, Monat, Jahr und den Bewegungsvorgängen im Sonnensystem herstellen	T.G09.B.3
den Unterschied zwischen Sterntag und Sonnentag, sowie siderischem und synodischem Monat beschreiben und mit Hilfe einer zeichnerischen Darstellung erklären	T.G09.B.4
Kalender aus verschiedenen Epochen und Kulturkreisen vergleichen (z. B. Mondkalender, Römischer Kalender, Gregorianischer Kalender) und die Notwendigkeit von Schaltregeln erklären	T.G09.B.5

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Summe Anteil	5 8%
Bestandteile, Objekte und Modelle	
für bekannte Modelle Gültigkeitsbedingungen diskutieren	T.G09.O.1
durch Beobachtung und Vergleich von Sternfarben, bis hin zu Spektren auf die Eigenschaften der Himmelskörper schließen	T.G09.O.2
aus dem Vergleich verschiedener Sternspektren die Sterne klassifizieren und deren Aufbau ableiten	T.G09.O.3
astronomische Beobachtungen der galileischen Monde, der Venusphasen sowie der Milchstraße und der Andromedagalaxie und Erstellen eigener Modelle sowie deren Vergleich mit den Vorstellungen des kopernikanischen Weltbildes	T.G09.O.4
die Lebensbedingungen auf der Erde mit den Bedingungen auf anderen Himmelskörpern vergleichen und die Möglichkeiten von verschiedenen Lebensformen diskutieren	T.G09.O.5
Summe Anteil	5 8%
Strukturen und Anordnungen	
verschiedene Vorstellungen vom Aufbau, der Struktur und der Entwicklung des Universums beschreiben	T.G09.S.1
Strukturen des Mikrokosmos und Makrokosmos an ausgewählten Beispielen vergleichen,	T.G09.S.2
verschiedene Standardkerzen (Cepheiden, Supernovae Typ I) zum Aufbau einer Entfernungsleiter einsetzen.	T.G09.S.3
Summe Anteil	3 5%
Entwicklung	
die Lebenszyklen ausgewählter Sterne beschreiben sowie mit Hilfe des Herzprung- Russell-Diagramms darstellen und erklären	T.G09.E.1

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Summe	1
Anteil	2%
ohne Zuordnung	
die Bedeutung astronomischer Forschung für die Entwicklung philosophischer Modelle erläutern.	T.G09.oZ.1
an ausgewählten Beispielen historische Forschungsergebnisse nachvollziehen und deren Bedeutung für den Wissenschaftsfortschritt einordnen	T.G09.oZ.2
das dynamische Wechselspiel zwischen Erkenntnisstand und Weiterentwicklung von Forschung und Technik erläutern	T.G09.oZ.3
Lebenszyklen aus verschiedenen Bereichen mit Hilfe von historischen, biologischen, chemischen und weiteren charakteristischen Merkmalen beschreiben und vergleichen (Analogiebetrachtungen)	T.G09.oZ.4
die Begriffe Makrokosmos und Mikrokosmos mit Hilfe ausgewählter Beispiele erläutern	T.G09.oZ.5
ausgewählte Weltbilder beschreiben und unter Berücksichtigung philosophischer und religiöser Aspekte diskutieren sowie in den Kontext historischer Zusammenhänge einordnen,	T.G09.oZ.6
das kopernikanische Prinzip erläutern	T.G09.oZ.7
einen systematischen oder historischen Überblick über Geräte und Verfahren zur Erforschung des Mikrokosmos erstellen	T.G09.oZ.8
den Aufbau und die Wirkungsweise von Mikroskopen beschreiben und erklären	T.G09.oZ.9
ausgehend von Atommodellen die Vielfalt der Elementarteilchen in einer strukturierten Übersicht anschaulich darstellen	T.G09.oZ.10
die Schwierigkeiten bei der Suche nach einer Weltformel diskutieren	T.G09.oZ.11
die wesentlichen Voraussetzungen für die Entstehung und Entwicklung des Lebens auf der Erde beschreiben und begründen	T.G09.oZ.12
Darstellungen außerirdischer Lebensformen in Kunst und Literatur unter Berücksichtigung der Bedingungen auf der Erde und anderer Himmelskörper interpretieren,	T.G09.oZ.13
die Verantwortung des Menschen für die Erhaltung des Lebens auf der Erde an konkreten Beispielen erörtern	T.G09.oZ.14
Pionierleistungen verschiedener Nationen für die Entwicklung der Raumfahrt einordnen,	T.G09.oZ.15
die Notwendigkeit der internationalen Zusammenarbeit begründen und mit aktuellen Raumfahrtprojekten belegen,	T.G09.oZ.16

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (2009). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
verschiedene Arten von Raketenantrieben beschreiben und deren prinzipielle Funktionsweise erklären, sich mit Ideen zur Besiedlung des Weltalls auseinandersetzen und ihre Möglichkeiten und Grenzen aufzeigen	T.G09.oZ.17 T.G09.oZ.18
Möglichkeiten der Suche nach außerirdischen Zivilisationen diskutieren und die Wahrscheinlichkeit der Kontaktaufnahme abschätzen	T.G09.oZ.19
aktuelle globale Probleme und mögliche Ursachen benennen, konkrete Folgen des Klimawandels für sein Umfeld einschätzen und durch Beobachtungen belegen, die Endlichkeit nicht erneuerbarer energetischer Ressourcen und aktuelle Entwicklungen der Nutzung regenerativer Energien diskutieren, angestrebte Lösungen werten und mögliche Konsequenzen ableiten. Zusammenstellung von wichtigen Informationen über die Menschheit für eine mögliche Botschaft an außerirdische Zivilisationen	T.G09.oZ.20 T.G09.oZ.21 T.G09.oZ.22
Analyse von regionalen Umweltproblemen sowie Entwicklung und Bewertung von Lösungsvorschlägen	T.G09.oZ.23 T.G09.oZ.24
Summe	24
Anteil	39%
Anzahl der Fundstellen	62

Tabelle A.9: Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (1999).

Inhalt	Fundstelle
Instrumente, Methoden und Beobachtungen	
Gegenstandsbestimmung der Astronomie	T.G99.M.1
Verhältnis von Beobachtung und Theorie bei der Erforschung astronomischer Sachverhalte	T.G99.M.2
Arbeitsgebiete: Klassische Astronomie, Astrophysik, Kosmogonie, Kosmologie u. a.	T.G99.M.3
zur historischen Entwicklung der Astronomie	T.G99.M.4
Vorbereitung auf eigene Beobachtungen	T.G99.M.5
Strahlungsarten	T.G99.M.6
Durchlässigkeit der Erdatmosphäre, optisches Fenster und Radiofenster; Veränderung der Erdatmosphäre durch menschliche Einwirkungen	T.G99.M.7
historische und moderne Beobachtungsgeräte und -methoden	T.G99.M.8
Sternbilder als Hilfe zur Groborientierung	T.G99.M.9
scheinbare Himmelskugel, (mathematischer) Horizont, Zenit, Nadir, Meridian, Himmelsnordpol, Himmelsäquator	T.G99.M.10
Horizontsystem	T.G99.M.11
Entfernungsbestimmung	T.G99.M.12
Summe	12
Anteil	21%
Bewegungen und Jahreszeiten	
Zeitbestimmung, Kalender, Orientierung	T.G99.B.1
Rotation der Erde; der Tag; scheinbare tägliche Bewegung der Himmelskörper (Aufgang, Kulmination, Untergang, Zirkumpolarsterne); Sterntag und Sonntag	T.G99.B.2
Umlauf der Erde um die Sonne (Revolution)	T.G99.B.3
das Jahr; Entstehung der Jahreszeiten als Folge der Neigung der Erdachse	T.G99.B.4
Sternbilder zu verschiedenen Jahreszeiten	T.G99.B.5
scheinbarer Jahreslauf der Sonne durch die Sternbilder der Ekliptik	T.G99.B.6
scheinbare und wahre Bewegung des Mondes	T.G99.B.7
Umlauf des Mondes um die Erde; gebundene Rotation; siderischer und synodischer Monat; Mondphasen	T.G99.B.8
Finsternisse; Arten von Finsternissen; Knoten der Mondbahn	T.G99.B.9

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
lunar-terrestrische Beziehungen (Gezeitenwirkung)	T.G99.B.10
scheinbare Bewegungen der Planeten	T.G99.B.11
wahre Bewegungen der Planeten um die Sonne	T.G99.B.12
keplersche Gesetze; Gravitationsgesetz	T.G99.B.13
Sichtbarkeit der Planeten	T.G99.B.14
Summe	14
Anteil	24%
Bestandteile, Objekte und Modelle	
Radius, Masse, Fallbeschleunigung (des Mondes)	T.G99.O.1
fehlende Atmosphäre; Folgen der fehlenden Atmosphäre	T.G99.O.2
Oberflächenformen des Mondes	T.G99.O.3
Einteilung der Planeten	T.G99.O.4
Oberflächen und Atmosphären der Planeten	T.G99.O.5
Satelliten anderer Planeten	T.G99.O.6
Planetoiden	T.G99.O.7
Meteorite; Kometen	T.G99.O.8
Gas und Staub im Sonnensystem	T.G99.O.9
Strahlungen und Felder im Sonnensystem	T.G99.O.10
Künstliche Himmelskörper	T.G99.O.11
Die Sonne als Stern	T.G99.O.12
Aufbau der Sonne vom Zentralgebiet zur Korona	T.G99.O.13
solar-terrestrische Beziehungen	T.G99.O.14
Sonnenaktivität; Erscheinungen der Sonnenaktivität	T.G99.O.15
Zustandsgrößen der Sonne: Oberflächentemperatur, Radius, Masse, Leuchtkraft, mittlere Dichte, Rotationsdauer, differentielle Rotation, chemische Zusammensetzung	T.G99.O.16
Energiefreisetzung durch Kernfusion	T.G99.O.17
Energietransport durch Strahlung und Konvektion	T.G99.O.18
absolute Helligkeit als Maß für die Leuchtkraft	T.G99.O.19
wichtige Zustandsgrößen der Sterne; wichtige Zusammenhänge zwischen Zustandsgrößen der Sterne	T.G99.O.20

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Hertzprung-Russell-Diagramm (HRD) als Zustandsdiagramm	T.G99.O.21
Summe Anteil	21 36%
Strukturen und Anordnungen	
Planeten und ihre räumliche Anordnung	T.G99.S.1
scheinbare Helligkeit in Abhängigkeit von Leuchtkraft und Entfernung	T.G99.S.2
Das Milchstraßensystem (Galaxis): Erscheinung, Struktur, Objekte, Rotation; Einordnen des Sonnensystems	T.G99.S.3
Summe Anteil	3 5%
Entwicklung	
wesentliche Bedingungen und Prozesse bei der Sternentstehung und bei der Planetenentstehung	T.G99.E.1
Sternentwicklung	T.G99.E.2
mögliche Spätstadien der Sternentwicklung: weiße Zwerge, Neutronensterne (Supernovae), schwarze Löcher	T.G99.E.3
HRD als Entwicklungsdiagramm	T.G99.E.4
Entwicklung des Universums	T.G99.E.5
Summe Anteil	5 9%
ohne Zuordnung	
Astronomie in Thüringen	T.G99.oZ.1
Möglichkeiten der Existenz von Leben auf den Planeten	T.G99.oZ.2
Wandel der Vorstellungen vom Sonnensystem; Weltbilder	T.G99.oZ.3
Summe	3

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Anteil	5%
Anzahl der Fundstellen	58

Tabelle A.10: Fundstellen nach der Lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Regelschulen des Landes Thüringen (1999).

Inhalt	Fundstelle
Instrumente, Methoden und Beobachtungen	
Gegenstandsbestimmung der Astronomie	T.R.M.1
Arbeitsgebiete: Klassische Astronomie, Astrophysik, Kosmogonie, Kosmologie u. a.	T.R.M.2
zur historischen Entwicklung der Astronomie; Astronomie in Thüringen	T.R.M.3
Vorbereitung auf eigene astronomische Beobachtungen	T.R.M.4
Strahlungsarten	T.R.M.5
Durchlässigkeit der Erdatmosphäre und deren Veränderung durch menschliche Einwirkung; optisches Fenster und Radiofenster	T.R.M.6
historische und moderne Beobachtungsgeräte und -methoden	T.R.M.7
Sternbilder als Hilfe zur Groborientierung	T.R.M.8
scheinbare Himmelskugel, (mathematischer) Horizont, Zenit, Meridian, Himmelsnordpol, Himmelsäquator	T.R.M.9
	T.R.M.10
Summe	9
Anteil	18%
Bewegungen und Jahreszeiten	
Zeitbestimmung, Kalender, Orientierung	T.R.B.1
Rotation der Erde; der Tag; scheinbare tägliche Bewegung der Himmelskörper (Aufgang, Kulmination, Untergang, Zirkumpolarsterne)	T.R.B.2
Umlauf der Erde um die Sonne; das Jahr	T.R.B.3
Sternbilder zu verschiedenen Jahreszeiten	T.R.B.4
scheinbarer Jahreslauf der Sonne durch die Sternbilder der Ekliptik	T.R.B.5
scheinbare und wahre Bewegung des Mondes	T.R.B.6
Umlauf des Mondes um die Erde; gebundene Rotation; synodischer Monat; Mondphasen	T.R.B.7
Finsternisse; Arten von Finsternissen	T.R.B.8
lunar-terrestrische Beziehungen (Gezeitenwirkung)	T.R.B.9
scheinbare Bewegungen der Planeten	T.R.B.10
wahre Bewegungen der Planeten um die Sonne	T.R.B.11
keplersche Gesetze; Gravitationsgesetz	T.R.B.12

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Regelschulen des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Sichtbarkeit der Planeten	T.R.B.13
Summe	13
Anteil	27%
Bestandteile, Objekte und Modelle	
Radius, Masse, Fallbeschleunigung (des Mondes)	T.R.O.1
fehlende Atmosphäre; Folgen der fehlenden Atmosphäre (beim Mond)	T.R.O.2
Oberflächenformen des Mondes	T.R.O.3
Einteilung der Planeten	T.R.O.4
Oberflächen und Atmosphären der Planeten	T.R.O.5
Satelliten anderer Planeten	T.R.O.6
Planetoiden	T.R.O.7
Meteorite; Kometen	T.R.O.8
Gas und Staub im Sonnensystem	T.R.O.9
Strahlungen und Felder im Sonnensystem	T.R.O.10
Künstliche Himmelskörper	T.R.O.11
Die Sonne als Stern	T.R.O.12
Aufbau der Sonne vom Zentralgebiet zur Korona	T.R.O.13
solar-terrestrische Beziehungen	T.R.O.14
Erscheinungen der Sonnenaktivität	T.R.O.15
Zustandsgrößen der Sonne: Oberflächentemperatur, Radius, Masse, Leuchtkraft, mittlere Dichte,	T.R.O.16
Rotationsdauer, chemische Zusammensetzung	
Energiefreisetzung; Energietransport	T.R.O.17
wichtige Zustandsgrößen der Sterne und wichtige Zusammenhänge zwischen Zustandsgrößen der Sterne	T.R.O.18
Summe	18
Anteil	37%
Strukturen und Anordnungen	
scheinbare Helligkeit in Abhängigkeit von Leuchtkraft und Entfernung	T.R.S.2

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Regelschulen des Landes Thüringen (1999). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
das Milchstraßensystem (Galaxis): Erscheinung, Struktur, Objekte, Rotation; Einordnen des Sonnensystems andere Galaxien	T.R.S.3 T.R.S.4
Summe Anteil	4 8%
Entwicklung	
wesentliche Bedingungen und Prozesse bei der Sternentstehung und bei der Planetenentstehung Sternentwicklung Entwicklung des Universums	T.R.E.1 T.R.E.2 T.R.E.3
Summe Anteil	3 6%
ohne Zuordnung	
Möglichkeit der Existenz von Leben auf den Planeten Wandel der Vorstellungen vom Sonnensystem	T.R.oZ.1 T.R.oZ.2
Summe Anteil	2 4%
Anzahl der Fundstellen	49

Tabelle A.11: Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009).

Inhalt	Fundstelle
Instrumente, Methoden und Beobachtungen	
das Modell der scheinbaren Himmelskugel erläutern	SA.R.M.1 SA.R.M.4
Alltagsphänomene wahrnehmen, Hypothesen aufstellen eine Beobachtung des Sternhimmels durchführen und Sternbilder erkennen den Verlauf und die Ergebnisse einer Mondbeobachtung sach- und adressatengerecht präsentieren Beobachtungsbedingungen für Kleinkörper sowie Gefahren durch ihre Bewegungen ableiten Beobachtungsgeräte einteilen ausgewählte Gegenstände astronomischer Forschung erläutern Informationen zu Methoden und Ergebnissen astronomischer Forschung sowie deren Nutzung sammeln und aufbereiten	SA.R.M.2 SA.R.M.3 SA.R.M.5 SA.R.M.6 SA.R.M.7 SA.R.M.8 SA.R.M.9
den Gegenstand der Astronomie und der Astrologie unterscheiden Beobachtungsgeräte: optische und nichtoptische, historische und moderne, erd- und weltraumgebundene Himmelscheibe von Nebra, Sonnenobservatorium Goseck	SA.R.M.10 SA.R.M.11 SA.R.M.12
Summe	11
Anteil	21%
Bewegungen und Jahreszeiten	
beobachtbare Alltagsphänomene als Folge von Rotation und Revolution erklären ausgewählte Sterne und Sternbilder an der Sternkarte zeigen, entsprechenden Jahreszeiten zuordnen und als Orientierungshilfe nutzen	SA.R.B.1 SA.R.B.2
unter Verwendung des Horizontsystems mit der drehbaren Sternkarte die Bewegung von Sternen beschreiben (Sternörter angeben, Auf- und Untergangszeiten)	SA.R.B.3 SA.R.B.4 SA.R.B.6
Unterschiede zwischen wahren und scheinbaren Bewegungen von Erde und anderen Himmelskörpern typische Sommer-, Winter- und zirkumpolare Sternbilder die Bewegung der Objekte im Sonnensystem erläutern, mit Hilfe der Gravitation erklären und deren Auswirkungen exemplarisch nennen eine Beobachtung zu Phasen und Bewegungen des Mondes planen, mit bloßem Auge durchführen, protokollieren und auswerten	SA.R.B.5 SA.R.B.7 SA.R.B.8 SA.R.B.9

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Kepler'sche Gesetze	SA.R.B.10
Sonnen- und Mondfinsternis, Mondphasen	SA.R.B.11
Summe	9
Anteil	17%
Bestandteile, Objekte und Modelle	
wesentliche Eigenschaften ausgewählter Planeten und des Mondes mit denen der Erde vergleichen	SA.R.O.1
ausgewählte Himmelskörper entsprechend ihren Eigenschaften den Gruppen von Objekten zuordnen;	SA.R.O.2
Planeten in erdähnlich und jupiterähnlich klassifizieren	
Eigenschaften der Objekte im Vergleich: Masse, Radius, mittlere Dichte, Oberflächenstruktur, Atmosphäre	SA.R.O.3
den Aufbau der Sonne beschreiben (modellhaft darstellen)	SA.R.O.4
	SA.R.O.9
	SA.R.O.5
	SA.R.O.13
den Prozess der Energiefreisetzung durch Kernfusion vereinfacht beschreiben	SA.R.O.6
Objekte, Prozesse und Entwicklungen mit Hilfe von Modellen veranschaulichen (Modell und Realität unterscheiden)	SA.R.O.15
Zusammenhänge zwischen Sonnenaktivität und Erscheinungen auf der Erde herstellen	SA.R.O.7
Zusammenhänge zwischen Leuchtkraft, scheinbarer Helligkeit und Entfernung sowie zwischen	SA.R.O.8
Oberflächentemperatur und Farbe von Sternen herstellen	
das Hertzsprung-Russell-Diagramm interpretieren	SA.R.O.10
	SA.R.O.14
Aufbau der Sonne und Sonnenaktivität	SA.R.O.11
Bedeutung der Sonne für das Leben auf der Erde	SA.R.O.12
Summe	11
Anteil	21%
Strukturen und Anordnungen	
den Aufbau des Sonnensystems beschreiben (mit Hilfe von Funktionsmodelle darstellen)	SA.R.S.1
	SA.R.S.2
	SA.R.S.3

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
den Platz der Sonne im Milchstraßensystem beschreiben	SA.R.S.4
die Entfernung von Sternen mit Hilfe der Parallaxe berechnen	SA.R.S.5
Zusammenhänge zwischen Leuchtkraft, scheinbarer Helligkeit und Entfernung sowie zwischen Oberflächentemperatur und Farbe von Sternen herstellen	SA.R.S.6
astronomische Entfernungseinheiten	SA.R.S.7
im Überblick: Aufbau der Milchstraße, Lebenslauf von Sternen, Urknalltheorie	SA.R.S.8
Summe	6
Anteil	11%
Entwicklung	
den Lebenslauf von Sternen in Abhängigkeit von ihrer Masse beschreiben	SA.R.E.1
die Urknalltheorie als Grundlage des modernen Weltbildes vereinfacht darstellen	SA.R.E.4
Simulation als visuelle Darstellung vergangener, gegenwärtiger und möglicher zukünftiger Prozesse - astronomische Entfernungseinheiten	SA.R.E.2
	SA.R.E.5
	SA.R.E.3
Summe	3
Anteil	6%
ohne Zuordnung	
Gültigkeit von Hypothesen diskutieren	SA.R.oZ.1
die Bedeutung von Alltagsphänomenen für das Leben bewerten	SA.R.oZ.2
Bedingungen für irdisches Leben auf anderen Objekten des Sonnensystems diskutieren	SA.R.oZ.3
die Besonderheit des Planeten Erde als Lebensraum im Sonnensystem werten	SA.R.oZ.4
verschiedene Weltbilder beschreiben (vor historischen Hintergrund bewerten, mit modernem Weltbild vergleichen)	SA.R.oZ.5
	SA.R.oZ.9
	SA.R.oZ.11
besondere astronomische Ereignisse verfolgen (in Astronomie und Raumfahrt)	SA.R.oZ.6
	SA.R.oZ.13

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Sekundarschulen des Landes Sachsen-Anhalt (2009). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Ergebnisse astronomischer Forschung sach- und adressatengerecht präsentieren durch den Besuch eines außerschulischen Lernortes Informationen gewinnen den Nutzen der Raumfahrt anhand ausgewählter Kriterien bewerten weltraumgestützte Navigation und Kommunikation die Bedeutung der Sonne für das Leben auf der Erde auch unter Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit erläutern den Blick in den Weltraum als Blick in die Vergangenheit interpretieren Nachhaltig mit Ressourcen umgehen	SA.R.oZ.7
	SA.R.oZ.8
	SA.R.oZ.10
	SA.R.oZ.12
	SA.R.oZ.14
	SA.R.oZ.15
	SA.R.oZ.16
Summe	13
Anteil	25%
Anzahl der Fundstellen	53

Tabelle A.12: Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003).

Inhalt	Fundstelle
Instrumente, Methoden und Beobachtungen	
Gegenstand der Astronomie und Abgrenzung zur Astrologie	SA.G.M.1
Arbeitsmethoden der Astronomen	SA.G.M.2
Astronomie und Weltbild	SA.G.M.3
	SA.G.M.15
	SA.G.M.16
	SA.G.M.17
Scheinbare Himmelskugel, Horizontsystem	SA.G.M.4
	SA.G.M.14
	SA.G.M.5
	SA.G.M.9
	SA.G.M.6
	SA.G.M.7
	SA.G.M.8
	SA.G.M.10
	SA.G.M.11
	SA.G.M.12
	SA.G.M.19
	SA.G.M.13
	SA.G.M.18
	SA.G.M.20
	SA.G.M.21
	SA.G.M.22
	SA.G.M.23
Planetenerforschung mit Hilfe von Satelliten und Raumsonden	
Optisch nicht sichtbare Galaxien	
Erkunden von Beobachtungsmöglichkeiten (direkt und mittelbar) mit und ohne Hilfsmittel	
einfache Messgeräte (Winkelmessgerät, Schattenstab)	
Beobachtungsinstrumente (Aufbau, Eigenschaften)	
Strahlung als Informationsquelle	
Beobachtungstechnik im Überblick	
Himmelsbeobachtung	
Spektroskopie als Analysemethode	
Koordinatensysteme	
Möglichkeiten der Bestimmung einzelner Größen (Zustandsgrößen von Sternen)	
Summe	15
Anteil	14%
Bewegungen und Jahreszeiten	

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Rotation und Revolution	SA.G.B.1 SA.G.B.16
Sterne und Sternbilder als Orientierungsmittel	SA.G.B.2
Sternortangabe mit Hilfe von Koordinaten	SA.G.B.3
Bewegungen der Planeten und ihre Gesetze	SA.G.B.4
Erdmond (Bewegungen, gebundene Rotation; Phasen; Finsternisse)	SA.G.B.5 SA.G.B.11
Planetenebeobachtung von der Erde	SA.G.B.6
unser Tag als mittlerer Sonnentag	SA.G.B.7
Woche und Monat	SA.G.B.8
Das Jahr (tropisches Jahr, Sonnenkalender)	SA.G.B.9
der Mond im System Sonne-Erde-Mond (Gezeiten)	SA.G.B.10
Ephemeriden von Sonne, Mond und Planeten	SA.G.B.12
Einteilung der Sphäre in Sternbilder (zur Orientierung) und deren Sichtbarkeit in Abhängigkeit von den Jahreszeiten	SA.G.B.13 SA.G.B.14
scheinbare Bewegung der Sterne	SA.G.B.15
Himmelskörper im Gravitationsfeld eines Zentralkörpers	SA.G.B.17
Sichtbarkeitsbedingungen für Körper im Sonnensystem	SA.G.B.18
astronomische Zeitrechnung und Messung	SA.G.B.19
Bewegung der Sterne (innerhalb der Galaxie; Dopplereffekt)	SA.G.B.20
physikalische Parameter (unserer Galaxis, Raumbewegung der Sonne, Rotationskurven)	SA.G.B.21 SA.G.B.22
Summe	18
Anteil	17%
Bestandteile, Objekte und Modelle	
Erd- und jupiterähnliche Planeten Venus, Mars, Jupiter, Saturn Verwendung vielfältiger Anschauungsmaterialien, z. B. Fotos und Videosequenzen Zuordnung grundlegender Eigenschaften	SA.G.O.1
Erdmond (Aufbau und Oberfläche; Mondbeobachtungen)	SA.G.O.2 SA.G.O.26

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Kleinkörper des Sonnensystems	SA.G.O.3
Ausblick auf weitere Planeten außerhalb unseres Sonnensystems	SA.G.O.4
der Aufbau der Sonne	SA.G.O.5
	SA.G.O.25
	SA.G.O.43
Erzeugung und Transport der Energie im Sonneninneren	SA.G.O.6
	SA.G.O.38
	SA.G.O.44
	SA.G.O.45
Erscheinungen der Sonnenaktivität	SA.G.O.7
	SA.G.O.39
	SA.G.O.47
die Sonne als Energiespender (Solarkonstante)	SA.G.O.8
	SA.G.O.40
	SA.G.O.9
ökologische Wirkungen der Sonnenstrahlung: Erdatmosphäre als Schutzschild (Ozonschicht, Treibhauseffekt, Schutz vor Strahlung)	SA.G.O.10
Magnetfeld der Erde als Schutzschild (Polarlichter)	SA.G.O.11
Sternspektren und ihre Interpretation (Sonnenspektrum)	SA.G.O.42
	SA.G.O.12
Zustandsgrößen der Sterne (Masse, Radius, Temperatur und Leuchtkraft), Zusammenhänge	SA.G.O.27
	SA.G.O.48
	SA.G.O.49
Planetenbeobachtung von der Erde (Bestimmung von Masse und Volumen)	SA.G.O.13
Gesamtbeobachtung unseres Planetensystems	SA.G.O.14
Monde der Planeten unseres Sonnensystems	SA.G.O.15
Marsmonde	SA.G.O.16
Vergleich der Marsmonde mit Asteroiden	SA.G.O.17
Galilei'sche Monde des Jupiters (Io, Europa, Ganymed, Callisto)	SA.G.O.18
Vergleichen ausgewählter Monde anderer Planeten mit dem Erdmond	SA.G.O.19

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Kleinkörper (Überblick, Eigenschaften, mögliche Gefahren)	SA.G.O.20 SA.G.O.21 SA.G.O.22 SA.G.O.23 SA.G.O.34 SA.G.O.35 SA.G.O.36 SA.G.O.37
Quasare als Formen der am weitesten entfernten Objekte Planetenoberfläche, Atmosphären	SA.G.O.24 SA.G.O.28 SA.G.O.29
Satellitensysteme Magnetfelder Vergleich Erde ? Mond Monde im Sonnensystem Hertzsprung-Russell-Diagramm	SA.G.O.30 SA.G.O.31 SA.G.O.32 SA.G.O.33 SA.G.O.41
Abstrahlung der Energie Doppelsterne	SA.G.O.50 SA.G.O.46 SA.G.O.51
Summe	29
Anteil	27%
Strukturen und Anordnungen	
Aufbau des Sonnensystems	SA.G.S.1 SA.G.S.6
Sternentfernungen	SA.G.S.2
Aufbau des Milchstraßensystems	SA.G.S.3
Extragalaktische Sternsysteme	SA.G.S.4
Problem der Veranschaulichung kosmischer Großstrukturen	SA.G.S.5
Aufbau einer Galaxie und ihr Rotationsverhalten	SA.G.S.7

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Einteilung nach der Hubble-Klassifikation in drei Grundarten	SA.G.S.8 SA.G.S.20
Wechselwirkende Galaxien	SA.G.S.9
Lokale Gruppe, Galaxienhaufen und Superhaufen als Formen der Materieansammlung im Universum	SA.G.S.10 SA.G.S.12 SA.G.S.19 SA.G.S.21
Galaxien als ?Bausteine? des Weltalls	SA.G.S.11
Wabenstruktur als größte Ordnung im All	SA.G.S.13
Gravitation als universelle Anziehungskraft	SA.G.S.14
Verteilung der Materie im Universum, Materiedichten	SA.G.S.15
Aufbau und Ausdehnung (unserer Galaxis), historische Vorstellungen	SA.G.S.16 SA.G.S.17
Objekte der Galaxis und des galaktischen Halos	SA.G.S.18
Summe	15
Anteil	14%
Entwicklung	
Entstehung, Entwicklungsschritte und Endstadien von Sternen	SA.G.E.1 SA.G.E.5 SA.G.E.6 SA.G.E.7 SA.G.E.8
kosmologische Betrachtungen	SA.G.E.2
?Urknall? und 3 K-Strahlung Strukturbildung Galaxienflucht und Ausdehnung des Weltalls	SA.G.E.3
Beschreibung der Galaxienarten entsprechend der Lebensstufen	SA.G.E.4
Entwicklung der Sonne	SA.G.E.9
kosmologische Beobachtungen	SA.G.E.10
kosmologisches Prinzip	SA.G.E.11
Newton'sches Weltmodell	SA.G.E.12

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Kosmologie und allgemeine Relativitätstheorie	SA.G.E.13
Entwicklungsphasen des Universums	SA.G.E.14
Zukunft des Universums	SA.G.E.15
Summe	11
Anteil	10%
ohne Zuordnung	
Physikalisch-technische Probleme der Raumfahrt	SA.G.oZ.1
Entwicklung der Raumfahrt	SA.G.oZ.20
Satelliten und Raumsonden	SA.G.oZ.2
Ziele einer ausgewählten Raumfahrtmission	SA.G.oZ.21
beteiligte Länder und Einbindung in Raumfahrtprogramme	SA.G.oZ.3
zeitlicher und räumlicher Verlauf	SA.G.oZ.22
erwartete bzw. schon gewonnene Ergebnisse in Form von Messdaten, Bildern und Materialien und deren Bedeutung	SA.G.oZ.4
Erkunden aktuell beobachtbarer Ereignisse	SA.G.oZ.16
Erfassen der Erscheinung und des physikalischen Hintergrundes	SA.G.oZ.5
Verfolgen und Dokumentieren des Verlaufs der Erscheinung	SA.G.oZ.17
Ergebnispräsentation	SA.G.oZ.6
Zeit- und Arbeitsplanung	SA.G.oZ.18
Ergebnisaufzeichnung, Dokumentation, Veranschaulichung und Präsentation	SA.G.oZ.7
Agenda 21 (Überblick)	SA.G.oZ.19
	SA.G.oZ.8
	SA.G.oZ.12
	SA.G.oZ.9
	SA.G.oZ.14
	SA.G.oZ.10
	SA.G.oZ.11
	SA.G.oZ.13
	SA.G.oZ.15
	SA.G.oZ.23

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen-Anhalt (2003). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Nachhaltiges Wirtschaften in einem ausgewählten Problemfeld	SA.G.o.Z.24
Energiebedarf und nachhaltige Entwicklung	SA.G.o.Z.25
Umgang mit Stoffen und Material ? Recycling	SA.G.o.Z.26
Aktionsplan ?Ökologisch verantwortlich mit Ressourcen umgehen	SA.G.o.Z.27
Lebensmöglichkeiten im Sonnensystem	SA.G.o.Z.28
Lebensmöglichkeiten außerhalb des Sonnensystems	SA.G.o.Z.29
Möglichkeiten der Kontaktaufnahme zu außerirdischen Kulturen	SA.G.o.Z.30
Summe	21
Anteil	19%
Anzahl der Fundstellen	109

Tabelle A.13: Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen (2004).

Inhalt	Fundstelle
Instrumente, Methoden und Beobachtungen	
Kennen wichtiger Etappen der historischen Entwicklung der Astronomie	S.G.M.1
Kennen von Leistungsmerkmalen optischer (Anwendung, Beurteilung) Teleskope	S.G.M.2 S.G.M.3 S.G.M.6 S.G.M.4 S.G.M.5
Einblick gewinnen in die nichtoptische astronomische Forschung	S.G.M.7
Anwenden von Verfahren zur Beobachtung der Objekte des Sonnensystems	S.G.M.8
Beurteilen der Möglichkeiten, extrasolare Planeten und Leben außerhalb unseres Sonnensystems zu finden	
Anwenden von Verfahren zur Beobachtung von Sternen, galaktischen und extragalaktischen Objekten	
Summe	6
Anteil	21%
Bewegungen und Jahreszeiten	
Kennen der Bewegungen und der Eigenschaften des Mondes	S.G.B.1
Kennen der Wechselwirkungen zwischen Mond und Erde	S.G.B.2
Einblick gewinnen in das Bewegungsverhalten und die räumliche Verteilung von Galaxien	S.G.B.3
Übertragen der Kenntnisse über Sterne und Planetenbewegungen auf Sterngruppierungen	S.G.B.4
Summe	4
Anteil	14%
Bestandteile, Objekte und Modelle	
Kennen grundlegender Merkmale von Planeten	S.G.O.1
Einblick gewinnen in Satellitensysteme der Planeten	S.G.O.2
Beurteilen der Rolle von Kleinkörpern im Sonnensystem	S.G.O.3
Kennen der Prozesse zur Energiefreisetzung und zum Energietransport	S.G.O.4
Anwenden der Kenntnisse über die Strahlung der Sonne auf solar-terrestrische Beziehungen	S.G.O.5
Kennen der Bewegungen und der Eigenschaften des Mondes	S.G.O.6

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen (2004). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Einblick gewinnen in die Natur und die Erscheinungsformen der interstellaren Materie	S.G.O.7
Kennen extremer Zustandsformen kosmischer Objekte	S.G.O.8
Summe	8
Anteil	28%
Strukturen und Anordnungen	
Kennen des Milchstraßensystems als Beispielgalaxie	S.G.S.1
Anwenden der Kenntnisse zur Milchstraße auf andere Galaxien	S.G.S.2
Einblick gewinnen in das Bewegungsverhalten und die räumliche Verteilung von Galaxien	S.G.S.3
Kennen grundlegender Methoden und Prinzipien der kosmischen Entfernungbestimmung	S.G.S.4
Summe	4
Anteil	14%
Entwicklung	
Kennen grundlegender Vorgänge bei der Sternentstehung und -entwicklung sowie deren Widerspiegelung im Hertzsprung-Russell-Diagramm	S.G.E.1
Kennen der klassischen Beobachtungsgrundlagen (Anwendung) und Annahmen der Kosmologie	S.G.E.2
Beurteilen der Zukunft des Weltalls nach bisheriger Kenntnis der Beobachtungsdaten	S.G.E.3
Übertragen der Kenntnisse aus Sternentstehung und -entwicklung auf die chemische Entwicklung im Weltall	S.G.E.4
	S.G.E.5
Summe	4
Anteil	14%
ohne Zuordnung	
Kennen der Voraussetzungen für das Leben auf der Erde	S.G.oZ.1
Einblick gewinnen in die physikalischen Grundlagen der Raumfahrt	S.G.oZ.2

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für Gymnasien des Landes Sachsen (2004). – Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Sich positionieren zu bedeutenden Ereignissen und Problemen in der Entwicklung der Raumfahrt	S.G.oZ.3
Summe	3
Anteil	10%
Anzahl der Fundstellen	29

Tabelle A.14: Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004).

Inhalt	Fundstelle
Instrumente, Methoden und Beobachtungen	
Einordnung der Astronomie als Naturwissenschaft, Gegenstand der Astronomie	MV.A.M.1
Erkennbarkeit des Universums	MV.A.M.2
Leistungen wichtiger Persönlichkeiten aus verschiedenen Epochen	MV.A.M.3
Licht als wichtiger Informationsträger	MV.A.M.4
Teilchenstrahlung	MV.A.M.5
Astronomische Beobachtungsgeräte	MV.A.M.6
	MV.A.M.7
	MV.A.M.8
	MV.A.M.9
	MV.A.M.10
	MV.A.M.11
	MV.A.M.12
	MV.A.M.13
	MV.A.M.14
	MV.A.M.15
	MV.A.M.16
	MV.A.M.17
	MV.A.M.18
Summe	15
Anteil	27%
Bewegungen und Jahreszeiten	
Bewegung der Erde im Sonnensystem Umlauf der Erde um die Sonne	MV.A.B.1
Rotation der Erde; Entstehung von Tag und Nacht, scheinbare Bewegungen am Sternenhimmel	MV.A.B.2
Sommerdreieck, Wintersechseck, Tierkreis, zirkumpolare Sternbilder	MV.A.B.3
Arbeit mit der drehbaren Sternkarte	MV.A.B.4
Namen und Reihenfolge der Planeten, Bewegung der Planeten, Wahre und scheinbare Bewegungen	MV.A.B.5

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004). –
Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Keplersche Gesetze	MV.A.B.6
Gravitationsgesetz	MV.A.B.7
Die Bewegungen des Mondes, scheinbare und wahre Bewegung, gebundene Rotation, Mondphasen und Finsternisse, Physikalische Daten	MV.A.B.8
Lage des Sonnensystems, Bewegung der Galaxis	MV.A.B.9
Rotation der Erde; Veränderungen des Sternenhimmels im Verlauf des Jahres	MV.A.B.10
Summe	10
Anteil	18%
Bestandteile, Objekte und Modelle	
Der Aufbau des Sonnensystems, Sonne, Planeten, Monde, Asteroide, Kometen, Meteorite	MV.A.O.1
Namen und Reihenfolge der Planeten, Bewegung der Planeten, Wahre und scheinbare Bewegungen	MV.A.O.2
Oberfläche des Mondes, Einfluss des Mondes auf die Erde, Erforschung des Mondes und der Raumfahrt zum Mond	MV.A.O.3
Physik der Planeten (Besonderheiten), Erdartige und jupiterartige Planeten	MV.A.O.4
	MV.A.O.5
Die Erde als belebter Planet, Aufbau des Erdkörpers und der Atmosphäre	MV.A.O.6
Sonne, unser Stern, Zustandsgrößen, chemische Zusammensetzung	MV.A.O.7
	MV.A.O.17
	MV.A.O.8
	MV.A.O.9
Aufbau der Sonne und ihrer Atmosphäre	MV.A.O.10
Strahlungsarten der Sonne	MV.A.O.12
Sichtbare Erscheinungen	MV.A.O.13
Kernfusion	MV.A.O.11
Solar-terrestrische Beziehungen (Sonnenenergie), Bedeutung der Sonne für die Erde	MV.A.O.14
	MV.A.O.15
Zustandsgrößen der Sterne	MV.A.O.16
Zusammenhang zwischen Sternfarbe und Oberflächentemperatur	
HRD als Zustandsdiagramm	
Summe	14

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004). –
Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Anteil	25%
Strukturen und Anordnungen	
Aufbau des Universums	MV.A.S.1
Der Aufbau des Sonnensystems, Sonne, Planeten, Monde, Asteroide, Kometen, Meteorite	MV.A.S.2
Die Astronomische Einheit	MV.A.S.3
Helligkeiten und Entfernungen der Sterne	MV.A.S.4
Lichtjahr, Parsec, absolute Helligkeit	MV.A.S.5
Unser Milchstraßensystem, Größe und Struktur unserer Galaxis	MV.A.S.6
Lage des Sonnensystems, Bewegung der Galaxis	MV.A.S.7
weitere Galaxien	MV.A.S.8
Summe	8
Anteil	14%
Entwicklung	
Alter der Sonne	MV.A.E.1
Entstehung und Entwicklung der Sonne	MV.A.E.2
Sternentstehung und Sternentwicklung	MV.A.E.3
HRD als Entwicklungsdiagramm	MV.A.E.6
Kosmologie	MV.A.E.4
	MV.A.E.5
Summe	5
Anteil	9%
ohne Zuordnung	
Entwicklungen der Weltvorstellungen im Wandel der Geschichte, Leistungen alter Kulturvölker	MV.A.oZ.1
Umgang mit Sternkartenprogrammen	MV.A.oZ.2
Veränderungen der Sonne (Regionalbezug)	MV.A.oZ.3

Fundstellen nach der lehrplaninternen Reduktion des Lehrplans für alle Schulformen des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2004). –
Fortsetzung

Inhalt	Fundstelle
Geschichte der Astronomie:	MV.A.oZ.4
Summe	4
Anteil	7%
Anzahl der Fundstellen	56

A.3 Fundstellennachweise zur lehrplanübergreifenden Zusammenführung

Tabelle A.15: Fundstellen zum Themenfeld Instrumente, Methoden und Beobachtungen.

Fundstelle im Lehrplan									
Nr.	Inhalt	T-G- 2009	T-G- 1999	T-R- 1999	SA-S- 2009	SA-G- 2003	S-G- 2004	MV-A- 2004	Summe
M.A Grundlagen des Faches									
M.A.1	Gegenstandsbestimmung der Astronomie		T.G99.M.1	T.R.M.1	SA.R.M.8 SA.R.M.10	SA.G.M.1		MV.A.M.1	5
M.A.2	Arbeitsgebiete (Klassische Astronomie, Astrophysik, Kosmologie)		T.G99.M.3	T.R.M.2					2
M.A.3	Verhältnis von Experiment und Beobachtung (an historischen Beispielen belegen)	T.G09.M.4	T.G99.M.2						2
M.B Historische Entwicklung des Faches									
M.B.1	Wichtige Etappen der Entwicklung der Astronomie (wichtige Persönlichkeiten)		T.G99.M.4	T.R.M.3			S.G.M.1	MV.A.M.3	4
M.B.2	Bedeutung von Merkur- und Venusstransits		T.G09.M.15						1
M.B.3	Entwicklung der Beobachtungstechnik	T.G09.M.24	T.G99.M.8						2
M.C Beobachtungsinstrumente									
M.C.1	Optische Teleskope (Aufbau, Einsatz, Abbildungsfehler, Vergleich)	T.G09.M.8 T.G09.M.22 T.G09.M.23 T.G09.M.27	T.G99.M.8	T.R.M.7	SA.R.M.7 SA.R.M.11	SA.G.M.12 SA.G.M.18 SA.G.M.19	S.G.M.2 S.G.M.3 S.G.M.6	MV.A.M.6 MV.A.M.7 MV.A.M.8 MV.A.M.9 MV.A.M.11 MV.A.M.17	7
M.C.2	Nichtoptische Astronomie				SA.R.M.11	SA.G.M.6	S.G.M.4	MV.A.M.11 MV.A.M.17	4
M.C.3	Fotografische Aufnahmen anfertigen	T.G09.M.9							1
M.C.4	Direkte und indirekte Beobachtungsmöglichkeiten					SA.G.M.7 SA.G.M.8			1
M.C.5	einfache Messgeräte					SA.G.M.10 SA.G.M.11			1

Fundstellen zum Themenfeld Instrumente, Methoden und Beobachtungen. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004	
M.C.6	Erweiterung der Beobachtungsmöglichkeiten durch die Raumfahrt						SA.G.M.5 SA.G.M.9	MV.A.M.12 MV.A.M.16	2
M.D	Das elektromagnetische Spektrum								
M.D.1	Das EM-Spektrum, Strahlungsarten, Strahlung als Informationsquelle		T.G99.M.6	T.R.M.5			SA.G.M.13	MV.A.M.4 MV.A.M.5	4
M.D.2	Durch Spektren auf Eigenschaften von Himmelskörpern schließen								2
M.D.3	Atmosphärisches Fenster (Einfluss der Atm.)	T.G09.M.5		T.R.M.6			SA.G.M.21		3
			T.G99.M.7					MV.A.M.10	
M.E	Beobachtungen								
M.E.1	Beobachtungen vorbereiten, durchführen und protokollieren	T.G09.M.1 T.G09.M.2 T.G09.M.7		T.R.M.4			SA.R.M.5	SA.G.M.20 S.G.M.8	6
M.E.2	Beobachtungen darstellen, Modelle entwickeln (Modelle vergleichen)	T.G09.M.3 T.G09.M.26							1
M.E.3	Beobachtungsbedingungen für Kleinkörper						SA.R.M.6		1
M.F	Orientierung, scheinbare Himmelskugel, Sternbilder								
M.F.1	Sternbilder (zur Orientierung)		T.G99.M.9	T.R.M.8			SA.R.M.3		4
M.F.2	scheinbare Himmelskugel, Horizontsystem, Koordinatensysteme, drehbare Sternkarte		T.G99.M.10 T.G99.M.11	T.R.M.9 T.R.M.10			SA.R.M.1 SA.R.M.4	MV.A.M.13 MV.A.M.15 MV.A.B.4 MV.A.oZ.2	5
							SA.G.M.22 SA.G.B.3		
M.G	Sonstiges								
M.G.1	Möglichkeiten zum Auffinden von Leben und Exoplaneten							S.G.M.7	1

Fundstellen zum Themenfeld Instrumente, Methoden und Beobachtungen. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan								Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004		
M.G.2	Grenzen und Gültigkeitsbedingungen der Naturgesetze	T.G09.M.6								1
M.G.3	Kenntnisse in Planetarien und Sternwarten anwenden	T.G09.M.10								1
M.G.4	Entfernungsmessung (Bedeutung, Geräte und Methoden, Berechnung)	T.G09.M.11 T.G09.M.12 T.G09.M.17 T.G09.M.20 T.G09.M.21	T.G99.M.12						MV.A.M.18	3
M.G.5	Echoortung	T.G09.M.13								1
M.G.6	Positionsbestimmung (Geräte)	T.G09.M.14								1
M.G.7	Methode der Signallaufzeitmessung	T.G09.M.16								1
M.G.8	Zeitmesser (Bau, Berechnung, Verfahren der Zeitbestimmung)	T.G09.M.19								1
M.G.9	Zusammenhang zwischen Entwicklung der Technik und Vorstellungen zu Mikro- und Makrokosmos	T.G09.M.25								1
M.G.10	Alltagsphänomene wahrnehmen (+Hypothesen aufstellen)						SA.R.M.2			1
M.G.11	Methoden und Ergebnisse astronomischer Forschung						SA.R.M.9	SA.G.M.2		2
M.G.12	Regionale Astronomie						SA.R.M.12			1
M.G.13	Methoden zur Bestimmung der Zustandsgrößen von Sternen							SA.G.M.23		1
M.G.14	Erkennbarkeit des Universums								MV.A.M.2	1
	Summe	16	12	9	10	12	5		11	

Tabelle A.16: Fundstellen zum Themenfeld Bewegungen und Jahreszeiten.

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe	
		T-G-2009	T-G-1999	T-R-1999	SA-S-2009	SA-G-2003	S-G-2004	MV-A-2004		
B.A	Grundlegende Bewegungsgesetze									
B.A.1	Keplersche Gesetze	T.G09.B.1	T.G99.B.13	T.R.B.12	SA.R.B.10	SA.G.B.4			MV.A.B.6	6
B.A.2	Gravitationsgesetz	T.G09.B.1	T.G99.B.13	T.R.B.12	SA.R.B.8	SA.G.B.18			MV.A.B.7	6
B.B	Zeitmessung, Kalender									
B.B.1	Bedeutung der Zeitmessung, Entstehung des Kalenders	T.G09.B.2 T.G09.B.5	T.G99.B.1	T.R.B.1		SA.G.B.9 SA.G.B.10 SA.G.B.20				4
B.B.2	Zusammenhang zwischen Zeiteinheiten und Bewegungen herstellen	T.G09.B.3				SA.G.B.8 SA.G.B.9 SA.G.B.10				2
B.B.3	Sterntag, Sonntag, siderischer und synodischer Monat	T.G09.B.4				SA.G.B.7				2
B.C	Bewegung der Erde									
B.C.1	Rotation der Erde, scheinbare tägliche Bewegung der Himmelskörper	T.G99.B.2		T.R.B.2	SA.R.B.1 SA.R.B.3 SA.R.B.4 SA.R.B.6 SA.R.B.1	SA.G.B.1 SA.G.B.16 SA.G.B.17			MV.A.B.2 MV.A.B.10	5
B.C.2	Revolution (Sternbilder zu verschiedenen Jahreszeiten, Lauf der Sonne durch die Sternbilder)	T.G99.B.3 T.G99.B.5 T.G99.B.6		T.R.B.3 T.R.B.4 T.R.B.5	SA.R.B.2 SA.R.B.7	SA.G.B.1 SA.G.B.16 SA.G.B.2 SA.G.B.14 SA.G.B.15			MV.A.B.1 MV.A.B.3	5
B.C.3	Entstehung der Jahreszeiten	T.G99.B.4								1
B.D	Bewegung des Mondes									
B.D.1	scheinbare und wahre Bewegung des Mondes	T.G99.B.7		T.R.B.6		SA.G.B.5 SA.G.B.11	S.G.B.1		MV.A.B.2 MV.A.B.8	5

Fundstellen zum Themenfeld Bewegungen und Jahreszeiten. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan								Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004		
B.D.2	gebundene Rotation		T.G99.B.8	T.R.B.7		SA.G.B.5 SA.G.B.11			MV.A.B.8	4
B.D.3	siderischer und synodischer Monat			T.R.B.7						2
B.D.4	Mondphasen		T.G99.B.8	T.R.B.7	SA.R.B.9	SA.G.B.5 SA.G.B.11			MV.A.B.8	5
B.D.5	Finsternisse		T.G99.B.9	T.R.B.8	SA.R.B.11	SA.G.B.5 SA.G.B.11			MV.A.B.8	5
B.D.6	Gezeiten		T.G99.B.10	T.R.B.9		SA.G.B.12		S.G.B.2		4
B.E	Bewegung der Planeten									
B.E.1	Scheinbare Bewegung der Planeten		T.G99.B.11	T.R.B.10	SA.R.B.5	SA.G.B.6			MV.A.B.2	5
B.E.2	Wahre Bewegung der Planeten		T.G99.B.12	T.R.B.11	SA.R.B.5	SA.G.B.4			MV.A.B.5	5
B.E.3	Sichtbarkeit der Planeten		T.G99.B.14	T.R.B.13		SA.G.B.19				3
B.F	Bewegung der Sterne und Galaxien									
B.F.1	Bewegung der Sterne, Rotationskurven					SA.G.B.21 SA.G.B.22		S.G.B.3 S.G.B.4	MV.A.B.9	3
B.G	Sonstiges									
B.G.1	Ephemeriden					SA.G.B.13				1
	Summe	5	15	14	8	17	3		11	

Tabelle A.17: Fundstellen zum Themenfeld Bestandteile, Objekte und Modelle.

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-G-2009	T-G-1999	T-R-1999	SA-S-2009	SA-G-2003	S-G-2004	MV-A-2004	
O.A	Der Mond								
O.A.1	Physikalische Daten des Mondes		T.G99.O.1	T.R.O.1	SA.R.O.1	SA.G.O.2 SA.G.O.26	S.G.O.6		5
O.A.2	Fehlende Atmosphäre (des Mondes) und Folgen								2
O.A.3	Oberflächenformen des Mondes		T.G99.O.2 T.G99.O.3	T.R.O.2 T.R.O.3		SA.G.O.2 SA.G.O.26	S.G.O.6	MV.A.O.3	5
O.B	Die Planeten								
O.B.1	Einteilung der Planeten								6
O.B.2	Oberflächen und Atmosphären der Planeten		T.G99.O.4 T.G99.O.5	T.R.O.4 T.R.O.5	SA.R.O.2 SA.R.O.1	SA.G.O.1 SA.G.O.1 SA.G.O.28 SA.G.O.29	S.G.O.1 S.G.O.1	MV.A.O.4 MV.A.O.5 MV.A.O.4 MV.A.O.5 MV.A.O.6	6
O.B.3	Physikalische Eigenschaften der Planeten								4
O.B.4	Satelliten anderer Planeten								4
O.B.5	Lebensbedingungen vergleichen (Erde und andere Himmelskörper)	T.G09.O.5							1
O.C	Kleinkörper								

Fundstellen zum Themenfeld Bestandteile, Objekte und Modelle. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004	
O.C.1	Planetoiden, Meteorite, Kometen		T.G99.O.7 T.G99.O.8	T.R.O.7 T.R.O.8		SA.G.O.3 SA.G.O.20 SA.G.O.21 SA.G.O.22 SA.G.O.23 SA.G.O.34 SA.G.O.35 SA.G.O.36 SA.G.O.37	S.G.O.3		4
O.C.2	Mögliche Gefahren						S.G.O.3		1
O.D	Die Sonne								
O.D.1	Die Sonne als Stern		T.G99.O.12	T.R.O.12					3
O.D.2	Aufbau der Sonne		T.G99.O.13	T.R.O.13	SA.R.O.4 SA.R.O.9	SA.G.O.5 SA.G.O.25 SA.G.O.43		MV.A.O.7 MV.A.O.17 MV.A.O.8	5
O.D.3	Solar-terrestrische Beziehung		T.G99.O.14	T.R.O.14	SA.R.O.7 SA.R.O.12	SA.G.O.8 SA.G.O.40	S.G.O.5	MV.A.O.13 MV.A.O.11	6
O.D.4	Sonnenaktivität		T.G99.O.15	T.R.O.15	SA.R.O.7 SA.R.O.11	SA.G.O.7 SA.G.O.39 SA.G.O.47		MV.A.O.10	5
O.D.5	Zustandsgrößen der Sonne		T.G99.O.16	T.R.O.16					3
O.D.6	Energiefreisetzung durch Kernfusion		T.G99.O.17	T.R.O.17	SA.R.O.5 SA.R.O.13	SA.G.O.6 SA.G.O.38 SA.G.O.44 SA.G.O.45	S.G.O.4	MV.A.O.7 MV.A.O.17 MV.A.O.12	6

Fundstellen zum Themenfeld Bestandteile, Objekte und Modelle. – Fortsetzung

		Fundstelle im Lehrplan							
Nr.	Inhalt	T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004	Summe
O.D.7	Energietransport		T.G99.O.18	T.R.O.17		SA.G.O.6 SA.G.O.38 SA.G.O.44 SA.G.O.45 SA.G.O.46	S.G.O.4		4
O.E	Die Sterne								
O.E.1	Eigenschaften von Himmelskörpern aus Farben und Spektren ableiten	T.G09.O.2			SA.R.O.8	SA.G.O.11 SA.G.O.42		MV.A.O.15	4
O.E.2	Aufbau von Sternen aus dem Spektrum ableiten	T.G09.O.3				SA.G.O.11 SA.G.O.42			2
O.E.3	Zustandsgrößen der Sterne		T.G99.O.20	T.R.O.18		SA.G.O.12 SA.G.O.27 SA.G.O.48 SA.G.O.49		MV.A.O.14	4
O.E.4	Absolute Helligkeit (Leuchtkraft)		T.G99.O.19		SA.R.O.8				2
O.E.5	HRD als Zustandsdiagramm		T.G99.O.21		SA.R.O.10 SA.R.O.14	SA.G.O.41 SA.G.O.50		MV.A.O.16	4
O.E.6	Doppelsterne					SA.G.O.51			1
O.F	Modelle								
O.F.1	Gültigkeitsbedingungen für Modelle	T.G09.O.1							1
O.F.2	Modelle zu Objekten erstellen (Galileische Monde, Venusphasen, Andromedagalaxie)	T.G09.O.4							1
O.F.3	Objekte mit Hilfe von Modellen veranschaulichen				SA.R.O.6 SA.R.O.15				1
O.G	Sonstiges								

Fundstellen zum Themenfeld Bestandteile, Objekte und Modelle. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004	
O.G.1	Gas und Staub im Sonnensystem		T.G99.O.9	T.R.O.9					2
O.G.2	Strahlungen und Felder im Sonnensystem			T.R.O.10					2
O.G.3	Künstliche Himmelskörper		T.G99.O.10	T.R.O.11					2
O.G.4	Exoplaneten		T.G99.O.11			SA.G.O.4			1
O.G.5	Quasare					SA.G.O.24			1
O.G.6	Vergleich: Erde-Mond					SA.G.O.32			1
O.G.7	Interstellare Materie						S.G.O.7		1
O.G.8	Extreme Zustandsformen kosmischer Objekte						S.G.O.8		1
O.G.9	Strahlungsarten der Sonne							MV.A.O.9	1
Summe		5	20	18	12	20	13	14	

Tabelle A.18: Fundstellen zum Themenfeld Strukturen und Anordnungen.

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-G-2009	T-G-1999	T-R-1999	SA-S-2009	SA-G-2003	S-G-2004	MV-A-2004	
S.A	Das Sonnensystem								6
S.A.1	Struktur des Sonnensystems		T.G99.S.1	T.R.S.1	SA.R.S.1 SA.R.S.2 SA.R.S.3	SA.G.S.1 SA.G.S.6	SA.G.O.14	MV.G.S.2 MV.G.O.2	
S.B	Die Milchstraße								6
S.B.1	Das Milchstraßensystem		T.G99.S.3	T.R.S.3	SA.R.S.8	SA.G.S.3 SA.G.S.7 SA.G.S.16 SA.G.S.17 SA.G.S.18	S.G.S.1	MV.G.S.6	
S.B.2	Platz des Sonnensystems in der Milchstraße			T.R.S.3	SA.R.S.4			MV.G.S.7	3
S.C	Weitere Galaxien und kosmische Großstrukturen								
S.C.1	Fremde Galaxien (Hubble-Klassifikation, wechselwirkende Galaxien)			T.R.S.4		SA.G.S.4 SA.G.S.8 SA.G.S.20 SA.G.S.9	S.G.S.2	MV.G.S.8	4
S.C.2	Galaxiengruppen (Lokale Gruppe, Galaxienhaufen, Superhaufen)					SA.G.S.10 SA.G.S.12 SA.G.S.19 SA.G.S.21 SA.G.S.15 SA.G.S.5	S.G.S.3		2
S.C.3	Problem der Veranschaulichung kosmischer Großstrukturen								1
S.C.4	Galaxien als Bausteine des Weltalls (Wabenstruktur)							MV.G.S.1	3
S.D	Kosmische Entfernungen								
S.D.1	Astronomische Entfernungseinheiten	T.G09.S.1			SA.R.S.7	SA.G.S.11 SA.G.S.13			2
S.D.2	Entfernungsleiter (Standardkerzen)							MV.G.S.3 MV.G.S.5	3
		T.G09.S.3						S.G.S.4	

Fundstellen zum Themenfeld Strukturen und Anordnungen. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004	
S.D.3	Scheinbare Helligkeit (Abhängigkeit von der Entfernung)		T.G99.S.2	T.R.S.2	SA.R.S.6			MV.G.S.4	4
S.D.4	Entfernungsbestimmung mittels Parallaxe				SA.R.S.5		S.G.S.4		2
S.E	Sonstiges								
S.E.1	Gravitation als Strukturbildungsmoment					SA.G.S.14			1
S.E.2	Struktur von Mikro- und Makrokosmos	T.G09.S.2							1
	Summe	3	3	5	6	8	6	7	

Tabelle A.19: Fundstellen zum Themenfeld Entwicklung.

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan								Summe			
		T-G-2009	T-G-1999	T-R-1999	SA-S-2009	SA-G-2003	S-G-2004	MV-A-2004					
E.A	Sternentwicklung												
E.A.1	Sternentwicklung (Massenabhängige Entwicklung)		T.G99.E.1 T.G99.E.2 T.G99.E.3	T.R.E.1 T.R.E.2	SA.R.E.1 SA.R.E.4	SA.G.E.1 SA.G.E.5 SA.G.E.6 SA.G.E.7 SA.G.E.8 SA.G.E.9	S.G.E.5	MV.G.E.3		6			
E.A.2	Entwicklung der Sonne								MV.G.E.2	2			
E.A.3	Alter der Sonne								MV.G.E.1	1			
E.A.4	HRD als Entwicklungsdiagramm	T.G09.E.1	T.G99.E.4				S.G.E.1		MV.G.E.4	4			
E.B	Entwicklung des Universums												
E.B.1	Ursprung und Entwicklung des Universums		T.G99.E.5	T.R.E.3	SA.R.E.2 SA.R.E.5	SA.G.E.2 SA.G.E.14 SA.G.E.15 SA.G.E.3 SA.G.E.10 SA.G.E.11 SA.G.E.3 SA.G.E.10 SA.G.E.15	S.G.E.2 S.G.E.3 S.G.E.4	MV.G.E.5		6			
E.C	Sonstiges												
E.C.1	Galaxienarten entsprechend der Lebensstufen								SA.G.E.4	1			
E.C.2	Kosmologie und ART								SA.G.E.13	1			
E.C.3	Simulationen zur Darstellung von Prozessen				SA.R.E.3					1			
Summe		1	3	2	3	5	3	3	5				

Tabelle A.20: Fundstellen zum Themenfeld ohne Zuordnung.

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe	
		T-G-2009	T-G-1999	T-R-1999	SA-S-2009	SA-G-2003	S-G-2004	MV-A-2004		
oZ.A	Raumfahrt									
oZ.A.1	Entwicklung der Raumfahrt	T.G09.oZ.15				SA.G.oZ.2 SA.G.oZ.21		S.G.oZ.3		3
oZ.A.2	Internationaler Zusammenarbeit	T.G09.oZ.16				SA.G.oZ.5 SA.G.oZ.17				2
oZ.A.3	Antriebskonzepte (Raketenantriebe)									1
oZ.A.4	Konzepte zur Besiedlung des Weltalls	T.G09.oZ.17								1
oZ.A.5	Nutzen der Raumfahrt bewerten	T.G09.oZ.18								1
oZ.A.6	Physikalisch-technische Problem der Raumfahrt				SA.R.oZ.10 SA.R.oZ.12			S.G.oZ.2		2
oZ.A.7	Satelliten und Raumsonden					SA.G.oZ.1 SA.G.oZ.20				1
oZ.A.8	Ausgewählte Raumfahrtmission					SA.G.oZ.3 SA.G.oZ.22				1
oZ.B	Geschichte der Astronomie					SA.G.oZ.4 SA.G.oZ.16 SA.G.oZ.6 SA.G.oZ.18 SA.G.oZ.7 SA.G.oZ.19				
oZ.B.1	historische Forschungsergebnisse und deren Bedeutung									2
oZ.B.2	Wechselbeziehung zwischen Astronomie und Philosophie	T.G09.oZ.2							MV.G.oZ.4	1
oZ.B.3	Wechselbeziehung zwischen Erkenntnisstand und Fortschritt in Forschung und Technik	T.G09.oZ.1 T.G09.oZ.3								2

Fundstellen zum Themenfeld ohne Zuordnung. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004	
oZ.B.4	Weltbilder (beschreiben, einordnen)	T.G09.oZ.6	T.G99.oZ.3	T.R.oZ.2	SA.R.oZ.5 SA.R.oZ.9 SA.R.oZ.11	SA.G.M.3 SA.G.M.15 SA.G.M.16 SA.G.M.17 SA.G.E.12	MV.G.oZ.1	6	
oZ.B.5	Kopernikanisches Prinzip	T.G09.oZ.7						1	
oZ.C	Leben								
oZ.C.1	Entstehung von Leben							1	
oZ.C.2	Lebenszyklen vergleichen (historische, biologische und chemische Merkmale; Analogiebetrachtungen)	T.G09.oZ.12						1	
oZ.C.3	Außerirdisches Leben (künstlerische Darstellungen, Möglichkeiten der Existenz, Kontaktaufnahme)			T.R.oZ.1	SA.R.oZ.3	SA.G.oZ.28 SA.G.oZ.29 SA.G.oZ.30		5	
oZ.C.4	Bedeutung von Alltagsphänomenen für das Leben	T.G09.oZ.13	T.G99.oZ.2					1	
oZ.C.5	Besonderheit der Erde als Lebensraum (Voraussetzungen für Leben)	T.G09.oZ.19 T.G09.oZ.23			SA.R.oZ.2 SA.R.oZ.4		S.G.oZ.1	2	
oZ.D	Makro- und Mikrokosmos								
oZ.D.1	Makro- und Mikrokosmos							1	
oZ.D.2	Erforschung des Mikrokosmos (Überblick, Geräte)	T.G09.oZ.5						1	
oZ.D.3	Elementarteilchen	T.G09.oZ.10						1	
oZ.E	Umweltprobleme und Nachhaltiges Wirtschaften								

Fundstellen zum Themenfeld ohne Zuordnung. – Fortsetzung

Nr.	Inhalt	Fundstelle im Lehrplan							Summe
		T-Gym-2009	T-Gym-1999	T-Regel-1999	SA-Sek-2009	SA-Gym-2003	S-Gym-2004	MV-Alle-2004	
oZ.E.1	Verantwortung des Menschen für das Leben auf der Erde	T.G09.oZ.14			SA.R.oZ.16 SA.G.oZ.24 SA.G.oZ.27				3
oZ.E.2	Globale Probleme (Lösungsansätze)	T.G09.oZ.20 T.G09.oZ.21 T.G09.oZ.22 T.G09.oZ.24			SA.G.oZ.25 SA.G.oZ.26				2
oZ.E.3	Bedeutung der Sonne (unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit)				SA.R.oZ.14				1
oZ.E.4	Regionale Umweltprobleme				SA.G.oZ.23				1
oZ.F	Sonstiges								
oZ.F.1	Weltformel	T.G09.oZ.11							1
oZ.F.2	Regionale Astronomie		T.G99.oZ.1					MV.G.oZ.3	2
oZ.F.3	Gültigkeit von Hypothesen				SA.R.oZ.1				1
oZ.F.4	Astronomische Ereignisse verfolgen				SA.R.oZ.6 SA.R.oZ.13	SA.G.oZ.8 SA.G.oZ.12			2
oZ.F.5	Astronomische Forschungsergebnisse präsentieren				SA.R.oZ.7				1
oZ.F.6	Aufersschulische Lernorte				SA.R.oZ.8				1
oZ.F.7	Blick in den Weltraum als Blick in die Vergangenheit				SA.R.oZ.15				1
oZ.F.8	astronomische Phänomene (Physikalischer Hintergrund, Beobachtungsplanung, Dokumentieren des Verlaufs, Ergebnispräsentation)					SA.G.oZ.9 SA.G.oZ.14 SA.G.oZ.10 SA.G.oZ.11 SA.G.oZ.13			1
Summe		18	3	2	12	12	3	4	

B Begleitmaterial

B.1 Schülertext zum Modell I: Hauptreihensterne

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

Diagramme in denen zwei Zustandsgrößen gegeneinander aufgetragen werden, nennt man Zustandsdiagramme. Sie erlauben es, Beziehungen zwischen Zustandsgrößen aufzuzeigen. Das bekannteste Zustandsdiagramm in der Astronomie ist das Hertzsprung-Russell-Diagramm (kurz: HRD). In ihm ist die Leuchtkraft gegenüber der Oberflächentemperatur der Sterne aufgetragen.

Trägt man die Temperatur der Sterne, von hohen zu niedrige Temperaturen, auf der x-Achse und ihre Leuchtkraft, von niedrigen zu hohen Leuchtkräften, auf der y-Achse auf, so läuft eine besonders markante Struktur von links oben (große Helligkeiten bei hoher Temperatur) nach rechts unten (kleine Helligkeiten bei niedriger Temperatur) durch das Diagramm. Die Sterne sind also nicht etwa gleichmäßig über die gesamte Fläche des Diagramms verteilt, wie man es vielleicht vermuten würde. Diese Struktur nennt man die Hauptreihe. Die meisten beobachtbaren Sterne (etwa 90%) finden sich auf ihr wieder. Diese Sterne bezeichnet man auch als Hauptreihensterne. Ein Stern verbringt den längsten Teil seines Lebens auf der Hauptreihe, bevor sein Vorrat an Wasserstoff zu Neige geht und sich Temperatur und Leuchtkraft verändern.

Betrachtet man das Gebiet oberhalb der Hauptreihe, so findet man dort Sterne mit großer bis sehr großer Leuchtkraft vor, die gleichzeitig eine niedrige Oberflächentemperatur aufweisen. Weisen zwei Sterne die gleiche Oberflächentemperatur auf und lassen dennoch völlig verschiedene Leuchtkräfte erkennen, so ist dies nur durch stark unterschiedliche Radien zu erklären. Der Stern mit der größeren Leuchtkraft muss sehr viel größer sein. Es handelt sich um die Riesensterne. Sie haben ihren Wasserstoffvorrat nahezu ausgeschöpft und beginnen in ihrem Inneren Helium und andere Elemente zu fusionieren, wodurch sie sich aufblähen. Unterhalb der Hauptreihe, bei niedriger Leuchtkraft aber hoher Temperatur findet man eine weitere Gruppe von Sternen. Hohe Temperaturen bei gleichzeitig niedriger Leuchtkraft deuten auf sehr kleine Sterne hin. Die Farbe eines Sterns hängt von seiner Oberflächentemperatur ab. Bei Temperaturen von über 10 000 K erscheint ein Stern bläulich bis weiß. Wegen ihrer Größe und Farbe nennt man diese Sternpopulation daher Weiße Zwerge. Es handelt sich dabei um die Überreste von ehemaligen Riesensternen, die in den letzten Stadien ihrer Existenz ihre äußeren Hüllen abgestoßen haben. Übrig bleibt der sehr kleine (etwa der Größe der Erde entsprechende) aber dennoch heiße Kern, der nun über Milliarden von Jahre langsam abkühlt.

Aufgaben

1. Vergleichen Sie die Größen und Temperaturen der Sterne im Modell. Wir nehmen an, dass es sich hierbei um Sterne auf der Hauptreihe handelt.
2. Identifizieren Sie im Hertzsprung-Russell-Diagramm die Hauptreihe, den Riesenast und die Region der weißen Zwerge.
3. Tragen Sie die Position der Hauptreihensterne des Modells in das HRD ein. Nehmen Sie dazu die folgenden Temperaturen und Leuchtkräfte als bekannt an:
 - a) $T = 3\,500\text{ K}$; $L = 0,01 L_{\odot}$
 - b) $T = 6\,000\text{ K}$; $L = 1 L_{\odot}$
 - c) $T = 10\,000\text{ K}$; $L = 100 L_{\odot}$

B.2 Schülertext zum Modell II: Räumliches Sternbild

Die scheinbare und die wahre Position der Sterne

Schon seit den frühesten Anfängen der Menschheit haben die Völker die Sterne am Himmel durch gedachte Linien zu Bildern verknüpft. Sie erlauben uns einerseits uns am Himmel zurechtzufinden, können uns aber auch täuschen, wenn es darum geht, etwas über die wahre Natur des Universums herauszufinden.

So scheinen einige Sterne dicht beieinander zu stehen, in Wirklichkeit liegt zwischen Ihnen aber vielleicht eine Entfernung von vielen Lichtjahren. Solche Sterne bezeichnet man als optische Doppelsterne. Sterne die tatsächlich sehr nah beieinander stehen und sogar einen gemeinsamen Schwerpunkt haben – sich also gegenseitig umkreisen – bezeichnet man dagegen als physische Doppelsterne.

Auch über die wahre Natur des einzelnen Sterns verrät uns ein erster Blick an den Himmel zunächst wenig. So können zwei Sterne, die uns gleich hell erscheinen, tatsächlich vollkommen verschiedene physikalische Eigenschaften aufweisen. So mag es sich bei dem einen um einen Zwergstern von geringer Ausdehnung und Temperatur handeln und bei dem anderen um einen sehr massereichen Riesen, der die Leuchtkraft des Zwergsterns bei weitem übertrifft. Beide können uns jedoch gleich hell erscheinen, wenn etwa der Riese nur weit genug von uns entfernt ist.

Die scheinbare – von uns wahrgenommene – Helligkeit eines Sterns nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab, so wie wir es auch von anderen physikalischen Größen (etwa bei radioaktiver Strahlung) kennen. Ist ein Stern B doppelt so weit von uns entfernt wieder ein Stern A, so scheint er bei gleicher Leuchtkraft nur ein Viertel der Helligkeit von Stern A aufzuweisen.

Die scheinbare Helligkeit ist demnach kein verlässlicher Indikator für die Entfernung eines Sterns. Man bedient sich daher der Trigonometrie, um die Entfernung zu nahen Sternen zu ermitteln. Im Verlaufe eines Jahres – indem die Erde einmal um die Sonne läuft – scheint sich ein naher Stern vor dem weit entfernten Sternhintergrund zu bewegen. Je näher uns der Stern ist, desto stärker ist diese scheinbare Bewegung ausgeprägt.

Bei Kenntnis der Größe der Erdbahn (Radius = 150 Mio km = 1 Astronomische Einheit (AE)) und dem gemessenen Winkel p , lässt sich der Abstand r eines Sterns ermitteln durch:

$$r = \frac{1AE}{\sin p}$$

Ein sehr auffälliges Sternbild der Nordhimmels ist das Sternbild Kassiopeia. Es gehört zu den zirkumpolaren Sternbildern, d.h. es steht von Deutschland aus gesehen das ganze Jahr über dem Horizont. Die Form seiner 5 hellsten Stern erinnert an ein großes W, weshalb es gelegentlich auch als Himmels-W bezeichnet wird. Auf der Kopfseite des Modells ist das Sternbild so dargestellt, wie es dem Beobachter auf der Erde erscheint. Die Sterne erscheinen uns gleich hell – was durch die Größe der hölzernen Halbkugeln dargestellt ist – und in Form eines W angeordnet.

Könnte man jedoch seinen Standort derart verändern, dass man die Anordnung von der Seite betrachten kann, würde sich ein gänzlich anders Bild bieten. Verfolgt man die jeweiligen Sichtlinien (den Metallstab) zu ihren Sternen, so erreicht man diese nicht etwa nach den immer gleichen Abständen. Die Sterne sind vielmehr deutlich unterschiedlich weit von uns entfernt.

Auch sind die einzelnen Sterne nicht gleich groß, wie man es anhand der scheinbaren Helligkeit vermuten könnte. Es zeigt sich, dass die nächstgelegenen Sterne relativ klein sind, während ihre scheinbaren Nachbarn mit zunehmender Entfernung deutlich an Größe zunehmen.

Aufgaben

- a) Der uns nächstgelegene Hauptstern der Kassiopeia (kurz Cas β genannt) erscheint uns unter einem Parallaxenwinkel von $0,059''$ (0,059 Bogensekunden). Berechnen Sie die Entfernung zum Stern Cas β in Astronomischen Einheiten und in Lichtjahren.
 - b) Vergleichen Sie diese Entfernung mit den Dimensionen unseres Sonnensystems. Der äußerste Planet Neptun ist ca. 30 AE von der Sonne entfernt.
2. Die Parallaxe des größten Sterns der Kassiopeia liegt bei $0,0053''$. Ermitteln Sie wiederum die Entfernung in Astronomischen Einheiten und Lichtjahren.
3. Der nächste Nachbarstern der Sonne trägt den Namen Proxima Centauri. Seine Entfernung beträgt nur 4,22 Lichtjahre. Dementsprechend muss er auch die größte Parallaxe aller Sterne aufweisen. Wie groß ist die Parallaxe in Millibogensekunden?

B.3 Schülertext zum Modell III: Sonnenflecken

Sonnenflecken – Die wichtigste Erscheinung der Sonnenaktivität

Die wichtigste Form der Sonnenaktivität sind die leicht zu beobachtenden Sonnenflecken. Dabei handelt es sich um dunkle Stellen auf der sonst gleichmäßig hellen Sonnenoberfläche. Sonnenflecken treten meist in Gruppen auf. Die einzelnen Gebilde sind dabei unterschiedlich groß, wobei kleine Flecken häufiger auftreten als Große. Ihr Durchmesser reicht von 5 000 bis zu 80 000 km, wodurch sie auch ohne Teleskop von der Erde aus zu beobachten sind.

Der einzelne Sonnenfleck besteht aus einem dunklen Kern – der sogenannten Umbra – und einem etwas weniger dunklen Gebiet drum herum, man nennt es Penumbra. Die Bezeichnungen stammen aus dem lateinischen und bedeuten Kernschatten (Umbra) und Halbschatten (Penumbra). Dabei handelt es sich natürlich nicht um wirkliche Schatten, lediglich die stark ausgeprägten Übergänge in der Helligkeit erinnern uns daran.

Sonnenflecken verändern mit der Zeit ihre Ausdehnung und Form. Sie verschmelzen zu immer größeren Flecken oder lösen sich auf. Die kleinsten Flecken bestehen meist nur für einen Tag. Nach zwei Tagen sind bereits 60% aller Flecken wieder verschwunden und nach 11 Tagen sogar 95%. Da die Lebensdauer der Sonnenflecken direkt proportional zu ihrer Ausdehnung ist, können besonders große Fleckengruppen jedoch auch bis zu 100 Tage überdauern.

Gegenüber der ungestörten Photosphäre der Sonnen ist die Temperatur im Zentrum der Flecken stark herabgesetzt. Sie liegt bei nur 3 700 K gegenüber der üblichen Temperatur von 5 700 K. Durch die niedrigere Temperatur strahlt die Umbra weniger sichtbares Licht aus. Ihre Helligkeit liegt bei nur 5 bis 15% der Umgebungshelligkeit.

Aus der Umbra entspringen starke Magnetfelder von 0,2 bis 0,4 T. Die Feldlinien treten in der Mitte des Flecks fast senkrecht zur Sonnenoberfläche aus. Die bereits erwähnte scharfe Begrenzung der Umbra nach außen hin, ist ein Zeichen für die starke Bündelung der Magnetfeldlinien. Die Feldlinien werden durch den Gasdruck der umgebenden Photosphäre zusammengehalten. Gleichzeitig tragen die Feldlinien wiederum zur Stabilisierung des Flecks bei, der sonst wegen des niedrigeren Drucks in seinem Inneren kollabieren würde.

Das Magnetfeld ist ebenfalls für die niedrige Temperatur des Flecks verantwortlich. In den oberen Schichten der Sonnenatmosphäre erfolgt der Energietransport per Konvektion, welche durch die starken Magnetfelder unterbunden wird. Somit kann an diesen Stellen kaum noch heißes Gas an die Oberfläche gelangen. Meist treten Sonnenflecken nicht einzeln sondern in Gruppen auf. Eine idealtypische Konstellation sieht so aus:

- Zwei Flecken der Gruppe treten durch ihre Größe besonders hervor (die Hauptflecken).
- Die Hauptflecken stehen in Rotationsrichtung (von Ost nach West) hintereinander.
- Der vorangehende Hauptfleck (p-Fleck, engl. preceding) ist dem Äquator etwas näher als der nachfolgende Hauptfleck (f-Fleck, engl. following).

Fleckengruppen werden gemäß der Struktur ihres Magnetfeldes klassifiziert. Haben alle Flecken die gleiche Polarität (nur Nord- oder Südpole), wird die Gruppe als unipolar bezeichnet. Als bipolar bezeichnet man diejenigen Gruppen, bei denen die Hauptflecken entgegengesetzt polarisiert sind. 90% aller Sonnenfleckengruppen sind bipolar.

Dabei lässt sich weiterhin die folgende Beobachtung machen: Während eines Sonnenfleckenzyklus von 11 Jahren Dauer sind alle p-Flecken der einen Halbkugel Nordpole. Auf der entgegengesetzten Hemisphäre hingegen sind alle p-Flecken Südpole. Im folgenden Fleckenzyklus kehren sich die Polaritätsverhältnisse um. Die Polarität der p-Flecken ist innerhalb eines Zyklus jeweils entgegengesetzt zur Polarität des Sonnenmagnetfeldes am Pol der jeweiligen Hemisphäre.

Durch Beobachtungen wird täglich die sogenannte Sonnenfleckenrelativzahl R ermittelt. Sie ist definiert durch:

$$R = 10g + f.$$

Darin ist g die Anzahl der Fleckengruppen und f die Anzahl der Einzelflecken. Ist z.B. nur ein einzelner Fleck, ohne eine Gruppe sichtbar, ist $R = 11$. Innerhalb des Aktivitätsmaximums können Werte von $R = 300$ erreicht werden.

Aufgaben

1. Suchen Sie auf der Oberfläche des Modells nach Sonnenflecken. Woran können Sie diese erkennen?
2. Aus wie vielen Einzelflecken bestehen die Sonnenfleckengruppen?
3. Untersuchen Sie die einzelnen Sonnenfleckengruppen genauer. Entsprechen die Anordnungen der idealtypischen Konstellation, wie sie im Text beschrieben wird?
4. Wie verhalten sich die Magnetfelder der Flecken in einer Gruppe zueinander? Vergleichen Sie die Magnetfelder der Gruppen in der nördlichen und südlichen Hemisphäre.
5. Bestimmen Sie anhand Ihrer Beobachtungen die Sonnenfleckenrelativzahl.

B.4 Schülertext zum Winkelmesser

Der Sonnennavigator

Der einfache Merkspruch zum Verlauf der Sonne dürfte uns allen bekannt sein: Im Osten geht die Sonne auf, im Süden nimmt sie ihren Lauf, im Westen will sie untergehen, im Norden ist sie nie zu sehen.

Tatsächlich geht die Sonne nur an 2 Tagen des Jahres genau im Osten auf und im Westen wieder unter. Dies geschieht zu den Tag-und-Nachtgleichen am 21.03 und 22.09. An diesen Tagen sind Tag und Nacht gleich lang. Beobachtet man die Sonne über den Tagesverlauf, so zeigt sich, dass die im Süden ihre größte Höhe erreicht. Im Zenit, d.h. senkrecht über unseren Köpfen steht sie in Deutschland jedoch nie. Von Sonnenauf- bis Untergang beschreibt die Sonne dabei einen großen Bogen am Himmel. Dies ist der sogenannte Tagbogen der Sonne. Im Sommer erreicht die Sonne zur Mittagszeit eine größere Höhe über dem Horizont. Gleichzeitig geht sie in nordöstlicher Richtung auf und in nordwestlicher Richtung unter. Das bedeutet, dass der Tagbogen im Sommer viel länger ist, als im Winter.

Da die Sonne im Sommer im Vergleich zum Winterhalbjahr auch sehr hoch am Himmel steht, wird es dadurch sehr viel wärmer. Die Jahreszeiten werden durch den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen hervorgerufen.

Die Abbildung zeigt die Tagbögen für verschiedene Tage des Jahres im Vergleich. Die größte Höhe des Sonnenstandes hängt dabei auch vom Beobachtungsstandort ab. Die Tagbögen sind daher beispielhaft für den 51. Breitengrad dargestellt, der auch in der Nähe von Marburg verläuft.

Die Position der Sonne lässt sich durch verschiedene Koordinatensysteme ausdrücken. Wir wollen an dieser Stelle das Horizontsystem verwenden. Es gibt die Position eines Objektes durch seine Richtung (Azimut) und Höhe an. Der Azimut wird in der Astronomie meist von Süden (0°) über Westen (90°), Norden (180°) zur östlichen Richtung (270°) hin gemessen. Die Höhe nimmt vom Horizont (0°) in Richtung Zenit (90°) zu.

Um die Position der Sonne zu ermitteln, verwenden wir einen Winkelmesser, der die Helligkeit kleiner Himmelsausschnitte bestimmen kann. Dazu besitzt er 2 Paare von Fotowiderständen, von denen jeweils 2 durch einen Schattenwerfer getrennt sind. Erfolgt der Lichteinfall genau senkrecht, so weisen die Widerstände die gleichen Werte auf. Die Differenz der Widerstandswerte wird von dem Gerät als Ton ausgegeben, wobei bei gleichen Werten die Tonhöhe bei 50 Hz liegt und der Ton bei größeren Differenzen immer heller wird.

Wir wollen nun die Position der Sonne bestimmen und mit den Tagbögen zu verschiedenen Zeiten des Jahres vergleichen. Das Messgerät muss auf einem waagerechten Untergrund stehen und zuerst mit Hilfe des Kompass nach Süden ausgerichtet werden. Wir bereiten den Winkelmesser zunächst auf seinen Einsatz vor:

- Höhenzeiger auf etwa 45° einstellen
- Schalter Richtung/Helligkeit auf Richtung einstellen

- Schalter Azimut/Höhe auf Azimut einstellen
- Den Winkelmesser einschalten und die Lautstärke so einstellen, dass der Ton gut zu hören ist

Jetzt folgenden die Schritte zum Auffinden der Sonne:

1. Winkelmesser drehen, bis die Stelle mit dem tiefsten Ton erreicht ist
2. Umschalten auf Höhenmessung
3. Vorsichtiges Bewegen des Höhenzeigers bis tiefster Ton erreicht ist
4. Umschalten auf Richtungsmessung
5. Zurück zu Punkt 1

Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Stelle am Himmel gefunden ist, die dem tiefsten Ton von etwa 50 Hz entspricht. Wir lesen nun die Koordinaten für Azimut und Höhe an den Skalen ab und notieren diese.

Ob die Sonne tatsächlich an diesem Punkt steht, können wir aber noch nicht entscheiden. Entscheidend ist, ob der Himmel bewölkt ist. Wir müssen also die absolute Helligkeit in Erfahrung bringen.

Dazu wird jetzt, ohne das Gerät zu bewegen, der Schalter Richtung/Helligkeit auf den Messmodus für die Helligkeit umgestellt. Wir erhalten nun wieder einen Ton, dessen Höhe der Helligkeit des eingestellten Objektes entspricht. Ist die Frequenz kleiner als 300 Hz handelt es sich wahrscheinlich um die Sonne. Bei einer Frequenz von 50 Hz können wir uns wirklich sicher sein, die Sonne an einem nicht oder kaum bewölkten Himmel gefunden zu haben.

Der gewonnene Messwert lässt sich jetzt mit den verschiedenen Tagbögen für Marburg vergleichen.