



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Die Physik des Himmels begreifen

Konzeption einer astronomischen Führung zur
Transformation von Präkonzepten des Themenbereichs
„Gravitation“ an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte Bamberg

Zulassungsarbeit für das erste Staatsexamen

Eingereicht von: Leonard Billing

Matrikelnummer: 22704285

Betreuerin: Prof. Dr. Manami Sasaki

Zusammenfassung

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht die Entwicklung eines didaktischen Konzepts im Rahmen der Neugestaltung einer Führung für Kinder und Schulklassen an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte Bamberg. Dabei stellt das Phänomen der Gravitation einen thematischen Überbau dar und steht sowohl im Zentrum der fachwissenschaftlichen als auch der didaktischen Überlegungen. Zunächst werden hierfür all jene astrophysikalischen Hintergründe thematisiert (von der klassischen Mechanik über die Relativitätstheorie bis hin zu Spezialfällen der Gravitation) welche die Basis für die in der Führung angesprochenen Inhalte und den späteren Umgang mit Schülervorstellungen darstellen. Denn astronomische Themen werden trotz ihrer nicht immer offensichtlichen, aber doch nicht zu leugnenden Relevanz für Alltag und Weltverständnis im schulischen Kontext oft vernachlässigt und sind somit besonders anfällig für Präkonzepte. Daher stellt das zweite Kapitel zunächst einige physikdidaktische Modelle zur Transformation dieser vorwissenschaftlichen Konzepte theoretisch dar und führt anschließend die fachlichen Inhalte und die Perspektive der Lernenden systematisch zusammen. Letzteres geschieht, indem die Ausgestaltung der Führung mitsamt modellhafter Experimente – insbesondere mit einem eigenständig konstruierten Gravitationstisch – vorgestellt und didaktisch begründet wird, wobei ein besonderer Fokus auf der Förderung des konzeptuellen Verständnisses durch interaktive Elemente liegt. Die Stationen versuchen, durch die gezielte Nutzung von Analogien und Veranschaulichungen kognitive Dissonanzen auszulösen, welche zu einem Konzeptwechsel und somit zu einem nachhaltigen Lernprozess anregen sollen. Die Arbeit zeigt außerdem, auf welche Weise die Sternwarte als außerschulischer Lernort neben der Wissensvermittlung auch zur Förderung von Interesse, Neugier und naturwissenschaftlicher Denkweise beitragen kann.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IX
Einleitung und Vorüberlegungen	X
1 Astrophysikalischer Hintergrund	1
1.1 Grundlagen der Gravitation	1
1.1.1 Die Keplerschen Gesetze	1
1.1.2 Isaac Newtons Gravitationsgesetz	6
1.1.3 Gravitation und Trägheit	7
1.1.4 Notwendigkeit einer neuen Theorie	8
1.1.5 Albert Einsteins Relativitätstheorie	9
1.1.6 Herleitung der relativistischen Periheldrehung	10
1.1.7 Zeitdilatation	18
1.2 Das Erde-Mond-System	19
1.2.1 Umlaufbahnen von Erde und Mond	19
1.2.2 Gezeitenkräfte und gebundene Rotation des Mondes	21
1.2.3 Neigung der Erdachse und Entstehung der Jahreszeiten	22
1.2.4 Mondphasen	23
1.2.5 Sonnen- und Mondfinsternisse	24
1.3 Zur Funktionsweise von Weltraumflügen	25
1.4 Sonderfälle der Gravitation	28
1.4.1 Schwarze Löcher	29
1.4.2 Doppelsternsysteme	32
1.4.3 Gravitationswellen	34

2	Didaktisch-methodische Konzeption der Führung	36
2.1	Zielgruppe und Rahmenbedingungen	36
2.1.1	Struktur, Dauer und Organisation	36
2.1.2	Adressatenanalyse – Astronomie für Kinder und Jugendliche	38
2.1.3	Lerndesign und Zielsetzung	39
2.1.4	Begründung der thematischen Schwerpunktsetzung	41
2.1.5	Die Sternwarte als Lernort	41
2.2	Didaktisch-methodische Grundlagen	42
2.2.1	Präkonzepte als Ausgangspunkt didaktischer Planung	42
2.2.2	Lernen durch Konzeptwechsel	45
2.2.3	Didaktische Rekonstruktion astrophysikalischer Inhalte	46
2.3	Methodik und Umsetzung der einzelnen Stationen	49
2.3.1	Begrüßung und Verhalten in der Forschungseinrichtung	49
2.3.2	Modell des Sonnensystems (Tellurium)	50
2.3.3	Konzeptwechsel zu Mondphasen	52
2.3.4	Konzeptwechsel zur gebundenen Rotation des Mondes	55
2.3.5	Konzeptwechsel zu Jahreszeiten	56
2.3.6	Konzeptwechsel zur Gravitation (Gravitationstisch)	57
2.3.7	Konzeptwechsel zu Größen- und Abstandsverhältnissen	66
	Fazit und Schlussbetrachtung	70
	Literaturverzeichnis	74
	Anhang	81
	Erklärung zur Hausarbeit gemäß 29 (Abs.6) LPOI	86

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Darstellung der Perihelpräzession einer gebundenen Umlaufbahn um ein sphärisches Zentralobjekt (Hartle, 2021, Fig. 9.6). Während sich im idealisierten Newtonschen Zweikörperproblem die Bahn exakt schließt, ergibt sich in der allgemeinen Relativitätstheorie eine leichte Abweichung: Die Position des inneren Umkehrpunktes (Perihel) verschiebt sich mit jeder Umrundung um den Winkel $\delta\varphi_p$ 14
- Abbildung 2: Die siderische Periode (lat. *sidus* „der Stern“) meint die Zeit für einen vollständigen 360° Umlauf des Mondes um die Erde vor dem Fixsternhimmel. Die synodische Periode des Mondes bezeichnet die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Stellungen bezüglich Erde und Sonne (Glistau, 2015) . 20
- Abbildung 3: Schematische Darstellung der gebundenen Rotation des Mondes: Nur durch eine Angleichung der Eigenrotation auf die Umlaufzeit bleibt dieselbe Seite des Mondes von der Erde aus sichtbar. Durch Gezeitenreibung wurde die Rotation des Mondes gebremst und an die Umlaufperiode angepasst (Titz, 2015) . . 21
- Abbildung 4: Heliozentrische Geschwindigkeit der Raumsonde *Voyager 2* im Vergleich zur Fluchtgeschwindigkeit aus dem Sonnensystem in Abhängigkeit vom Sonnenabstand. Deutlich sichtbar sind die Geschwindigkeitszuwächse bei den swing-by-Manövern an Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun (Matousek, 2025). (Farben wurden vom Verfasser verändert.) 28

Abbildung 5: Erstes direktes Bild eines Schwarzen Lochs: Das Event Horizon Telescope (EHT) zeigte im April 2019 die Schattenstruktur des supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87. Deutlich erkennbar ist der durch gravitative Lichtablenkung entstehende leuchtende Ring um die ‚dunkle‘ Zentrumsregion. (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). 29

Abbildung 6: Künstlerische Darstellung einer Neutronensternkollision und der daraus resultierenden Kilonova: **1)** Zwei Neutronensterne umkreisen sich und senden Gravitationswellen aus, wodurch sie einander spiralförmig annähern. **2)** In den letzten Millisekunden verschmelzen sie und erzeugen einen kurzen Gamma- blitz. **3)** Radioaktives Material wird herausgeschleudert und leuchtet nach kurzer Zeit im Infrarot – ein Phänomen, das als *Kilonova* bezeichnet wird. **4)** Zurück bleibt ein massereiches kompaktes Objekt (entweder ein Schwarzes Loch oder ein massereicher Neutronenstern) mit einer expandierenden Trümmer- scheibe und ausströmendem Teilchenwind (NASA, 2025). 34

Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung des Sonnensystems mit stark verzerr- ten Größen- und Abstandsverhältnissen. Derart nicht maß- stabsgetreue Illustrationen prägen oft das Vorstellungsbild von Lernenden und können zu Präkonzepten führen, etwa der An- nahme, die Planeten seien ähnlich groß und gleichmäßig verteilt (Goruma, 2024). 44

Abbildung 8: Ein Mädchen (Lucy) behauptet, Schnee komme aus dem Bo- den – Der Junge (Charlie Brown) fragt, wie der Schnee dann durch den Bürgersteig kommt. Die neue, nicht erklärbare Si- tuation löst einen kognitiven Konflikt aus, der zur ersten Bedin- gung des Konzeptwechsels nach Posner führt: Unzufriedenheit mit dem bisherigen Erklärungsmodell, welche hier allerdings in Frustration ausartet, da keine attraktive Alternative dargebo- ten wurde (Schulz, 1955). 45

Abbildung 9: Das Modell der didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann et al.: Die didaktische Planung basiert auf drei wechselseitig aufeinander bezogenen Aufgabenbereichen – der fachlichen Klärung, der Diagnose von Lernvoraussetzungen und der didaktischen Strukturierung. Ziel ist die Entwicklung von Lernangeboten, die sowohl wissenschaftlich fundiert als auch anschlussfähig für die Lernenden sind (Kattmann, 2015). 47

Abbildung 10: Die Karikatur zeigt, wie Begriffe im Unterricht individuell interpretiert werden: Der Lehrer erklärt „die Kartoffel“, der Schüler denkt an Pommes. Sie illustriert, dass fachliche Inhalte durch subjektive Vorstellungen der Lernenden gefiltert werden und daher eine bewusste Auseinandersetzung mit Alltagsvorstellungen erforderlich ist (Kattmann, 2015). 49

Abbildung 11: Das elektrisch betriebene Tellurium in der Haupthalle der Sternwarte veranschaulicht die Bewegung von Erde und Mond im inneren Sonnensystem. Als didaktisches Modell unterstützt es die Einführung in grundlegende astronomische Konzepte. . . 51

Abbildung 12: Darstellung der vier Hauptphasen des Mondes im eingebundenen Schülerversuch. Die Versuchsperson hält einen Styroporball als „Mond“ leicht über Kopfhöhe und dreht sich im Licht einer fixen Lichtquelle. Die Beleuchtungssituation wird aus der Perspektive der „Erde“ beobachtet und zeigt exemplarisch, wie sich die sichtbare beleuchtete Fläche des Mondes je nach Stellung im Umlauf verändert (eigene Darstellung). 54

Abbildung 13: Schematische Darstellung zweier Bewegungsmodelle zur Mondrotation im eingebundenen Schülerexperiment. Links: Der Mond bewegt sich ohne Eigenrotation um die Erde – aus Sicht der Erde ändert sich dadurch kontinuierlich das sichtbare „Gesicht“ des Mondes. Rechts: Der Mond führt bei jeder Viertel-Umlaufbewegung auch eine Viertel-Drehung um die eigene Achse aus. Durch diese gebundene Rotation bleibt aus Sicht der Erde immer dieselbe Seite des Mondes sichtbar – dies entspricht der realen Bewegung des Mondes im Erde-Mond-System (eigene Darstellung). 56

Abbildung 14: Gravitationstisch im aufgebauten Zustand mit eingesenktem Tuch durch eine zentrale Masse von 1 kg. Die symmetrische Verformung des bielastischen Gewebes veranschaulicht die Raumzeitkrümmung um eine große Masse im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie (eigene Darstellung). 58

Abbildung 15: Demonstration der Raumzeitkrümmung mithilfe des Gravitationstischs. Eine zentrale Masse (orange Kugel) erzeugt eine symmetrische Einsenkung im elastischen Tuch. Eine Murmel wird am Rand mit Tangentialimpuls angestoßen und folgt einer gekrümmten Bahn um die zentrale Masse. Die weiße Pfeillinie visualisiert die Bahn der Murmel als Annäherung an eine Geodäte in der gekrümmten Raumzeit. Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video). 61

Abbildung 16: Darstellung einer Mondumlaufbahn (grüner Pfeil) um die Erde auf dem Gravitationstisch. Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video). 62

Abbildung 17: Demonstration eines swing-by-Manövers mit dem Gravitationstisch. Eine Murmel (Raumsonde) wird zunächst in Richtung einer zweiten Masse (z.B. Mond) geschickt und dort durch die Krümmung des Tuchs umgelenkt. In Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Anflugwinkel kann sie auf eine Rückflugbahn zur Erde gelenkt oder auf eine beschleunigte Flugbahn zu einem anderen Ziel gebracht werden – ganz ohne weiteren Energieaufwand. Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video). 63

Abbildung 18: Entstehung eines Ringsystems auf dem Gravitationstisch: Links werden viele kleine Murmeln gleichzeitig und tangential zur zentralen Masse freigesetzt. Die inneren Kugeln erfahren dabei eine stärkere Krümmung der ‚Raumzeit‘ und bewegen sich schneller als die äußeren. Rechts ist erkennbar, wie sich die ursprünglich kompakte Verteilung allmählich auflöst und in differenzierten Umlaufbahnen zu einem Ringsystem entwickelt. Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video). 64

Abbildung 19: Modellhafte Darstellung der Entstehung des Sonnensystems mit dem Gravitationstisch: Links: Viele kleine Kugeln (Materie und Staubteilchen) werden aus unterschiedlichen Richtungen auf das Tuch geworfen, was zunächst zu einem unstrukturierten System aus Kollisionen und Überlagerungen führt. Rechts: Im Laufe der Zeit dominiert eine gemeinsame Rotationsrichtung und es bildet sich eine rotierende Scheibe mit Teilchenkondensation als Analogie für die Entstehung von Planeten. Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video). . . 65

Abbildung 20: Satellitenaufnahme der Dr. Karl Remeis-Sternwarte in Bamberg (Google LLC, 2025). Mithilfe des Tools „Entfernung messen“ wurden die maßstabgetreuen Abstände der inneren Planeten visualisiert. Grundlage ist der in dieser Arbeit verwendete Maßstab von 1 : 3,5 Milliarden (eigene Darstellung). . . . 68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßstabsgetreue Größen und Entfernungen im Sonnensystem (Der Maßstab beträgt 1 : 3,5 Milliarden)	81
Tabelle 2: Übersicht der in der vorliegenden Arbeit behandelten Stationen . .	82
Tabelle 3: Übersicht der hier nicht vorgestellten Stationen (siehe (Nagel, 2025))	83

Einleitung und Vorüberlegungen

Der Stellenwert der Astronomie im naturwissenschaftlichen Unterricht und die Sternwarte als Lernort

Die Astronomie ist „die Wissenschaft vom Universum, das die Erde als wunderbaren Spezialfall hervorgebracht hat“ (Clausnitzer, 2021). Sie öffnet als interdisziplinäre Wissenschaft die Grenzen verschiedener Fachgebiete und beschränkt sich somit nicht nur auf physikalische Zusammenhänge. Inhalte aus der Mathematik, Technik und Raumfahrt, Informatik, Chemie, Geografie und sogar aus den gesellschaftswissenschaftlichen Bereichen werden in der Astronomie kombiniert. Somit stellt das Fach Astronomie eine ideale Plattform für fächerübergreifendes Lernen dar, weil Schülerinnen und Schüler (in Folge abgekürzt als SuS) durch die Einbettung von astronomischen Themen in einen breiteren Kontext „diese großen Zusammenhänge unserer Existenz interdisziplinär interpretieren“ (ebd.) können.

Im Gegensatz zu anderen Naturwissenschaften ist die Astronomie bei ihrer Forschungstätigkeit nahezu vollständig auf die reine Beobachtung ihres Gegenstandes begrenzt, eine Interaktion mit demselben ist hier nur äußerst begrenzt möglich. Martin Wagenschein macht deutlich, wie wichtig es sei „die Natur ausreden zu lassen, [ihr] nicht gleich ins Wort [zu] fallen“ (Wagenschein, 1968) und betont dabei den phänomenologischen Charakter der Astronomie als Vorteil gegenüber anderen Naturwissenschaften. Dies bedeutet im Kern, die Gesetze der Natur aus den Beobachtungen zu extrahieren, ohne voreilige Schlüsse zu ziehen.

Im Astronomieunterricht lassen sich daher in besonderer Weise die Prinzipien wissenschaftlichen Arbeitens erlernen, indem Phänomene zunächst empirisch betrachtet werden, anschließend aus der Erkenntnis einer Struktur eine Theorie formuliert und diese zum Schluss mithilfe experimenteller Überprüfungen in neue Theorien oder

Vorhersagen überführt wird.

Trotz der eben geschilderten Relevanz der Astronomie für den Unterricht sieht der neue Lehrplan für die Gymnasien in Bayern lediglich ca. 6 Stunden Astronomieunterricht in der 11. Klasse vor. Hierdurch wird den SuS lediglich die Möglichkeit geboten, grundlegende physikalische und historische Erkenntnisse innerhalb des Themas „Astronomische Weltbilder“ (ISB, 2025a) zu generieren – so lernen sie beispielsweise den Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild kennen – alles Weiterführende bleibt jedoch denjenigen vorbehalten, die sich dazu entschließen, in der 13. Klasse ein entsprechendes Wahlfach zu belegen. Dadurch wird klar, dass ein umfassendes Verständnis astronomischer Phänomene nur einer begrenzten Anzahl von SuS zugänglich ist, während der Großteil lediglich eine grundsätzliche Einführung erhält.

Die Sternwarte spielt daher eine wichtige Rolle als Lernort für die Vermittlung astronomischen Wissens, insbesondere da der Lehrplan, wie eben geschildert, keinen Raum für eine tiefgreifende Beschäftigung mit diesen Themen einräumt. Ein Besuch von nur zwei Stunden entspricht bereits einem Drittel des gesamten verpflichtenden Astronomieunterrichts der Schule. Dadurch besteht die Möglichkeit, im Rahmen eines solchen zusätzlichen Lernangebots bestehende Wissenslücken zu schließen und sogar über die in der Schule vermittelten Grundlagen hinauszugehen.

Die größte Bedeutung der Sternwarte als Lernort (und somit auch der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit) liegt jedoch darin, dass sie sich zielgerichtet, überprüfend und korrigierend mit bestehenden (teilweise problematischen) Präkonzepten auseinandersetzt, die viele Menschen im Bezug auf astronomische Phänomene mitbringen [siehe hierzu genauer Kapitel 2.2.1]. Außerdem besitzt sie das Potenzial, durch ihre Anschaulichkeit und Authentizität das Interesse ihrer Besucher an der Wissenschaft der Gestirne zu wecken.

Zielsetzung und Relevanz der Arbeit

„Der Weltraum, unendliche Weiten...“ (Roddenberry, 1966) – ein Zitat, das sicherlich die Herzen aller Science-Fiction-Fans höherschlagen lässt. Doch die berühmten ersten Worte der Kultserie „Raumschiff Enterprise“ könnten kaum passender gewählt worden sein. Seit jeher ist der Mensch fasziniert vom Universum mit seinen unvorstellbaren Dimensionen und Phänomenen, die ihn immer wieder inspirieren und

herausfordern. Doch trotz dieser Faszination stößt man häufig auf Missverständnisse, selbst hinsichtlich der grundlegendsten astronomischen Konzepte (Schecker u. a., 2018).

Diese Arbeit widmet sich daher der Frage, auf welche Weise astronomische Sachkompetenz möglichst nachvollziehbar und nachhaltig vermittelt werden kann. Der Fokus liegt dabei zwar auch auf dem Wissenserwerb, vor allem jedoch auf der Bearbeitung der oben angesprochenen Präkonzepte, die oft tief im Alltagsverständnis der Menschen verankert sind.

Im speziellen Kontext dieser Arbeit steht die Neukonzeption der Führungen für Kinder und Schulklassen an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte in Bamberg im Mittelpunkt. Ein großer Teil der Führungen beinhaltet dabei Experimente, die so oder so ähnlich auch im Klassenzimmer durchgeführt werden könnten und die auf spielerische Art und Weise wesentliche Phänomene des Universums rund um das Konzept der Gravitation verständlich und zielgruppengerecht darstellen.

1 Astrophysikalischer Hintergrund

1.1 Grundlagen der Gravitation

Die Gravitation stellt eine der vier fundamentalen Kräfte¹ der Physik dar, welche die Wechselwirkungen aller Objekte im Universum konstituieren. Eine für das Auge unsichtbare „Kraft“, die unter anderem die Bewegung aller Himmelskörper im gesamten Universum erklärt, Planeten an Sterne bindet, Galaxien zusammenhält und sogar das Licht selbst krümmen kann.

In den folgenden Kapiteln sollen zunächst – in historisch korrekter und sinnvoller Reihenfolge – die auf Himmelsbeobachtung basierenden, empirisch gewonnenen Gesetze der Planetenbewegungen von Johannes Kepler vorgestellt werden. Daraufhin wird der theoretische Fokus auf das 17. Jahrhundert gerichtet, dem es gelang, allgemeingültige Aussagen zu formulieren, welche schließlich die entscheidende Verbindung zwischen der Mechanik der Erde und des Himmels herstellen konnten. Hierbei soll vor allem die newtonsche Gravitationslehre im Zentrum stehen, welche auf der zentralen Erkenntnis ihres Namensgebers beruht, dass der berühmt gewordene Apfel genauso vom Baum fällt, wie der Mond in Richtung Erde. Dieses Gesetz konnte nicht nur die Bewegung der Himmelskörper physikalisch erklären, sondern auch die Keplerschen Gesetze, welche zunächst nur als Beobachtungsgesetze formuliert waren, vollständig mathematisch herleiten, was im Anschluss an die folgenden Kapitel im Ansatz gezeigt wird.

1.1.1 Die Keplerschen Gesetze

Johannes Kepler (1571-1630) war ein bahnbrechender deutscher Astronom, Mathematiker und Physiker, der mit seiner Formulierung der drei Kepler-Gesetze den

¹Neben der elektromagnetischen, sowie der starken und schwachen Kernkraft (Meschede, 2005).

Grundstein für das moderne Verständnis der Planetenbewegungen legte. Mithilfe der Daten von Tycho Brahe war es ihm möglich, rein empirisch die Bahnen der Planeten akkurat zu beschreiben. In diesem Kapitel werden dennoch die Gesetze einzeln analytisch hergeleitet, wobei wichtig zu erwähnen ist, dass dies mit Methoden geschieht, die erst in Folge der Newtonschen Mechanik einige Jahre später hinzukamen. Die Herleitungen basieren dabei grundlegend auf (Bronstein u. a., 2013; Demtröder, 2006; Gubler und Hepp, 2011).

1. Gesetz – Die Ellipsenbahnen

Lange Zeit wurde angenommen, dass sich Planeten auf perfekten Kreisbahnen bewegen, doch Kepler fand heraus, dass die Bahnen tatsächlich elliptisch um die Sonne verlaufen, wobei diese in einem der beiden Brennpunkte liegt. Zur Beschreibung der Bewegung in der Ebene wird das Problem in Polarkoordinaten $(r(t), \varphi(t))$ formuliert, wobei die Bahnkurve vollständig durch den Abstand r zum Zentralkörper und den Winkel φ beschrieben wird. Dabei bezeichnet m die Masse des Trabanten, M die Masse des Zentralkörpers, v die Bahngeschwindigkeit und G die Gravitationskonstante. Zugunsten der Übersichtlichkeit wird die Zeitabhängigkeit von $r(t)$ und $\varphi(t)$ im Folgenden nicht mitgeschrieben. Die Herleitung beginnt mit der Energieerhaltung

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{konst.} \quad (1.1)$$

mit

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{m}{2}(v_r^2 + v_\varphi^2) = \frac{m}{2}\dot{r}^2 + \frac{m}{2}r^2\dot{\varphi}^2 \quad (1.2)$$

und der Drehimpulserhaltung

$$L = mr^2\dot{\varphi} = \text{konst.} \rightarrow \dot{\varphi} = \frac{L}{mr^2} \Leftrightarrow L^2 = m^2r^4\dot{\varphi}^2 \rightarrow r^2\dot{\varphi}^2 = \frac{L^2}{m^2r^2}, \quad (1.3)$$

wobei $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ und $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$. Mit Gleichung 1.3 in 1.2 und 1.2 in 1.1 kann man nach \dot{r} auflösen:

$$E = \frac{m}{2}\dot{r}^2 + \frac{L^2}{2mr^2} + E_{\text{pot}} \Rightarrow \dot{r} = \sqrt{\frac{2}{m} \left(E - E_{\text{pot}} - \frac{L^2}{2mr^2} \right)} \quad (1.4)$$

Um $\varphi(r)$ zu erhalten, muss nun mit $\frac{\dot{\varphi}}{r} = \frac{d\varphi}{dr}$ folgendes Integral berechnet werden:

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{\frac{L}{mr^2}}{\sqrt{\frac{2}{m} \left(E - E_{\text{pot}} - \frac{L^2}{2mr^2} \right)}} \iff \int d\varphi = \int \frac{\frac{L}{mr^2} dr}{\sqrt{\frac{2}{m} \left(E - E_{\text{pot}} - \frac{L^2}{2mr^2} \right)}} \quad (1.5)$$

Mit $E_{\text{pot}} = -G\frac{Mm}{r}$ und der Substitution von $\frac{1}{r}$ kann das Integral gelöst werden und ergibt:

$$\varphi(r) = \arccos \left(\frac{\frac{L^2}{r} - Gm^2M}{\sqrt{(Gm^2M)^2 + 2mEL^2}} \right) = \arccos \left(\frac{\frac{L^2}{rGm^2M} - 1}{\sqrt{1 + \frac{2EL^2}{G^2M^2m^3}}} \right) \quad (1.6)$$

Durch geeignete Definition der Bahngrößen

$$p = \frac{L^2}{Gm^2M} \quad (= a(1 - \varepsilon^2)) \quad \text{und} \quad \varepsilon = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{G^2m^3M^2}} \quad (1.7)$$

ergibt sich eine direkte Beziehung zwischen den Bahnparametern p , ε und der großen Halbachse a . So lässt sich die Winkelabhängigkeit kompakter schreiben als:

$$\varphi(r) = \arccos \left(\frac{\frac{p}{r} - 1}{\varepsilon} \right) \iff \cos(\varphi) = \frac{\frac{p}{r} - 1}{\varepsilon} \quad (1.8)$$

Als finale Lösung folgt die kanonische Form der Bahnkurve. Für $0 \leq \varepsilon < 1$ beschreibt sie eine Ellipse, für $\varepsilon = 1$ eine Parabel, für $\varepsilon = 0$ einen Kreis und für $\varepsilon > 1$ eine Hyperbel:

$$r(\varphi) = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos(\varphi)} \quad (1.9)$$

Durch die Parameter p und ε wird die Form der Bahnkurve vollständig definiert. Der Parameter p wird als Bahnparameter oder semi-latus rectum bezeichnet, während ε die Exzentrizität angibt, also ein Maß dafür, wie stark die Bahn von einer Kreisform abweicht. Die kürzeste Entfernung des Körpers vom Zentralkörper, das Perihel, ergibt sich aus $r_{\text{min}} = \frac{p}{1+\varepsilon}$ und $r_{\text{max}} = \frac{p}{1-\varepsilon}$ für den sonnenfernsten Punkt, das Aphel (Hanslmeier, 2014).

Die große Halbachse a kann als arithmetisches Mittel von Perihel- und Aphelabstand

geschrieben werden. Dies liefert:

$$a = \frac{1}{2}(r_{\min} + r_{\max}) = \frac{p}{1 - \varepsilon^2} \quad (1.10)$$

Darüber hinaus steht a über die Gesamtenergie in der Beziehung

$$a = -\frac{GMm}{2E}, \quad (1.11)$$

wobei $E < 0$ für gebundene (elliptische) Bahnen gilt.

2. Gesetz – Der Flächensatz

Ebenfalls basierend auf Keplers empirischen Beobachtungen der Planetenbahnen besagt dieses zweite Gesetz, dass der Ortsvektor $\vec{r}(t)$ eines Planeten in gleichen Zeitspannen gleiche Flächen überstreicht, was bedeutet, dass sich ein Planet in der Nähe der Sonne schneller bewegt als in größerer Entfernung.

Gezeigt werden kann dies folgendermaßen:

Die von $\vec{r}(t)$ überstrichene Fläche in einem kleinen Zeitintervall dt ist näherungsweise ein dünnes Dreieck mit Höhe $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. Da $|\vec{r} \times \vec{v}|$ ein Parallelogramm aufspannt, ist die Hälfte hiervon genau das von $\vec{r}(t)$ überstrichene Dreieck mit Flächeninhalt $\frac{dA}{dt}$. Aus dem Erhalt des Drehimpulses

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m \cdot \vec{v} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\vec{L}}{m} = \vec{r} \times \vec{v} \quad (1.12)$$

resultiert:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} |\vec{r} \times \vec{v}| = \frac{1}{2} \left| \frac{\vec{L}}{m} \right| = \textit{konst.} \quad (1.13)$$

Ein Planet in Perihelnähe besitzt also eine größere Winkelgeschwindigkeit als in Aphelnähe, sodass in gleichen Zeitspannen stets gleiche Flächen überstrichen werden. Dieses Gesetz zeigt, dass sich Planeten nicht mit konstanter Geschwindigkeit auf ihren Bahnen bewegen, sondern in variierenden Bahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit von ihrer Entfernung zur Sonne (Gubler und Hepp, 2011; Hanslmeier, 2014). Eine alternative Herleitung des Flächensatzes auf geometrischem Wege, die vollständig auf Differentialrechnung verzichtet, findet sich in Richard Feynmans „Lost Lecture“, in der er das zweite Keplersche Gesetz aus dem Zentralkraftgesetz durch rein konstruktive Argumentation ableitet (Goodstein und Goodstein, 1996).

3. Gesetz – Das harmonische Gesetz

Der Quotient der Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten ist gleich dem Quotienten der Kuben der großen Halbachsen ihrer Bahnen, sie stehen also jeweils im gleichen Verhältnis zueinander:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad (1.14)$$

Dieses lässt sich direkt aus dem Flächensatz über die Energiebetrachtung herleiten. Für gebundene Bahnen (also Ellipsen mit $\varepsilon < 1$) ist die Gesamtenergie negativ und gegeben durch:

$$E = -\frac{G \cdot m \cdot M}{r_{\text{Aphel}} + r_{\text{Perihel}}} = -\frac{G \cdot m \cdot M}{a(1 + \varepsilon) + a(1 - \varepsilon)} = -\frac{G \cdot m \cdot M}{2a} \quad (1.15)$$

Aus dem Ausdruck für die Exzentrizität aus Gleichung 1.7 folgt durch Einsetzen von $E = -\frac{GMm}{2a}$:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{G^2M^2m^3}} = \sqrt{1 - \frac{L^2}{GMm^2a}} \quad (1.16)$$

Daraus ergibt sich durch Umstellen mit dem Bahnparameter aus Gleichung 1.7:

$$L^2 = GMm^2a(1 - \varepsilon^2) \quad (= GMm^2p) \quad (1.17)$$

Da die vom Fahrstrahl überstrichene Fläche pro Zeit konstant ist, resultiert die Umlaufzeit T mithilfe von Gleichung 1.13 aus:

$$T = \frac{\text{Fläche der Ellipse}}{\text{überstrichene Fläche pro Zeit}} = \frac{\pi ab}{\frac{1}{2} \cdot \frac{L}{m}} = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - \varepsilon^2} \cdot m}{L} \quad (1.18)$$

Setzt man $L^2 = GMm^2a(1 - \varepsilon^2)$, so folgt nach Quadrieren:

$$T^2 = \left(\frac{2\pi a^2 m \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{L} \right)^2 = \frac{4\pi^2 a^4 m^2 (1 - \varepsilon^2)}{L^2} \quad (1.19)$$

$$= \frac{4\pi^2 a^4 m^2 (1 - \varepsilon^2)}{GMm^2 a (1 - \varepsilon^2)} = \frac{4\pi^2 a^3}{GM} \quad (1.20)$$

Damit ergibt sich, wie eingangs beschrieben (siehe Gleichung 1.14):

$$T^2 \propto a^3 \quad (1.21)$$

Dieses Verhältnis gilt für alle Planeten, die denselben Zentralkörper mit Masse M umkreisen, unabhängig von ihrer Exzentrizität (Hanslmeier, 2014).

1.1.2 Isaac Newtons Gravitationsgesetz

Die Schwerkraft als physikalisches Konzept wurde erstmals 1687 von Isaac Newton quantitativ im Rahmen seines Werkes „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ erfasst, womit er die erste gemeinsame Erklärung sowohl für die irdische Schwerkraft (etwa fallende Körper) als auch für die Himmelsmechanik (z.B. den Mondumlauf um die Erde) geliefert und beide miteinander vereint hat. Für die Herleitung der Proportionalitäten wird zunächst ein Zentralkörper der Masse m_1 betrachtet, welcher von einem Himmelskörper der Masse m_2 in einer gleichförmigen Kreisbewegung im Abstand r_{12} umrundet wird. Die Kraft F_{12} , die gesucht wird, muss bei einer Umlaufdauer T_2 des Trabanten genau der Zentripetalkraft entsprechen, wodurch sich folgende Gleichheit ergibt:

$$F_{12} = F_Z = m_2 \cdot r_{12} \cdot \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 = m_2 \cdot r_{12} \cdot \frac{4\pi^2}{T_2^2} \quad (1.22)$$

Aus dem harmonischen Gesetz (siehe Gleichung 1.14) folgt $T_2^2 = C_1 \cdot r_{12}^3$ mit einer Konstante C_1 . Dieses Quadrat der Umlaufzeit kann nun in Gleichung 1.22 eingesetzt werden:

$$F_{12} = m_2 \cdot r_{12} \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{C_1 \cdot r_{12}^3} = m_2 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{C_1} \cdot \frac{1}{r_{12}^2} \quad (1.23)$$

Da an dieser Stelle von einer Kreisbahn ausgegangen wird, entspricht das a_2^3 hier dem r_{12}^3 . Nach dem dritten Newtonschen Axiom ist der Betrag der Kraft F_{12} , welche die Erde auf den Mond ausübt, gleich dem der Kraft F_{21} , die der Mond auf die Erde ausübt. Es gilt demnach also

$$F_{12} = \frac{m_2}{C_1} \cdot \frac{4\pi^2}{r_{12}^2} = F_{21} = \frac{m_1}{C_2} \cdot \frac{4\pi^2}{r_{12}^2} \quad (1.24)$$

und es folgt:

$$\frac{m_2}{C_1} = \frac{m_1}{C_2} \Leftrightarrow m_2 \cdot C_2 = m_1 \cdot C_1 = m \cdot C \quad (1.25)$$

Nach einer Erweiterung von Gleichung 1.23 um m_1 ergibt sich:

$$F_{12} = \frac{m_1}{m_1} \cdot \frac{m_2}{C_1} \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{r_{12}^2} = \frac{4 \cdot \pi^2}{m \cdot C} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2} \quad (1.26)$$

Der vordere Bruch stellt eine universelle und unveränderliche Größe dar, die man heute als die Gravitationskonstante G bezeichnet. Sie beträgt in etwa $G \approx 6.674 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$ (Demtröder, 2006). Außerdem lassen sich aus Gleichung 1.26 nun die Proportionalitäten $F_{12} \propto m_1$, $F_{12} \propto m_2$, $F_{12} \propto r_{12}^{-2}$ herauslesen, mit denen Newton damals die Eigenschaften der Massenanziehung ohne die heute bekannte Gravitationskonstante ausgedrückt hatte. Daraus ergibt sich die gängige Gleichung des Gravitationsgesetzes:

$$F(r) = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1.27)$$

Somit gelang die erstmals gleichzeitige Vereinigung von Phänomenen auf der Erde und am Himmel unter einem gemeinsamen Gesetz der Gravitation, was einen enormen Durchbruch in der Physik darstellte. Fortan ließen sich (fast) alle wichtigen Bewegungen im All durch Newtons Gravitationslehre erklären (Demtröder, 2006). Newton selbst war nicht in der Lage G zu bestimmen, dies gelang erst etwas über 100 Jahre später durch die Cavendish-Experimente um 1800 (Ohanian und Ruffini, 2013).

Mithilfe des Gesetzes ließen sich zudem neue Schlussfolgerungen über die Struktur von Gravitationsfeldern anstellen, wie z.B. die Erkenntnis, dass man Objekte mit ausgedehnter kugelsymmetrischer Massenverteilungen auch als Punktmassen behandeln kann, da die Gravitation außerhalb der Kugel so wirkt, als wenn die gesamte Masse im Schwerpunkt vereinigt wäre. Als sehr praktisch erweist sich dies beispielsweise für die Ephemeridenrechnung.

Eines der zentralsten Resultate aus dem Gravitationsgesetz ist zudem, dass es sich um ein Zentralkraftgesetz mit $F \propto 1/r^2$ Abhängigkeit handelt, wodurch Keplers Beobachtungen der elliptischen Planetenbahnen analytisch bestätigt werden konnten (Müller, 2007).

1.1.3 Gravitation und Trägheit

Ein beliebtes und für Laien immer wieder verblüffendes Experiment stellt jenes des freien Falls verschiedener Objekte in einer Vakuumglocke dar, denn anders als erwartet fallen hier beispielsweise Feder und Stein gleich schnell zu Boden. Auch auf kosmischen Skalen kommt man zu dem gleichen Ergebnis, wenn man z.B. die Bewegung der Himmelskörper im Sonnensystem betrachtet (zumindest in guter Näherung, in der die gravitativen Einflüsse der Planeten untereinander vernachlässigt

werden). Auch hier erfährt jeder Planet, unabhängig von seiner Masse und seinen charakteristischen Eigenschaften, eine Beschleunigung durch die Zentralmasse, auch wenn diese nun natürlich aufgrund der variierenden Abstände nicht mehr konstant ist.

Gravitation und Trägheit sind des Weiteren eng miteinander verflochten; experimentell wurde bestätigt, dass die schwere Masse (Maß für die gravitative Anziehungskraft) mit der trägen Masse (Widerstand der Masse gegen Beschleunigung) gleichgesetzt werden kann (Pössel, 2010). Bei dieser Gleichheit spricht man auch von dem schwachen Äquivalenzprinzip, wobei es im Rahmen der klassischen Mechanik keine Erklärung für diese Äquivalenz gibt: Warum genau haben Gravitations- und Trägheitseigenschaften genau denselben Zahlenwert? Erst 1907 hat Albert Einstein im Rahmen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie eine geometrische Antwort auf diese Frage geliefert: Massen verzerren die sogenannte Raumzeit, in welcher alle Objekte möglichst geraden Bahnen folgen, wodurch die künstliche Zweiteilung des Massenbegriffs abgelöst werden konnte. Lokal gibt es also keinen Unterschied zwischen beschleunigter Bewegung und gravitativer Wirkung, was man sich folgendermaßen vorstellen kann: In einem fallenden Fahrstuhl kann ein Beobachter kein Gravitationsfeld feststellen, da er sich in einem geschlossenen System befindet und er selbst und alles um ihn herum schwebt und schwerelos erscheint. Gravitation ist also lokal äquivalent zur Beschleunigung (Overduin, 2007). Dieses Phänomen macht sich auf realer Ebene beispielsweise die Internationale Raumstation (ISS) zunutze, indem durch sehr hohe Geschwindigkeit die Abstandsverringerung zur Erde, welche durch den freien Fall entstehen würde, mithilfe einer entsprechenden Vorwärtsbewegung kompensiert wird und somit der Effekt von Schwerelosigkeit entsteht (siehe Kapitel 2.2.1).

1.1.4 Notwendigkeit einer neuen Theorie

Trotz der enormen Erfolge von Newtons Gravitationstheorie gab es im Laufe des 19. Jahrhunderts einige neue Beobachtungen, die mit diesem Modell nicht vollständig übereinstimmten. Ein berühmtes Beispiel, welches die Grenzen der Newtonschen Mechanik aufzeigt, ist die Periheldrehung des Planeten Merkur. Bereits im Jahr 1859 hatte der französische Mathematiker U. Le Verrier beobachtet, dass sich die Position des Perihels um 38 Bogensekunden pro Jahrhundert schneller verändert, als sie nach den Vorhersagen mit den Newtonschen Gesetzen sollte (Le Verrier, 1859).

Dieser Effekt ließ sich nicht durch die gravitativen Einflüsse der anderen Planeten erklären, weshalb Le Verrier zunächst davon ausging, dass es einen weiteren, bislang noch unentdeckten Planeten namens „Vulkan“ geben müsse, welcher sich noch näher an der Sonne befinde als Merkur. Ein solcher Planet wurde jedoch nie gefunden; zudem korrigierte ein kanadisch-amerikanischer Astronom namens Simon Newcomb im Jahr 1882 diese Differenz der Periheldrehung sogar auf 43 Bogensekunden (Newcomb, 1897).

Dieses Phänomen stellte ein Rätsel dar, welches die Vermutung nahelegte, dass die Schwerkraft in der Nähe sehr massereicher Objekte anders wirken könnte als angenommen. Eine neue Theorie wurde benötigt, um diese Diskrepanz zu lösen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts präsentierte Albert Einstein mit seiner Relativitätstheorie eine revolutionäre Sichtweise, in welcher Gravitation nicht mehr als Kraft, sondern als Krümmung der Raumzeit durch Masse verstanden wird. Durch seine innovative Theorie konnte letztlich auch die Periheldrehung des Merkur erklärt werden (Einstein, 1915), worauf in den folgenden Kapiteln genauer eingegangen werden soll.

1.1.5 Albert Einsteins Relativitätstheorie

Die von Albert Einstein zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelte Relativitätstheorie besteht zum einen aus der speziellen Relativitätstheorie (SRT), welche beschreibt, auf welche Weise sich Raum und Zeit für Beobachter verändern, die sich mit konstanter Geschwindigkeit relativ zueinander bewegen, was zu dem fundamentalen Ergebnis führt, dass Raum und Zeit nicht absolut sind, sondern relativ von der Sicht eines Beobachters abhängen. Später hat Einstein diesen Ansatz im Rahmen seiner allgemeinen Relativitätstheorie (ART) noch erweitert, indem er die Gravitation nicht länger als Kraft, sondern vielmehr als eine geometrische Eigenschaft einer durch die Anwesenheit von Masse und Energie gekrümmten Raumzeit definiert (Wom, 2023). Diese Vorstellung beruht auf der Annahme, dass jedes Objekt mit einer bestimmten Masse die Struktur des ihn umgebenden Raumes verändert, ähnlich wie ein Ball, den man auf ein gespanntes Tuch legt. (Diese Anschauung wird vor allem in Kapitel 2.3.6 noch häufiger aufgegriffen, wenn es um Schülervorstellungen zum Konzept von Gravitation gehen soll.) Bewegung erfolgt laut der ART prinzipiell entlang sogenannter Geodäten, also möglichst geradliniger Wege innerhalb einer solchen gekrümmten Raumzeit. Gemeint ist hiermit der kürzeste Weg zwischen zwei

Punkten, analog zu einer geraden Linie in einem nicht gekrümmten Raum, der in diesem Fall jedoch einen gekrümmten Pfad darstellt, entlang dessen sich Objekte zwangsläufig bewegen, falls keine weiteren Kräfte auf sie wirken. Die zurückgelegte Strecke eines Flugzeugs, welches die kürzeste Route zwischen zwei weit voneinander entfernten Flughäfen absolviert, liefert ein anschauliches Beispiel für eine solche Geodäte. Auf einer flachen Landkarte würde der kürzeste Weg zwischen diesen beiden Punkten aus einer geraden Linie bestehen, blickt man jedoch aus der Sicht eines außenstehenden Beobachters (beispielsweise eines Satelliten) auf die Flugbahn, wird offensichtlich, dass das Flugzeug tatsächlich eine Kurve fliegt. Diese Kurve stellt allerdings trotzdem den kürzesten Weg zwischen diesen beiden Flughäfen dar, genau wie eine Geodäte in einem gekrümmten Raum. Auf diese Weise bewegen sich nach der allgemeinen Relativitätstheorie Objekte entlang dieser Raumlinien aus ihrer eigenen Perspektive geradeaus, doch für externe Beobachter auf einer gekrümmten Bahn. Zwar können nur massereiche Objekte die Raumzeit krümmen, doch auch masselose Objekte wie Photonen bewegen sich auf diesen Geodäten. Licht selbst kann also durch Gravitation beeinflusst und abgelenkt werden, beispielsweise um einen massereichen Stern oder ein schwarzes Loch herum.

Im Jahr 1919 konnte dieses Phänomen erstmals in einem Experiment nachgewiesen werden, indem während einer Sonnenfinsternis Sterne beobachtet wurden, die normalerweise von unserer Sonne überstrahlt werden. Die scheinbare Position der Sterne war während der Sonnenfinsternis um etwa 1,75 Bogensekunden verschoben im Vergleich zu der Position, an der sie normalerweise am Himmel zu sehen sind. Das Licht der Sterne wurde also durch die Raumzeitkrümmung der Sonne abgelenkt und lieferte damit einen starken Beleg für die Gültigkeit dieser Theorie (Dyson u. a., 1920).

1.1.6 Herleitung der relativistischen Periheldrehung

Der folgende Abschnitt widmet sich der Herleitung der relativistischen Periheldrehung aus den Einstein-Feldgleichungen. Da eine vollständige mathematische Beweisführung den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschreiten würde, konzentriert sich die folgende Darstellung lediglich auf die wesentlichsten Operationen. Genauer nachzulesen ist die hier verwendete Vorgehensweise in James Hartles „Gravity: An Introduction to Einstein’s General Relativity“ (Hartle, 2021). Im Sinne der Lesbarkeit wurde darauf verzichtet, jeden Zwischenschritt einzeln zu belegen, weshalb darauf

verwiesen wird, dass Hartle für dieses Kapitel die Quelle aller mathematischen Ausdrücke, Definitionen und Rechenschritte darstellt.

Die Einsteinschen Feldgleichungen beschreiben grundlegend die Beziehung zwischen Energie und Materie und die daraus resultierende Raumzeitkrümmung. Sie bilden die zentrale mathematische Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie und lauten in kompakter Form:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (1.28)$$

wobei $G_{\mu\nu}$ den Einstein-Tensor bezeichnet, $T_{\mu\nu}$ den Energie-Impuls-Tensor, G die Newtonsche Gravitationskonstante und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beschreibt.

Mathematisch muss nun zunächst die sogenannte Schwarzschild-Lösung aus den Einstein-Feldgleichungen hergeleitet werden, indem eine kugelsymmetrische und statische Raumzeit angenommen wird, in welcher keine Materie vorhanden ist. Unter diesen Annahmen vereinfacht sich der Einstein-Tensor zu $G_{\mu\nu} = 0$. Die Metrik kann dann mit zwei unbekannt Funktionen $A(r)$ und $B(r)$ in Kugelkoordinaten als

$$ds^2 = -A(r)c^2 dt^2 + B(r)dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (1.29)$$

angesetzt werden. Durch Berechnung der Christoffel-Symbole, des Ricci-Tensors sowie des Einstein-Tensors entsteht schließlich ein System von Differentialgleichungen. Durch Lösen dieser Gleichungen erhält man die bekannte Schwarzschild-Metrik:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (1.30)$$

Der Term $\frac{2GM}{c^2}$ definiert dabei den berühmten Schwarzschild-Radius R_s , welcher bei statischen schwarzen Löchern den Radius des Ereignishorizontes angibt. Diese Lösung beschreibt die Raumzeitkrümmung um kugelsymmetrische, massereiche Objekte wie Sterne oder schwarze Löcher. Dieser Prozess erfordert einige algebraische Rechnungen, gilt aber als Standard in Lehrbüchern zur allgemeinen Relativitätstheorie (Fließbach, 2016).

Zur Beschreibung der Bewegung eines Teilchens in diesem Gravitationsfeld sind die Geodätengleichungen relevant:

$$\frac{d^2 x^\alpha}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0 \quad (1.31)$$

Die Christoffel-Symbole $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$, welche die Krümmung der Raumzeit und damit die Gravitationswirkung auf das Teilchen ausdrücken, ergeben sich durch Differentiation der Metrik-Komponenten gemäß

$$\Gamma_{\mu\nu}^\alpha = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} \left(\frac{\partial g_{\beta\nu}}{\partial x^\mu} + \frac{\partial g_{\beta\mu}}{\partial x^\nu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\beta} \right). \quad (1.32)$$

Ziel der folgenden Betrachtungen ist es nun, aus diesen Gleichungen schließlich die Standardformel für die Periheldrehung planetarer Bahnen herzuleiten. Durch Einsetzen von Gleichung 1.32 in 1.31 erhält man die expliziten Bewegungsgleichungen. Durch geeignete Wahl der Koordinaten lässt sich das Problem auf eine Ebene reduzieren. Diese Vereinfachung nutzt die Rotationssymmetrie der Schwarzschild-Raumzeit aus, wodurch sich die Bewegung eines Teilchens vollständig in einer Ebene beschreiben lässt, definiert durch seine Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeit. Diese Symmetrie impliziert die Existenz zweier Erhaltungsgrößen, der spezifischen Energie e und des spezifischen Drehimpulses ℓ . Die spezifische Energie ergibt sich unmittelbar aus der Zeittranslationsinvarianz und ist definiert als

$$e = -\boldsymbol{\xi} \cdot \mathbf{u} = \left(1 - \frac{2GM}{r} \right) \frac{dt}{d\tau}, \quad (1.33)$$

wobei $\boldsymbol{\xi}$ der zeitartige Killing-Vektor und \mathbf{u} die Vierergeschwindigkeit des Teilchens ist. Die Eigenzeit τ bezeichnet dabei die im Ruhesystem des Teilchens gemessene Zeit, also die Zeit, die entlang der Weltlinie des Teilchens vergeht und ist insbesondere invariant unter Koordinatentransformationen.

Der spezifische Drehimpuls folgt aus der Rotationsinvarianz und ist definiert durch

$$\ell = \boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{u} = r^2 \sin^2 \theta \frac{d\varphi}{d\tau}, \quad (1.34)$$

wobei $\boldsymbol{\eta}$ der Killing-Vektor ist, der der Symmetrie unter Drehungen um die φ -Achse entspricht. O.B.d.A. kann die Bewegungsebene so gewählt werden, dass $\theta = \frac{\pi}{2}$ gilt.

Dies vereinfacht den Ausdruck für den spezifischen Drehimpuls zu

$$\ell = r^2 \frac{d\varphi}{d\tau}. \quad (1.35)$$

Die radiale Bewegungsgleichung lässt sich mithilfe eines effektiven Potentials

$$V_{\text{eff}}(r) \equiv -\frac{M}{r} + \frac{\ell^2}{2r^2} - \frac{M\ell^2}{r^3} \quad (1.36)$$

formulieren. $V_{\text{eff}}(r)$ kann in Gleichung 1.37 eingesetzt werden und unterscheidet sich lediglich durch den letzten Term $-\frac{M\ell^2}{r^3}$ vom Newtonschen Modell. Der Term stellt die relativistische Korrektur dar, welche letztendlich auch für die verschobene Periheldrehung verantwortlich ist.

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 + V_{\text{eff}}(r) \equiv \frac{e^2 - 1}{2} \quad (1.37)$$

\mathcal{E} ist eine Konstante, die die Energie pro Masse, bestehend aus kinetischem und effektivem Potential, angibt.

Die Gleichung (1.37) kann nach $\frac{dr}{d\tau}$ aufgelöst werden:

$$\frac{dr}{d\tau} = \pm \sqrt{2(\mathcal{E} - V_{\text{eff}}(r))} \quad (1.38)$$

Kombiniert man nun (1.38) und (1.35) zu $\frac{d\varphi}{dr} = \frac{d\varphi/d\tau}{dr/d\tau}$, so folgt direkt

$$\frac{d\varphi}{dr} = \pm \frac{\ell}{r^2} \frac{1}{\sqrt{2(\mathcal{E} - V_{\text{eff}}(r))}} = \pm \frac{\ell}{r^2} \left[e^2 - \left(1 - \frac{2M}{r} \right) \left(1 + \frac{\ell^2}{r^2} \right) \right]^{-1/2}. \quad (1.39)$$

Das Vorzeichen gibt dabei die Bewegungsrichtung des Himmelskörpers (bei Hartle ist allgemein von Teilchen die Rede) an: Ein positives Vorzeichen bedeutet Bewegung nach außen, ein negatives nach innen. Betrachtet man die Bewegung eines Planeten zwischen zwei aufeinanderfolgenden radialen Umkehrpunkten, lässt sich durch Integration der Winkel $\Delta\varphi$ bestimmen, den der Planet dabei überstreicht (vgl. Gleichung (1.40)). Der hinzukommende Vorfaktor 2 kompensiert die Tatsache, dass es sich bei der Strecke von r_1 nach r_2 lediglich um den halben Weg handelt, wobei der

überstrichene Winkel zwischen jedem dieser Umkehrpunkte gleich groß ist:

$$\Delta\varphi = 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left[e^2 - \left(1 - \frac{2M}{r} \right) \left(1 + \frac{\ell^2}{r^2} \right) \right]^{-1/2} \quad (1.40)$$

Im idealisierten Fall eines Zweikörpersystems ohne äußere Störungen würde sich die Bahn exakt schließen und der überstrichene Winkel betrüge genau 2π . Weicht $\Delta\varphi$ jedoch von 2π ab, verschiebt sich die Umlaufbahn bei jeder Umrundung geringfügig (siehe Abb. 1).

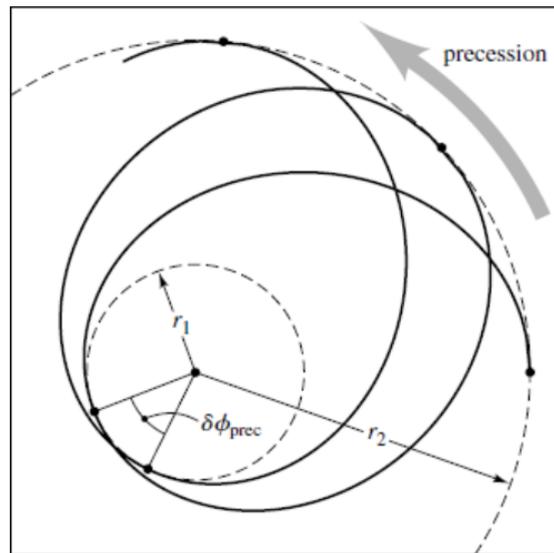


Abbildung 1: Darstellung der Perihelpräzession einer gebundenen Umlaufbahn um ein sphärisches Zentralobjekt (Hartle, 2021, Fig. 9.6). Während sich im idealisierten Newtonschen Zweikörperproblem die Bahn exakt schließt, ergibt sich in der allgemeinen Relativitätstheorie eine leichte Abweichung: Die Position des inneren Umkehrpunktes (Perihel) verschiebt sich mit jeder Umrundung um den Winkel $\delta\varphi_p$.

Man spricht hierbei von einer Präzession, deren Größe durch die Differenz $\Delta\varphi - 2\pi$ quantifiziert wird (vgl. Gleichung 1.41):

$$\delta\varphi_p = \Delta\varphi - 2\pi \quad (1.41)$$

Die radialen Umkehrpunkte selbst sind durch ein Verschwinden der radialen Geschwindigkeit gekennzeichnet und markieren den Richtungswechsel des Himmelskörpers zwischen Annäherung und Entfernung bezüglich des Zentralobjektes.

Für Anwendungen im Sonnensystem ist es ausreichend, die Gleichung für den Winkel $\Delta\varphi$, den ein Teilchen während eines Umlaufs überstreicht, nur bis zur nächsthöheren Ordnung in $1/c^2$ nach der Newtonschen Theorie zu berechnen. Dazu wird Gleichung 1.40 mit expliziten Faktoren von G und c^2 versehen, was zur Gleichung 1.42 führt:

$$\Delta\varphi = 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left[c^2 (e^2 - 1) + \frac{2GM}{r} - \frac{\ell^2}{r^2} + \frac{2GM\ell^2}{c^2 r^3} \right]^{-1/2} \quad (1.42)$$

Dabei entsprechen die ersten drei Terme in der Klammer der klassischen Newtonschen Energie, dem Newtonschen Gravitationspotential und dem klassischen Zentrifugalpotential. Der letzte Term, proportional zu $1/c^2$, stellt die relativistische Korrektur dar und führt zu der hier gesuchten Präzession der Umlaufbahn. Insbesondere ist der Term $c^2(e^2 - 1)$ entgegen der ersten Vermutung nicht besonders groß, sondern entspricht von der Größenordnung her der Newtonschen Bindungsenergie pro Masseneinheit, wie die Näherung

$$e^2 \approx 1 + \frac{2E_{\text{Newt}}}{mc^2} + \dots \quad (1.43)$$

zeigt.

In der Newtonschen Näherung, bei der relativistische Effekte zunächst vernachlässigt werden, schließt sich die Umlaufbahn exakt und der Winkel $\Delta\varphi$, der während eines Umlaufs überstrichen wird, beträgt genau 2π (vgl. Gleichung 1.44):

$$\Delta\varphi = 2 \int_{u_2}^{u_1} \frac{du}{[(u_1 - u)(u - u_2)]^{1/2}} = 2\pi \quad (1.44)$$

Um die erste Ordnung $\frac{1}{c^2}$ der relativistischen Korrektur des Winkels zu finden, bedarf es zunächst eines Tricks, bei dem der Faktor $1 - \frac{2GM}{c^2 r}$ aus dem Nenner von 1.42 ausgeklammert wird, wodurch sich folgender Term ergibt:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left[c^2(e^2 - 1) + \frac{2GM}{r} - \frac{\ell^2}{r^2} + \frac{2GM\ell^2}{c^2 r^3} \right]^{-1/2} \\ &= 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1/2} \left[c^2 e^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1} - \left(c^2 + \frac{\ell^2}{r^2} \right) \right]^{-1/2} \end{aligned} \quad (1.45)$$

Hiervon ausgehend werden die Terme bis zur Ordnung $1/c^2$ entwickelt. Zunächst

ergeben sich aus der Verwendung der Approximationen

$$(1-x)^{-1} \approx 1+x \quad \text{und} \quad (1-x)^{-1/2} \approx 1+\frac{x}{2} \quad \text{für } x \ll 1 \quad (1.46)$$

die Näherungen

$$\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1/2} \approx 1 + \frac{GM}{c^2 r}, \quad \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} \approx 1 + \frac{2GM}{c^2 r}. \quad (1.47)$$

Diese werden zusammen mit $e^2 \approx 1 + \frac{2E_{\text{Newt}}}{mc^2} + \dots$ (1.43) in Gleichung 1.45 eingesetzt:

$$\begin{aligned} & 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1/2} \left[c^2 e^2 \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} - \left(c^2 + \frac{\ell^2}{r^2}\right) \right]^{-1/2} \\ & \approx 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) \left[c^2 \left(1 + \frac{2E_{\text{Newt}}}{mc^2}\right) \left(1 + \frac{2GM}{c^2 r}\right) - \left(c^2 + \frac{\ell^2}{r^2}\right) \right]^{-1/2} \\ & \approx 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) \left[\left(c^2 + \frac{2E_{\text{Newt}}}{m}\right) \left(1 + \frac{2GM}{c^2 r}\right) - \left(c^2 + \frac{\ell^2}{r^2}\right) \right]^{-1/2} \\ & \approx 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) \left[c^2 + \frac{2GM}{r} + \frac{2E_{\text{Newt}}}{m} + \frac{4GME_{\text{Newt}}}{mc^2 r} - \left(c^2 + \frac{\ell^2}{r^2}\right) \right]^{-1/2} \\ & \approx 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) \left[-\frac{\ell^2}{r^2} + \frac{2GM}{r} + \frac{4GME_{\text{Newt}}}{mc^2 r} + \frac{2E_{\text{Newt}}}{m} \right]^{-1/2} \end{aligned} \quad (1.48)$$

Das gesamte Integral lautet somit:

$$\Delta\varphi \approx 2\ell \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} \left(1 + \frac{GM}{c^2 r}\right) \left[-\frac{\ell^2}{r^2} + \frac{2GM(mc^2 + 2E_{\text{Newt}})}{mc^2 r} + \frac{2E_{\text{Newt}}}{m} \right]^{-1/2} \quad (1.49)$$

Mit der Substitution $u = \frac{1}{r}$, $dr = -\frac{1}{u^2} du$ kann das Polynom im Nenner als quadratische Funktion in u geschrieben werden, wodurch sich das Integral in folgende Form bringen lässt:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & \left[1 + 2 \left(\frac{GM}{c\ell} \right)^2 \right] 2 \int_{u_2}^{u_1} \frac{du}{\sqrt{(u_1 - u)(u - u_2)}} \\ & + \frac{2GM}{c^2} \int_{u_2}^{u_1} \frac{u du}{\sqrt{(u_1 - u)(u - u_2)}} + \left(\text{höhere Ordnung in } \frac{1}{c^2} \right) \end{aligned} \quad (1.50)$$

Das erste Integral ist ein bekanntes Standardintegral:

$$\int_{u_2}^{u_1} \frac{du}{\sqrt{(u_1 - u)(u - u_2)}} = \pi, \quad (1.51)$$

sodass der erste Summand zu $2\pi \cdot \left[1 + 2 \left(\frac{GM}{c\ell}\right)^2\right]$ beiträgt.

Das zweite Integral ist ebenfalls bekannt:

$$\int_{u_2}^{u_1} \frac{u du}{\sqrt{(u_1 - u)(u - u_2)}} = \frac{\pi}{2}(u_1 + u_2) \quad (1.52)$$

Aus beiden Summanden mit $u_1 + u_2 = \frac{2GM}{c^2}$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 2\pi \cdot \left[1 + 2 \left(\frac{GM}{c\ell}\right)^2\right] + \frac{2GM}{c^2} \cdot \frac{\pi}{2}(u_1 + u_2) = 2\pi + 4\pi \frac{G^2 M^2}{c^2 l^2} + \frac{2\pi GM}{2c^2} \cdot \frac{2GM}{l^2} \\ &= 2\pi \cdot 4\pi \frac{G^2 M^2}{c^2 l^2} + 2\pi \frac{G^2 M^2}{c^2 l^2} = 2\pi + 6\pi \left(\frac{GM}{c\ell}\right)^2 \end{aligned} \quad (1.53)$$

Für die Periheldrehung pro Orbit erhält man in Kombination mit Gleichung 1.41:

$$\delta\varphi_p = \Delta\varphi - 2\pi = 6\pi \left(\frac{GM}{c\ell}\right)^2 \quad (1.54)$$

Drückt man nun den Drehimpuls ℓ mit klassischen, bekannten Bahnparametern aus, resultiert daraus

$$\ell^2 = GMa(1 - \epsilon^2), \quad (1.55)$$

wobei a die große Halbachse und ϵ die Exzentrizität der Ellipse darstellen. Dies führt letztlich zur bekannten Endformel für die relativistische Perihelpräzession (vgl. Gleichung 1.56)

$$\delta\varphi_p = \frac{6\pi G}{c^2} \frac{M}{a(1 - \epsilon^2)}, \quad (1.56)$$

die insbesondere zur Erklärung der beobachteten zusätzlichen Periheldrehung des Merkur von Bedeutung ist.

Mit den Werten

$$G = 6,6726 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2, \quad M = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}, \quad c = 299\,792,458 \text{ m/s}, \\ a = 57,909 \times 10^6 \text{ km} = 5,7909 \times 10^{10} \text{ m}, \quad \epsilon = 0,2056$$

(Williams, 2024)(Hanslmeier, 2014), eingesetzt in Gleichung 1.56, ergibt sich:

$$\delta\phi_p = \frac{6\pi \cdot 6,6726 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \cdot 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}}{(299\,792,458 \text{ m/s})^2 \cdot 5,7909 \times 10^{10} \text{ m} \cdot (1 - 0,2056^2)} \approx 5,021 \times 10^{-7} \text{ rad} \quad (1.57)$$

Umgerechnet in Bogensekunden pro Umlauf:

$$\delta\phi_p = 5,021 \times 10^{-7} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3600 \approx 0,1036'' \quad (1.58)$$

Multipliziert mit 415 Umläufen pro Jahrhundert ergibt sich:

$$\delta\phi_p^{(100 \text{ Jahre})} = 0,1036'' \cdot 415 \approx 42,98'' \quad (1.59)$$

Die theoretisch berechnete relativistische Perihelpräzession des Merkurs beträgt somit, wie eingangs bereits vorweggenommen, etwa 43 Bogensekunden pro Jahrhundert und erklärt damit präzise den Anteil, der über die klassischen (Newtonschen) Störungen hinausgeht.

1.1.7 Zeitdilatation

Bislang wurde hauptsächlich der Einfluss von Gravitation auf die Bewegung und Krümmung des Raumes thematisiert, doch auch der Fluss der Zeit verändert sich, wenn Raumzeit gekrümmt wird. In der Nähe großer Massen vergeht Zeit langsamer als in weiter Entfernung. James Hartle liefert zur Veranschaulichung dieses Phänomens ein Gedankenexperiment, bei dem man sich eine Art 'Einweg-Zeitmaschine' in Form einer extrem massiven kugelsymmetrischen Hülle vorstellen würde. Im Inneren dieser Kugel verginge die Zeit für den Beobachter langsamer, insbesondere auch der Alterungsprozess. Beim Verlassen der Kugel wäre in der Außenwelt dann theoretisch mehr Zeit vergangen, was einer Reise in die Zukunft gleichkäme. Hinsichtlich der Möglichkeit von Reisen in die Vergangenheit postuliert Hartle, dass diese vermutlich Science-Fiction bleiben würden. Zwar könnte man theoretisch geschlossene zeitartige Kurven konstruieren, mit denen ein Rückweg nicht komplett ausgeschlossen wäre, doch bislang gibt es keinerlei Hinweise darauf, dass unsere Raumzeit eine solche Topologie zulässt (Hartle, 2021).

Doch nicht nur Gravitation, sondern auch Geschwindigkeit hat einen Einfluss auf die Zeit, welcher 1985 im Rahmen des „Navex“ Experiments einer deutschen Space-Shuttle-Mission sogar experimentell bestätigt wurde. Uhren an Bord eines schnell

fliegenden Raumschiffs laufen nachweislich langsamer als baugleiche Uhren, die sich auf der Erde befinden. Dies liegt insbesondere daran, dass Zeit bei hohen Geschwindigkeiten langsamer vergeht. In der Praxis beträgt dieser Effekt bei realistischen Geschwindigkeiten (z.B. ISS mit 28.000km/h) nur wenige Mikrosekunden, bleibt aber messbar. Die ISS befindet sich mit einer Bahnhöhe von rund 400km noch vergleichsweise nah an der Erde, doch z.B. bei einigen GPS-Satelliten mit einer Höhe von über 20.000km wirkt die Gravitation der Erde bereits so viel schwächer, dass Zeit dort deutlich schneller vergeht und unsere Navigationsgeräte weit am Ziel vorbeiführen würden, wenn diese Zeitabweichung nicht kompensiert werden würde (DLR, n.d.).

1.2 Das Erde-Mond-System

Im folgenden Abschnitt sollen die theoretischen Grundlagen geschaffen werden, welche notwendig sind, um die in Kapitel 2.3 thematisierten Schülervorstellungen rund um das Erde-Mond-System in einem begründeten fachwissenschaftlichen Rahmen diskutieren zu können. Dabei werden zunächst die Prinzipien von Umlaufbahn, gebundener Rotation sowie jahreszeitlicher Dynamik hinsichtlich ihrer Bedingungsfaktoren kurz vorgestellt. Abschließend richtet sich der Blick auf die Entstehung von Mondphasen und Finsternissen. Aufgrund der Rahmenbedingungen der vorliegenden Arbeit können alle Ausführungen in diesem Zusammenhang nur recht überblicksartig und grundlagenmäßig erfolgen, zur punktuellen Vertiefung wird an entsprechender Stelle auf Sekundärliteratur verwiesen.

1.2.1 Umlaufbahnen von Erde und Mond

In einem Abstand von 150 Millionen Kilometern umkreist die Erde tagtäglich die Sonne auf einer nahezu kreisförmigen elliptischen Bahn mit einer Exzentrizität von gerade mal 0,0167. Diese Distanz von genau genommen $1,496 \cdot 10^8$ km wird auch als eine Astronomische Einheit bezeichnet. Die Erdbahn, auf welcher die Erde die Sonne in ca. 365,25 Tagen umrundet, definiert die sogenannte Ekliptik, also die Bezugsfläche für alle Bahnneigungen im Sonnensystem. Beispielsweise wird der Winkel der geneigten Erdachse, die auch für die Entstehung der Jahreszeiten und die Unterschiede der Tag- und Nachtwechsel auf der Erde verantwortlich ist (siehe Kap.

1.2.3), mit $23,44^\circ$ Neigung gegenüber der Ekliptik angegeben (Williams, 2024). Der Mond kreist mit einem mittleren Abstand von $\sim 384.000\text{km}$ um die Erde, was in etwa dem 60-fachen Erdradius entspricht. Durch eine Exzentrizität von ca. 0,055 liegt der geringste Abstand zur Erde, das sog. Perigäum, bei $\sim 363.300\text{km}$ und das Apogäum, also der am weitesten entfernte Punkt, bei $\sim 405.500\text{km}$. Hinsichtlich der Umlaufzeit des Mondes um die Erde wird zwischen der siderischen und der synodischen Umlaufperiode unterschieden. Die siderische Umlaufperiode des Mondes beträgt 27,32 Tage und entspricht exakt der Zeit, die der Mond benötigt, um nach einer vollen Umdrehung um die Sonne wieder die gleiche Position in Bezug auf den Fixsternhimmel zu erreichen. Die synodische Periode hingegen dauert 29,53 Tage und meint die Zeit, in welcher der Mond einmal alle Mondphasen durchlaufen hat (siehe Kap. 1.2.4). Insbesondere ist sie länger als die siderische Periode, da der Mond den Winkel ‚nachholen‘ muss, den die Erde in der Zeit um die Sonne zurückgelegt hat (siehe Abb. 2). Die Bahn des Mondes ist um $\sim 5,14^\circ$ gegen die Ekliptik geneigt (Williams, 2024).

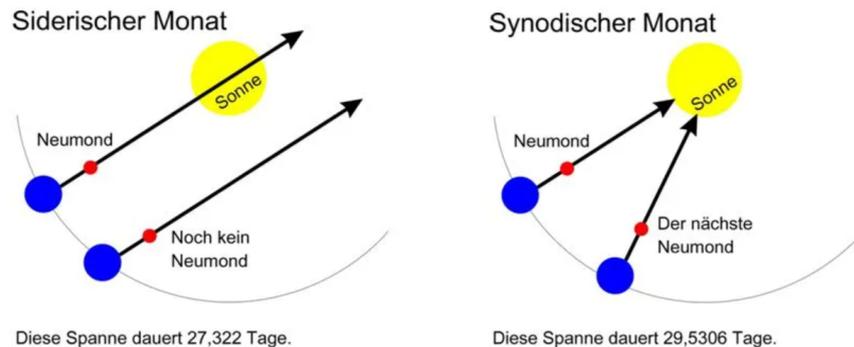


Abbildung 2: Die siderische Periode (lat. *sidus* „der Stern“) meint die Zeit für einen vollständigen 360° Umlauf des Mondes um die Erde vor dem Fixsternhimmel. Die synodische Periode des Mondes bezeichnet die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Stellungen bezüglich Erde und Sonne (Glistau, 2015)

Die Schnittlinien von Mondbahn und Ekliptik werden aufsteigender und absteigender Knoten genannt, deren Lage sich langsam durch Präzession verschiebt; die Knotenumlaufperiode beträgt $\sim 18,6$ Jahre (Kuphal, 2013).

1.2.2 Gezeitenkräfte und gebundene Rotation des Mondes

Mit der sogenannten gebundenen Rotation des Mondes wird das Phänomen bezeichnet, dass dieser stets mit derselben Seite der Erde zugewandt ist. Dies liegt daran, dass der Mond für einen Umlauf um die Erde exakt so viel Zeit benötigt wie für eine Drehung um die eigene Achse – ein Ergebnis stetig wirkender Gezeitenkräfte zwischen Erde und Mond. In der frühen Geschichte des Erde-Mond-Systems, als der Mond noch teilweise flüssig und wesentlich näher an der Erde befindlich war als heute, führte die Schwerkraft der Erde dazu, dass der Mond sich allmählich verformte. Diese Verformungen werden „Flutberge“, „Gezeitenbeulen“ oder „*tidal bulges*“ genannt und stellen eine Art Ausbeulung bzw. Erhebung dar, welche den Mond in Richtung der Erde elliptisch verformt und wesentlich dafür verantwortlich ist, dass sich die Rotationen von Erde und Mond heute synchronisiert haben. Die Gravitationskraft der Erde kann hierdurch ein Drehmoment ausüben, indem sie die Flutberge einem Hebel gleich in Richtung Erde zieht, sodass die Drehung des Mondes abgebremst wird (siehe Abb. 3).

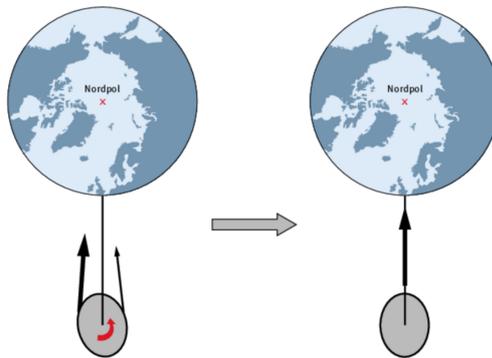


Abbildung 3: Schematische Darstellung der gebundenen Rotation des Mondes: Nur durch eine Angleichung der Eigenrotation auf die Umlaufzeit bleibt dieselbe Seite des Mondes von der Erde aus sichtbar. Durch Gezeitenreibung wurde die Rotation des Mondes gebremst und an die Umlaufperiode angepasst (Titz, 2015)

Durch die andauernde Verformungsarbeit wurde die Rotationsenergie mit der Zeit als Wärmeenergie abgegeben, bis die Eigenrotation der Umlaufzeit angeglichen war. Ab diesem Punkt war der *tidal bulge* in Richtung der Erde ausgerichtet und

die Reibungsverluste ließen nach. Seitdem ist von der Erde aus immer die gleiche Hemisphäre des Mondes zu sehen.

Allerdings war in der Frühzeit die Umlaufperiode wesentlich kürzer als heute. Dass auch heute der viel langsamere umlaufende Mond sich immer noch in gebundener Rotation bewegt, kann nur so verstanden werden, dass die Gezeitenreibung aufgrund der geringen elastischen Verformung des außen längst erstarrten Mondkörpers ausreicht, um die Rotationsperiode immer wieder nachzuregulieren. (Kuphal, 2013)

Diese weicht lediglich durch die sogenannte Libration des Mondes um wenige Grad ab, sodass insgesamt nur in etwa $\sim 59\%$ der Mondoberfläche von der Erde aus zu sehen sind. Die Libration des Mondes meint ein Hin- und Her-Schwingen aufgrund der eigenen Exzentrizität und der Neigung der Rotationsachse gegenüber der Erd-Mond-Bahn. Ein ähnlicher Synchronisationseffekt ist bei sehr vielen weiteren Monden in unserem Sonnensystem zu beobachten. Beispielsweise befinden sich die Galileischen Monde des Jupiter und viele Saturnmonde in einer gebundenen Umlaufbahn mit ihren Planeten. Die Gezeitenkräfte wirken dabei wechselseitig. Einerseits wird die Rotation des Mondes zwar verlangsamt, andererseits bewirkt dies, dass das Drehmoment der Erddrotation in die Mondbahn transferiert wird, wodurch der Mond sich ca. 3-4 cm pro Jahr von der Erde entfernt. Da die Erddrotation dadurch etwas an Energie verliert, werden die Tage um ein paar Millisekunden pro Jahrhundert länger. In etwa 50 Milliarden Jahren würde sich die Erde theoretisch selbst auch in einer gebundenen Rotation mit dem Mond befinden, was bedeuten würde, dass ein Tag auf der Erde so lange dauern würde wie eine komplette Mondrotation um die Erde (Barry, 2024). Doch vermutlich werden bereits vorher andere Ereignisse, wie das Ende des Wasserstoffbrennens unserer Sonne, das Erde-Mond-System so fundamental verändern, dass es dazu nicht kommen wird.

1.2.3 Neigung der Erdachse und Entstehung der Jahreszeiten

Die Jahreszeiten entstehen aus der Neigung der Erdachse relativ zum Orbit um die Sonne. Diese „Schiefe der Ekliptik“ beträgt $23,5^\circ$ (Williams, 2024). Die Erdachse ist dabei vor dem Fixsternhimmel stets gleich orientiert, was zur Folge hat, dass im Laufe des Jahres die Nordhalbkugel gleichermaßen zur Sonne hin und von ihr weg

gerichtet ist. Aufgrund der ekliptischen Neigung erfährt die nördliche Hemisphäre im Juni die steilste und längste Sonneneinstrahlung (Sommersonnenwende), die südliche Hemisphäre hingegen das exakte Gegenteil. Ein halbes Jahr später sind die Rollen vertauscht.

Zwischen diesen beiden Extremen, zur Zeit der Äquinoktien, also der Tage, an denen Tag und Nacht gleich lang sind, ist die Achse seitlich zur Sonne orientiert. Die Sonne steht also senkrecht auf dem Äquator, woraus resultiert, dass „die Erde von Pol zu Pol ausgeleuchtet“ (Hanslmeier, 2016) ist. Die höheren Temperaturen im Sommer resultieren also aus zwei Hauptfaktoren: Einerseits fällt das Sonnenlicht steiler auf die Halbkugel, die der Sonne zugewandt ist, wodurch eine bestimmte Strahlungsmenge durch den steilen Einfallswinkel auf eine geringere Fläche verteilt ist und daher auch mehr Wärmeenergie deponiert wird. Auf der anderen Seite sind die Tage aufgrund der höheren Sonnenposition am Horizont deutlich länger, wodurch mehr Stunden an Sonnenenergie aufgenommen werden können.

Entgegen gängiger Präkonzepte (siehe dazu Kapitel 2.3.5) entstehen die Jahreszeiten „also nicht durch den unterschiedlichen Abstand Erde–Sonne auf Grund der Elliptizität der Erdbahn.“ (Hanslmeier, 2016). Tatsächlich ist es sogar so, dass die Erde der Sonne im Januar am nächsten ist (Perihel, ~ 147 Mio. km), wenn auf der Nordhalbkugel Winter herrscht. Im Sommer hingegen ist die Erde am weitesten von der Sonne entfernt. Allerdings schwankt die einfallende Strahlungsintensität durch die variablen Abstände um gerade mal $\pm 3\%$, was vernachlässigbar klein ist im Verhältnis zu den Effekten der geneigten Achse (Williams, 2024).

1.2.4 Mondphasen

Im Laufe eines Monats durchläuft der Mond die sogenannten Mondphasen, welche alleine von der relativen Position von Sonne, Mond und Erde abhängig sind. Das, was allgemein als Mondphasen bezeichnet wird, sind im Endeffekt verschiedene Blickwinkel auf die Hälfte des Mondes, die der Sonne zugewandt ist. Der Neumond befindet sich beispielsweise fast genau zwischen Erde und Sonne, sodass die der Erde abgewandte Rückseite in Richtung Sonne zeigt und von jener angestrahlt wird. Im Laufe eines Monats, wenn sich der Mond etwas in Richtung Osten bewegt hat, wird nun eine kleine Sichel auf seiner westlichen Seite sichtbar, die nach etwa einer Woche zu einem Halbmond heranwächst. Der Mond befindet sich nun in einem rechten Winkel zur Sonne. In der sogenannten Gibbous-Phase wächst der sichtbare Teil des Mondes

nun innerhalb der nächsten Woche bis zu einem Vollmond an. Der Mond befindet sich nun auf der gegenüberliegenden Seite der Sonne, allerdings nicht innerhalb des Erdschattens, da diese geradlinige Anordnung zu einer Mondfinsternis führen würde. Er liegt allerdings auf einer zur Ekliptik um wenige Grad geneigten Bahn, weshalb diese perfekt geradlinige Anordnung auch nur selten zustande kommt (siehe nächstes Kapitel). Dieser Zyklus nimmt nun seinen Lauf, indem die sichtbare Mondscheibe in den kommenden zwei Wochen in Richtung Westen hin kleiner wird, bis nach etwa $\sim 29,5$ Tagen die Stellung des Neumondes erneut erreicht ist, was der Dauer einer synodischen Umlaufperiode des Mondes entspricht (Williams, 2024) (siehe Kap. 1.2.1). Diese Phasen weisen explizit keinen Zusammenhang mit dem Erdschatten auf, worauf in Kapitel 2.3.3 im Rahmen einiger Schülervorstellungen noch genauer eingegangen werden wird.

1.2.5 Sonnen- und Mondfinsternisse

Astronomische Eklipsen (altgr. *ekleipsis* „ausbleiben, wegfallen“) treten auf, wenn Sonne, Mond und Erde in einer nahezu geraden Linie ausgerichtet sind. Abhängig von der Reihenfolge der Himmelskörper auf dieser Linie ergeben sich die verschiedenen Finsternisse. Wenn sich der Mond zwischen Erde und Sonne ‚schiebt‘, kann er die Sonne in einer Sonnenfinsternis verdecken. Solare Eklipsen sind jeweils nur zur Zeit eines Neumondes möglich, da der Mond sich dann in Konjunktion zur Sonne befindet. Der Schatten des Mondes wird so auf die Erde geworfen und kann entweder die vollständige Sonne oder auch nur Teile derselben verdecken. Die Zone des Kernschattens (auch: die Umbra, von lat. *umbra* „der Schatten“), in der die Sonne völlig verdeckt ist, besitzt dabei eine relativ kleine Größe von nur ca. 270km. Lediglich in diesem zentralen Bereich, der in einem sehr schmalen Streifen um die Erde wandert, ist eine totale Sonnenfinsternis beobachtbar. Außen herum liegt der Halbschatten (Penumbra), ein Bereich, in dem die Sonne nur teilweise bedeckt wird, wodurch hier eine partielle Sonnenfinsternis entsteht.

Umgekehrterweise tritt eine Mondfinsternis dann auf, wenn sich die Erde zwischen Sonne und (Voll-)Mond befindet und der Mond in den Erdschatten eintaucht. Dabei tritt der Mond entweder ganz oder auch nur teilweise in den Kernschatten ein, wobei langwelliges Licht, welches im Falle einer totalen Mondfinsternis noch knapp die Atmosphäre der Erde durchdringen kann, den Mond dunkelrot beleuchtet. Da der Erdschatten größer ist als der Mond selbst, kann die Finsternis von der gesamten

Nachtseite der Erde aus beobachtet werden.

Finsternisse treten jedoch nur dann auf, wenn Neu- und Vollmond zeitgleich mit dem Durchgang des Mondes durch die Ekliptikebene (Mondknoten) zusammenfallen. Dies passiert in etwa zwei Mal pro Jahr und wird als Finsternisperioden bezeichnet (Interrante, 2024). In jeder dieser Perioden können zwischen ein und drei Finsternisse auftreten, wobei häufig eine Sonnen- und eine Mondfinsternis in kurzem Abstand aufeinander folgen. Jedes Jahr gibt es mindestens vier und maximal sieben Finsternisse (Kher, 2025). Die Häufigkeit unterscheidet sich leicht zwischen den beiden Typen; Sonnenfinsternisse passieren weltweit etwas häufiger (mindestens zwei und bis zu fünf pro Jahr) als Mondfinsternisse (zwischen null und drei pro Jahr), wobei die Chance, an einer bestimmten Position auf der Erde eine totale Sonnenfinsternis mitzuerleben, sehr gering ausfällt, da die Totalitätszone sehr klein ist. Statistisch gesehen kann man nur alle drei bis vier Jahrhunderte eine totale Sonnenfinsternis an einem gegebenen Ort beobachten (Zirker und Houfgast, 2025).

1.3 Zur Funktionsweise von Weltraumflügen

Der theoretische Fokus des folgenden Kapitels soll nun auf die Thematik von Weltraumflügen und deren Grundprinzipien gerichtet werden, da in Kapitel 2.3.6 jene Grundlagen benötigt werden, um das Experiment zum swing-by-Manöver nachvollziehen zu können. Einschränkend ist auch hier erneut anzumerken, dass sich die theoretischen Ausführungen inhaltlich lediglich auf die für die späteren Stationen wesentlichen Themen beziehen werden und diese aufgrund des Rahmens der Arbeit auch hier nur knapp und überblicksartig dargestellt werden können.

Das Patched-Conics-Modell

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Berechnung der Flugbahnen von bemannten und unbemannten Raumfahrzeugen (wie z.B. Sonden, Satelliten oder Raumfähren) besteht unter anderem darin, dass das Flugobjekt zu verschiedenen Zeitpunkten der Reise unterschiedlich stark von den jeweiligen Himmelskörpern angezogen wird. Zu Beginn überwiegt zunächst der gravitative Einfluss der Erde, welcher nach kurzer Zeit allerdings schon wieder vernachlässigbar klein wird, wenn die Dominanz der Sonne zunimmt. Der Einfluss der terrestrischen Gravitation wird letztlich durch den des Zielplaneten abgelöst. Diese einzelnen Phasen überschneiden sich zwar,

näherungsweise kann man allerdings annehmen, dass nur ein Himmelskörper das Gravitationsfeld lokal dominiert und das Problem somit auf zwei Körper reduzierbar ist. Genau darin liegt die Idee des sogenannten *Patched-Conics*-Modells. Jeder Abschnitt, in dem der Einfluss eines Planeten überwiegt, nennt sich Sphäre des gravitativen Einflusses, oder kurz SOI. Die jeweiligen Radien dieser SOI sind im Wesentlichen abhängig von der Masse des Planeten (Masse m_p) sowie vom Abstand des Planeten zur Sonne D . Je größer die Masse und die Entfernung des Planeten, desto geringer ist im Vergleich der Einfluss der Sonne, was in einem großen SOI-Radius resultiert. Den Radius kann man näherungsweise über die Formel

$$r_{\text{SOI}} \approx D \left(\frac{m_p}{m_{\odot}} \right)^{2/5} \quad (1.60)$$

bestimmen. Dabei ist (Masse m_{\odot}) die Masse der Sonne. Für die Erde ergibt sich damit eine *sphere of influence* von etwa $9,32 \times 10^5$ km (Walter, 2017). An den Übergängen der einzelnen SOI müssen die Bahnen „gepatched“, also ineinander überführt werden, woher auch der Name dieses Modells kommt.

Bedeutung des Startorts: Schwung durch Erdrotation

Der Beginn einer Weltraumreise liegt stets auf der Erde, dabei ist der Standort der Abschussbasen von Raketen ungemein entscheidend. Diese werden bevorzugt in der Nähe des Äquators gestartet, was vor allem den Vorteil mit sich bringt, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Erde (welche am Äquator am größten ist) genutzt werden kann, um einen zusätzlichen Schub in Richtung Osten zu erhalten. Dies stellt von daher auch die bevorzugte Startrichtung dar, weil somit bis zu 465 m/s aus der Erdrotation genutzt werden können. Um in einen sogenannten LEO, also einen *Low Earth Orbit* einzutreten, ist insgesamt eine Geschwindigkeit von etwa 7,8 km/s notwendig, von der die Rakete unter optimalen Bedingungen dann nur etwa 7,35 km/s aufbringen muss (Australian Space Academy, 2023). Die Äquatorebene ist zudem nur wenige Grad gegenüber der Ekliptik geneigt, was interplanetare Missionen vereinfacht, da alle Planetenbahnen unseres Sonnensystems in der Nähe der Ekliptikebene verlaufen.

Abflugbahnen und Hohmann-Injektion

Die Umlaufgeschwindigkeit des Ausgangsplaneten mit einem Bahnradius um die Sonne von r_0 beträgt $v_0 = \sqrt{\frac{\mu E}{r_0}}$. Hier gilt $\mu = G(M + m)$ mit der Gravitationskon-

stante G , der Masse des Zentralkörpers M und der viel kleineren Masse des umlaufenden Körpers m . Falls der Ausgangsplanet die Erde ist, gilt $v_0 = 29,79\text{km/s}$. Um die Erd-SOI zu verlassen, muss die Sonde durch eine Impulsänderung $\Delta v = v_1 - v_0$ auf eine höhere Bahngeschwindigkeit v_1 gelangen. Dies kann energetisch am sinnvollsten geschehen, wenn die Rakete an der Periapsis (Punkt in der Ellipse mit geringstem Abstand zum Hauptkörper) tangential Schub gibt, sodass sich die Höhe der Apoapsis (gegenüber der Periapsis, Punkt mit dem meisten Abstand) auf die gewünschte Höhe des Zielplaneten verschiebt. Dieser spezielle Übergang zwischen zwei Planetenbahnen wird Hohmann-Transfer genannt. Die Richtung, in die Schub gegeben wird, ist entscheidend dafür, ob die äußeren oder inneren Planeten des Sonnensystems angesteuert werden sollen. Die Bahngeschwindigkeit der Erde, die der Ausgangsgeschwindigkeit entspricht, kann entweder genutzt werden, um durch zusätzlichen Schub in Bewegungsrichtung den Bahnradius zu erhöhen und zu den äußeren Planeten zu gelangen, oder andererseits kann Schub in die entgegengesetzte Richtung eingesetzt werden, um die Ausgangsgeschwindigkeit zu reduzieren und somit mehr in Richtung der inneren Planeten des Sonnensystems abzufallen. Am Zielplaneten angekommen, kann nun durch ein erneutes Zünden der Triebwerke in eine stabile Umlaufbahn eingetaucht oder alternativ ein swing-by-Manöver durchgeführt werden (Walter, 2017).

Swing-by-Manöver: Geschwindigkeit durch Planetenhilfe

Bei einem solchen Manöver kann ohne zusätzlichen Treibstoffverbrauch sowohl die Flugbahn als auch die Geschwindigkeit einer Sonde verändert werden, indem die gravitative Wechselwirkung mit einem anderen Planeten genutzt wird. Die Eintrittsrichtung bestimmt dabei die Zunahme oder auch den Verlust an Geschwindigkeit, denn dieses Manöver kann auch zum Abbremsen genutzt werden. Bei einem Flyby mit prograder (rechtläufiger) Annäherung gibt der Planet einen kleinen Teil seines Impulses an die Sonde ab, wodurch diese schneller wird. Streng genommen verliert der Planet dadurch einen kleinen Teil seines Impulses und wird langsamer. Wenn man allerdings die riesigen Massendifferenzen zwischen beiden Objekten vergleicht, ist dieser Effekt vernachlässigbar. Bei einem Flyby aus retrograder (rückläufiger) Richtung wiederum kann die Sonde abgebremst werden. Je größer der Ablenkwinkel und je schneller der Planet, desto stärker ist auch der Geschwindigkeitsunterschied, der aus dem Manöver resultiert. Ein Praxisbeispiel, in dem diese Technik optimal genutzt wurde, war die *Voyager 2*-Sonde. Diese durchlief während ihrer Mission mehrere swing-by-Manöver und konnte so genug Geschwindigkeit ansammeln, um

dauerhaft unser Sonnensystem zu verlassen (siehe Abb. 4).

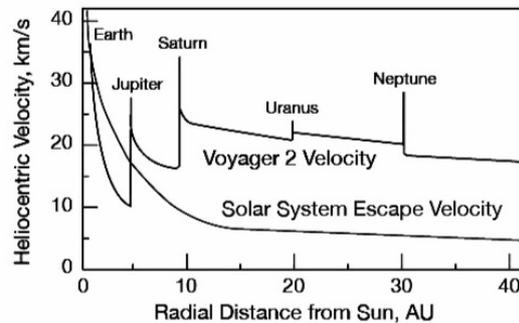


Abbildung 4: Heliozentrische Geschwindigkeit der Raumsonde *Voyager 2* im Vergleich zur Fluchtgeschwindigkeit aus dem Sonnensystem in Abhängigkeit vom Sonnenabstand. Deutlich sichtbar sind die Geschwindigkeitszuwächse bei den swing-by-Manövern an Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun (Matousek, 2025). (Farben wurden vom Verfasser verändert.)

Diese günstige Planetenstellung, in welcher sowohl Jupiter, Saturn, Uranus als auch Neptun für ein Flyby genutzt werden können, tritt nur etwa alle 189 Jahre auf (Walter, 2017).

1.4 Sonderfälle der Gravitation

In Kapitel 1.1.5 wurde bereits ausführlich über die ART und die Gravitation als Krümmung der Raumzeit gesprochen. Auf Basis dieser Vorüberlegungen soll in Folge der Blick auf einige extreme und spannende Phänomene gerichtet werden, die man in der Astrophysik beobachten kann: Schwarze Löcher, die schwersten Objekte in unserem beobachtbaren Universum, aus denen nicht einmal Licht entkommen kann sowie kompakte Doppelsternsysteme mit so geringer Rotationsperiode, dass sie Gravitationswellen erzeugen, die sogar hier auf der Erde noch messbar sind. Im anschließenden Kapitel sollen diese drei Phänomene sowohl im Einzelnen genauer erklärt als auch in einen gemeinsamen Zusammenhang gebracht werden, mit Bezugnahme auf die fundamentalen Konzepte der ART.

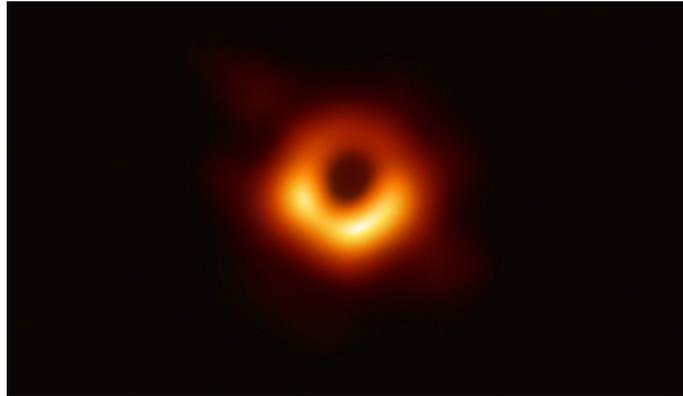


Abbildung 5: Erstes direktes Bild eines Schwarzen Lochs: Das Event Horizon Telescope (EHT) zeigte im April 2019 die Schattenstruktur des supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87. Deutlich erkennbar ist der durch gravitative Lichtablenkung entstehende leuchtende Ring um die ‚dunkle‘ Zentrumsregion. (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019).

1.4.1 Schwarze Löcher

Als Schwarze Löcher werden in der Astrophysik Objekte mit so großer Dichte bezeichnet, dass die daraus resultierende Raumzeitkrümmung nicht einmal Licht entkommen lässt. Wenn also ausreichend Masse auf kleinem Raum konzentriert wird, wird hierdurch die Krümmung der Raumzeit lokal so stark, dass die benötigte Fluchtgeschwindigkeit größer ist als die Lichtgeschwindigkeit. Die Grenze, ab der die Geschwindigkeit des Lichts nicht mehr ausreicht, um zu entkommen, wird auch der „Ereignishorizont“ genannt. Ein derart gewaltiges Objekt hat passenderweise auch einen ähnlich gewaltigen Ursprung – Schwarze Löcher entstehen nämlich beim Kollaps sehr massereicher Sterne (etwa > 20 Sonnenmassen), nachdem diese am Ende ihres Kernfusionszyklus’ angekommen sind (Kazmierczak, 2024). Mit dem Ende der Fusionsprozesse fällt der Strahlungsdruck weg, der den Stern im Gleichgewicht gehalten und das Eigengewicht kompensiert hat. Ohne diesen Gegendruck implodiert der gesamte Stern und es kommt (falls genug Masse vorhanden ist) zu einer *Supernova*. Dabei prallen die äußeren Schichten gegen den Kern und werden durch diesen Stoß und den enormen Druck, der dadurch entsteht, zurückgeschleudert. Der verbleibende Kern, der extrem dicht und heiß ist, kollabiert weiter und wird so zu einem stellaren Schwarzen Loch. Die Masse derselben kann durch neuerliche Kollisionen mit Sternen oder anderen schwarzen Löchern immer mehr zunehmen, bis ggf. ein supermassereiches Schwarzes Loch entsteht, wie beispielsweise Sagittarius A* im

Zentrum unserer Milchstraße mit einer unglaublichen Masse von etwa 3,7 Mio Sonnenmassen (Max-Planck-Institut für Radioastronomie, n.d.). Nach oben sind hierbei keine Grenzen gesetzt.

Die meisten stellaren Schwarzen Löcher wurden in Doppelsternsystemen entdeckt, in denen sich einer der beiden Sterne irgendwann zu einem Schwarzen Loch entwickelt hat. Dabei kann das Schwarze Loch Gas vom Begleitstern anziehen, welches auf einer Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch herum beschleunigt wird und Röntgenstrahlung aussendet, die wir auf der Erde erfassen können. Daher werden diese Art von Systemen unter anderen auch *x-ray binaries* (Röntgendoppelsterne) genannt. Allein in der Milchstraße gibt es davon etwa 50 bestätigte und vermutet werden in unserer Galaxie insgesamt bis zu 100 Millionen stellare Schwarze Löcher. Auch das allererste entdeckte stellare Schwarze Loch (Cygnus X-1) ist ein solcher Röntgendoppelstern und wurde in den 1960er Jahren aufgrund seiner Röntgenemissionen gefunden (Gohd, 2024).

Mathematisch ließen sich diese Objekte bereits 1916 beschreiben, wobei Karl Schwarzschild eine exakte Lösung für die in Kapitel 1.1.6 erwähnten Einsteinschen Feldgleichungen für ein kugelsymmetrisches Schwarzes Loch ohne Rotation fand. Sie zeigt, dass jedes Massenobjekt beim Erreichen des Schwarzschild-Radius

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad (1.61)$$

zum Schwarzen Loch werden kann. Die Erde mit einer Masse von $M_E = 5,972 \cdot 10^{24} \text{kg}$ (Universität zu Köln, 2015) müsste nach Gleichung (1.61) auf die Größe einer Murmel mit Radius von etwas weniger als 9 mm komprimiert werden, damit das Licht dem Ereignishorizont nicht mehr entkommen könnte. Diese Theorie wurde knapp 50 Jahre später von Roy Kerr erweitert, in dem Sinne, dass der Drehimpuls des Sterns, aus dem ein stellares Schwarzes Loch entsteht, nicht verloren gehen kann, sondern erhalten bleiben muss. In der Kerr-Lösung kommt also noch ein Parameter für den Drehimpuls J hinzu, dieser ist achsensymmetrisch statt kugelsymmetrisch. Diese Lösung geht in die Schwarzschild-Lösung über, wenn man den Drehimpuls auf Null setzen würde, doch in der Realität sind Schwarze Löcher mit hoher Wahrscheinlichkeit rotierend (Chruściel, 2010). Im Innern befindet sich laut der ART eine Singularität, also ein Ort, an dem die Krümmung der Raumzeit und somit die Dichte formal unendlich groß wird (Malek, 2020). Hier versagen alle klassischen physikalischen Theorien und die Raumzeit ist nicht mehr definiert, was zeigt, dass die ART nicht vollständig sein kann, sondern beispielsweise eine neue quantengravitative Be-

schreibung notwendig ist. Die Form dieser Singularität würde nach Schwarzschild einem einzigen Punkt entsprechen, doch nach Kerr würde dieser aufgrund der Rotation zu einem Ring verformt werden, der in der Rotationsebene liegt.

In Kapitel 1.1.7 wurde bereits grundlegend die gravitative Zeitdilatation behandelt, doch was dort noch Gedankenspiele oder Verschiebungen im Mikrosekundenbereich darstellte, geht hier in Extreme über. Wenn man direkt beobachten könnte, wie ein Objekt in ein Schwarzes Loch fällt, würde man feststellen, dass es sich immer weiter zu verlangsamen scheint, je näher es dem Ereignishorizont kommt. Von außen betrachtet friert das Objekt direkt vor dem Horizont scheinbar ein und man wird niemals sehen können, wie es über den Horizont hinausgeht (Gohd, 2024). Noch unvorstellbarer wird es, wenn man nun versucht, gedanklich die Perspektive zu wechseln und selbst in das Schwarze Loch hineinzufallen. Auf diese Weise würde man Zeit und Raum ganz anders wahrnehmen als aus der externen Perspektive, da die Eigenzeit weiterhin normal verläuft. Man fiel wie gewohnt mit konstanter Beschleunigung dem Ereignishorizont entgegen und würde diesen in endlicher Zeit erreichen. Jedoch würde dies aus der Perspektive des Fallenden so aussehen, dass die Zeit im Universum mit zunehmender Nähe zum Horizont immer schneller verlief. Dies geschähe bis zu dem theoretischen Punkt, an dem man das Universum in unendlicher Geschwindigkeit und bis zu dessen Ende altern sähe, während man am Ereignishorizont angekommen wäre.

Dieses Gedankenspiel ist natürlich aus unzähligen Gründen nur auf der theoretischen Ebene möglich. Einer dieser Gründe ist ein Effekt, der von Stephen Hawking scherzhaft als „Spaghettifizierung“ bezeichnet wurde (Gohd, 2024) und meint, dass in der Nähe eines Schwarzen Lochs so große Gezeitenkräfte wirken, dass man buchstäblich wie eine Spaghetti in die Länge gezogen werden würde, da die dem Ereignishorizont zugewandte Seite bereits um ein Vielfaches stärker angezogen werden würde als die davon abgewandte Seite. Außerdem ist das Licht mit zunehmender Nähe zum Schwarzen Loch rotverschoben, da die Photonen beim Überwinden des hohen Gravitationspotentials so viel Energie verlieren, dass dies in einer geringeren Frequenz und somit einer größeren Wellenlänge resultiert (Max-Planck-Gesellschaft, 2018). Zudem wird es zunehmend lichtschwächer und ist am Horizont praktisch unsichtbar.

1.4.2 Doppelsternsysteme

Ein wesentlich häufigeres, aber dadurch nicht weniger spannendes Phänomen bilden die sogenannten Doppelsternsysteme. Gemeint sind damit zwei Sterne, die einander um einen gemeinsamen Schwerpunkt (auch Baryzentrum genannt) umkreisen. Etwa die Hälfte aller sonnenähnlichen Sterne befindet sich in Doppel- oder Mehrfachsternsystemen und besonders massereiche Sterne kommen in Doppelsystemen sogar häufiger vor als alleine. Die Umlaufzeiten sind direkt an die Entfernung der beiden Sterne gekoppelt. Mit sinkender Entfernung sinkt auch die Umlaufzeit; teilweise können diese nur wenige Tage betragen, wenn sich die Sterne sehr nahe kommen. Dies ermöglicht wiederum spezifische Wechselwirkungen, die sich ausschließlich in derartigen Systemen finden lassen, wie beispielsweise den Massentransfer zwischen Partnersternen. Manchmal kommt es vor, dass beide Sterne unterschiedlich alt sind und daher nur einer der beiden ein Roter Riese ist. Dehnt sich dieser über eine bestimmte kritische Grenze hinweg aus (die sogenannte Roche-Lobe Grenze), dann gibt er einen Teil seiner Materie an den Partnerstern ab (Fraknoi u. a., 2022). Handelt es sich bei diesem um ein kompaktes Objekt, entsteht ein wie oben bereits erläutertes *x-ray-binary*-System, wobei die abgegebene Materie eine heiße, im Röntgenbereich strahlende Akkretionsscheibe um das kompakte Objekt herum bildet (Kazmierczak, 2024). Bei diesen kompakten Objekten kann es sich um Schwarze Löcher, Weiße Zwerge oder Neutronensterne handeln. Da das Phänomen von *x-ray-binaries* in Kombination mit Schwarzen Löchern bereits im vorangegangenen Abschnitt ausführlich behandelt worden ist, soll sich die nachfolgende Darstellung mit dem Fall von Weißen Zwergen und Neutronensternen als Massenakzeptoren befassen.

Ein Weißer Zwerg ist der kompakte Überrest eines Sterns, der nach dem Erlischen seiner Kernfusionsprozesse in sich zusammenfällt. Das kann allerdings nur für Sterne mit relativ geringen Massen passieren, da ansonsten der Entartungsdruck nicht ausreichen würde, um den Weißen Zwerg zu stabilisieren und stattdessen ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch entstehen würde. Diese Massengrenze, unter welcher Weiße Zwerge existieren können, nennt sich „Chandrasekhar-Grenze“ und liegt bei etwa 1,4 Sonnenmassen (Chandrasekhar, 1983). Wenn ein solcher Weißer Zwerg nun nicht unmittelbar in der Nähe dieser Grenze liegt und gleichzeitig Wasserstoff durch seinen Partnerstern ansammelt, kann es zu sogenannten *Novae* kommen. Dabei entzündet sich der angesammelte Wasserstoff an der Oberfläche, was in einem enormen Helligkeitsausbruch resultiert, wodurch der Stern allerdings nicht zerstört wird. Für den Fall, dass dieser tatsächlich bereits in der Nähe der

Chandrasekhar-Grenze liegt und diese durch kontinuierliche Akkretion überschritten wird, explodiert er in kürzester Zeit in einer Typ-Ia-Supernova (Fraknoi u. a., 2022). Das für die Astronomie besonders Wertvolle an diesem Phänomen ist, dass alle Weißen Zwerge, denen dieses Schicksal widerfährt, die gleiche Masse aufweisen, da dieser Effekt immer direkt nach dem Überschreiten der 1,4 Sonnenmassengrenze auftritt. Die Explosion hat daher eine standardisierte maximale Helligkeit, welche für die Entfernungsbestimmung genutzt werden kann. Sie bilden also sogenannte „Standardkerzen“.

Bei Supernovae dieses Typs wird der Stern zwar vollständig zerstört, doch bei Novae anderen Typs bleibt beispielsweise ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch zurück. So können nun verschiedenste weitere Konfigurationen entstehen, wie beispielsweise Pulsar-Doppelsternsysteme aus einem Neutronenstern und einem Hauptreihenstern oder gar gebundene Systeme mit zwei kompakten Objekten. In seltenen Fällen können auch beide Partnersterne zu einer Supernova werden, ohne sich gegenseitig zu zerstören. Der 1974 Hulse-Taylor-Pulsar PSR B1913+16, bestehend aus zwei Neutronensternen, ist hierfür ein passendes Beispiel. Seine Sterne kreisen in einer solch engen Bahn umeinander, dass ihre Umlaufzeit gerade einmal ca. 8 Stunden beträgt. Die Besonderheit an diesem System ist, dass es das erste war, mit dem Gravitationswellen indirekt gemessen werden konnten. Es wurde festgestellt, dass der Energieverlust durch die Emission von Gravitationswellenstrahlung genau einer Verlangsamung der Bahngeschwindigkeit entspricht, welche die beiden Neutronensterne dazu zwingt, sich stetig näher zu kommen. Für diese bahnbrechende Entdeckung wurde 1993 der Nobelpreis an Hulse und Taylor verliehen (Center for Computational Relativity and Gravitation, 2025).

Durch das dauerhafte Aussenden von Gravitationswellen und den damit schrumpfenden Bahnradius der Partnersterne steigt deren Orbitalgeschwindigkeit stetig. Sie umkreisen sich immer näher und immer schneller, bis beide Objekte nach einigen Millionen Jahren schließlich kollidieren und miteinander verschmelzen (LIGO Laboratory, 2025). Durch eine solche Kollision werden besonders starke Gravitationswellen ausgesendet und häufig kommt es zu Phänomenen wie einem Gammablitz oder einer Kilonova, einem gewaltigen Aufleuchten durch nukleare Zerfallsprodukte schwerer Elemente (NASA, 2025). Auch bei der Verschmelzung von Schwarzen Löchern kommt es in der sogenannten *Ringdown-Phase* zur Abstrahlung charakteristischer Gravitationswellen, welche Rückschlüsse auf Masse, Rotation und Symmetrie zulassen. All diese Prozesse sind heute Targets der modernen astrophysikalischen

Forschung, weshalb im letzten Kapitel dieses fachwissenschaftlichen Überblicks eben diese Gravitationswellen abschließend genauer erläutert werden sollen.

1.4.3 Gravitationswellen

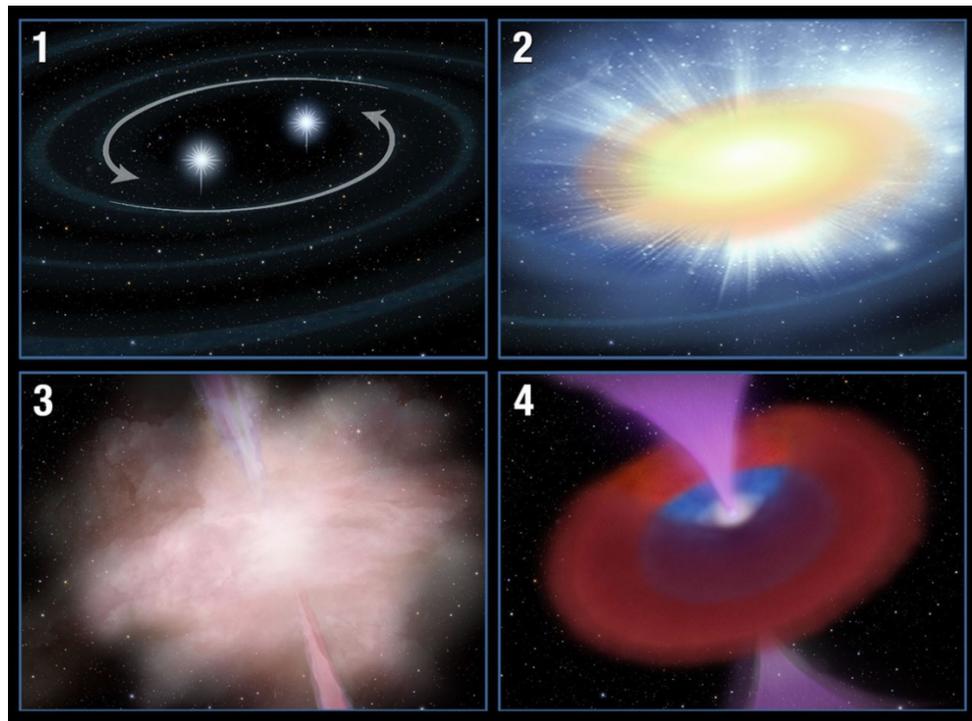


Abbildung 6: Künstlerische Darstellung einer Neutronensternkollision und der daraus resultierenden Kilonova:

- 1) Zwei Neutronensterne umkreisen sich und senden Gravitationswellen aus, wodurch sie einander spiralförmig annähern.
- 2) In den letzten Millisekunden verschmelzen sie und erzeugen einen kurzen Gammablitz.
- 3) Radioaktives Material wird herausgeschleudert und leuchtet nach kurzer Zeit im Infrarot – ein Phänomen, das als *Kilonova* bezeichnet wird.
- 4) Zurück bleibt ein massereiches kompaktes Objekt (entweder ein Schwarzes Loch oder ein massereicher Neutronenstern) mit einer expandierenden Trümmerscheibe und ausströmendem Teilchenwind (NASA, 2025).

Die Theorie über die Existenz von Gravitationswellen folgte kurz nach der Veröffentlichung der ART im Jahr 1916 von Albert Einstein. Die Feldgleichungen ließen sich

mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitende Transversalwellen als Störung in der Raumzeit zu, doch Einstein hatte in Frage gestellt, ob diese jemals experimentell nachzuweisen sein würden, da die Effekte, welche durch eine nicht sphärisch symmetrische Beschleunigung großer Massen entstehen, extrem schwach ausfallen (Dietrich, 2019). Eine Supernova mit einer theoretisch perfekt kugelsymmetrischen Explosion würde demnach keine Gravitationswellen emittieren. Typische Phänomene stellen hingegen, wie oben bereits beschrieben, enge Doppelsternsysteme oder der asymmetrische Kollaps von Sternen dar, wobei vor allem die Kollisionen und Verschmelzungen kompakter Objekte besonders gut nachweisbar sind (LIGO Laboratory, 2025).

So geschah es auch im September 2015, als bei einer Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit jeweils 30 Sonnenmassen zum ersten Mal Gravitationswellen direkt gemessen werden konnten. Bei der Verschmelzung kommt es zu einem sogenannten *chirp-Signal*, einem typischen ansteigenden Frequenzverlauf, welcher von beiden LIGO-Detektoren in den USA gemessen werden konnte. Unter dem Namen GW150914 von Abbott et al. 2016 publiziert, wurde diese Entdeckung 2017 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet (Dietrich, 2019).

Die Lichtgeschwindigkeit wurde im Laufe dieser Arbeit bereits mehrfach als die schnellste Geschwindigkeit unseres Universums hervorgehoben, doch dass auch die Gravitation sich an diese Geschwindigkeitsbegrenzung hält, wurde erst 2017 eindrucksvoll bestätigt. Das zugrundeliegende Ereignis war nichts Geringeres als die Kollision zweier Neutronensterne. Dadurch trafen sowohl das Gravitationswellensignal GW170817, als auch ein Gammablitz GRB 170817A fast genau gleichzeitig auf der Erde ein, mit einer Differenz von nur zwei Sekunden (Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), 2017). Die gemessene Geschwindigkeit der Gravitationswellen wich nur um wenige Bruchteile von der Lichtgeschwindigkeit ab und untermauert damit Einsteins Vorhersage.

2 Didaktisch-methodische Konzeption der Führung

Im Rahmen der vorliegenden Zulassungsarbeit wurde die bestehende Führung an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte neu konzipiert und aufgearbeitet. Nachdem im vorangegangenen Abschnitt bereits alle fachwissenschaftlichen Grundlagen gelegt wurden, die zum Verständnis der Führungsinhalte notwendig sind, soll im folgenden Kapitel das Augenmerk auf die didaktisch-methodischen Konzepte gerichtet werden, welche den Begründungszusammenhang für die Ausgestaltung der neuen Führungsstationen liefern.

2.1 Zielgruppe und Rahmenbedingungen

Ehrenamtliche Mitarbeiter der Sternwarte versuchen, in grob 90 Minuten eine Einführung in die Geschichte, Physik und Instrumente der Einrichtung zu geben, wobei bei gutem Wetter die Möglichkeit einer Himmelsbeobachtung durch die Teleskope besteht. Damit alle Altersgruppen inkludiert werden können, werden die Führungen explizit auch für Kinder (ab 8 Jahren) und Schulklassen angeboten, wobei auf diese Zielgruppe in dieser Arbeit ein besonderer Fokus gerichtet wird.

2.1.1 Struktur, Dauer und Organisation

Die Planung einer solchen Führung ist an gewisse organisatorische und strukturelle Rahmenbedingungen geknüpft, welche auch die didaktischen und methodischen Entscheidungen, die im nächsten Kapitel getroffen werden, beeinflussen. Die Führung soll möglichst in einer Gesamtgruppe erfolgen. Auch wenn eine Unterteilung

in Kleingruppen didaktische Vorteile mit sich bringen würde, ist hier der Personalbedarf und die Raumplanung der limitierende Faktor. Lediglich für den Fall, dass die Gruppengröße eine Anzahl von 15 Personen übersteigt, ist ein zweiter Guide vorgesehen.

Die Führung wird durch Mitarbeitende der Sternwarte durchgeführt und offiziell vom Förderverein angeboten. Die Guides bringen hierbei durchaus unterschiedliche fachliche Hintergründe mit; neben Lehramtsstudierenden könnten auch Promovierende, Postdocs oder Professorinnen und Professoren die Führung übernehmen. Entsprechend heterogen fallen die pädagogisch-didaktischen Vorerfahrungen der Vortragenden aus. Dieser Diskrepanz wird durch einen optionalen Leitfaden begegnet, der im Rahmen dieser Arbeit als unterstützende Struktur erstellt wurde (siehe Anhang 2). Er bietet inhaltliche Orientierung und methodisch-didaktische Vorschläge, ist jedoch nicht als verpflichtendes Drehbuch zu verstehen.

Bei der Strukturierung der Führung wird im Folgenden häufig von „Stationen“ geredet. Gemeint sind hier weniger klassische arbeitsteilige Lernstationen, sondern eher aufeinanderfolgende, inhaltlich und räumlich strukturierte Abschnitte, die trotz punktueller interaktiver Elemente durchgängig moderiert und dialogisch aufgebaut sind.

Die Führung beginnt mit einer Begrüßung im Außenbereich, gefolgt von einer kurzen Einführung in die Sternwarte als historische und aktive Forschungseinrichtung. Anschließend folgen thematisch gegliederte Abschnitte zur Struktur des Sonnensystems, zur Gravitation, zur Entstehung der Mondphasen und zur gebundenen Rotation sowie zu Maßstäben und Entfernungen im Weltall. Die Inhalte sind einerseits so gegliedert, dass ein roter Faden erkennbar bleibt, andererseits bauen sie aber nicht zwangsläufig aufeinander auf, in dem Sinne, dass man alle Stationen der Reihe nach absolvieren muss, damit darauffolgende Inhalte verstanden werden können. So bleibt die Führung in ihrer Dramaturgie flexibel. Je nach Gruppendynamik, Interesse und Zeit kann auf einzelne Stationen vertiefend, kürzend oder auch gar nicht eingegangen werden.

Das grundlegende didaktische Prinzip der Führung beruht dabei auf Anschaulichkeit. Das Ziel besteht darin, abstrakte Konzepte durch Visualisierungen und Experimente auf einer empirisch-konkreten Ebene erfahrbar zu machen und dadurch das Verständnis zu erleichtern. Eigenaktivität und entdeckendes Lernen sind aus konzeptuellen und organisatorischen Gründen nur punktuell möglich, etwa bei ausgewählten Experimenten, an denen einzelne Kinder freiwillig teilnehmen können.

Der zeitliche Rahmen beträgt, wie eingangs bereits kurz erwähnt, in etwa 90 Minuten. Dieser Umfang bietet einerseits genug Zeit, um alle oben genannten Themenbereiche überblicksartig vorzustellen und lässt sogar noch etwas Raum, um ggf. besonders spannende Themen etwas ausführlicher zu besprechen, ohne die Aufmerksamkeitsspanne der Kinder zu überschreiten. Hierbei ist bereits ein zeitlicher Puffer für Fragen, Vertiefungen und spontane Anpassungen während der Führung eingeplant, welcher zudem einen guten Wechsel zwischen Inputphasen, handlungsorientierten Abschnitten und Gesprächsphasen erlaubt.

Je nach Wetterlage und Tageszeit bieten sich zwei Abschlussformen für die Führung an: Zum einen stellt die Teleskopbeobachtung nach Sonnenuntergang bei klarem Himmel natürlich ein besonderes Highlight für die Besuchergruppe dar. Hierbei können die Lernenden selbst mit den modernen Teleskopen der Sternwarte eindrucksvolle Himmelskörper wie beispielsweise einige Planeten des Sonnensystems, Kugelsternhaufen oder sogar die Monde des Jupiter beobachten. Falls die Wetterlage dies nicht zulässt, bietet die Sternwarte in der Bibliothek eine Räumlichkeit, in der ebenfalls eindrucksvolle Bilder gezeigt werden können, die versuchen zu illustrieren, was durch das Teleskop hätte gesehen werden können. Darüber hinaus ergibt sich hier ein optimaler Zeitpunkt, um einige Themen, die besonderes Interesse geweckt haben, mithilfe einer flexiblen Präsentation noch einmal genauer zu besprechen (siehe dazu (Nagel, 2025)).

Insgesamt ist die Führung in sich abgeschlossen und benötigt nicht zwangsläufig vertieftes fachliches Vorwissen. Aufgrund dieses zeitlichen und inhaltlichen Rahmens eignet sie sich somit beispielsweise hervorragend für Halbtagesexkursionen im schulischen Kontext.

2.1.2 Adressatenanalyse – Astronomie für Kinder und Jugendliche

Generell eignet sich die Führung an der Sternwarte für alle Altersgruppen ab ca. acht Jahren, insbesondere auch für Erwachsene. Das hier erarbeitete Konzept richtet sich jedoch speziell an SuS der Jahrgangsstufen fünf bis 13, da die folgenden Inhalte und Methoden auf das Kompetenzniveau dieser Altersgruppen abgestimmt sind. Natürlich müssen auch innerhalb dieser Zielgruppe wesentliche Unterschiede bedacht werden. Das Lernen innerhalb der Sekundarstufe 1 ist oft von Neugierde und Staunen über die Faszination des Weltalls geprägt, wohingegen ältere SuS in höheren

Klassen Bereitschaft zur abstrakten Auseinandersetzung mit fach-physikalischen Konzepten zeigen. Die Gravitation kann dabei als Bindeglied zwischen beiden Altersklassen wirken. Während sich jüngere Kinder auf Modelle, Analogien und Experimente stürzen, wie beispielsweise den Gravitationstisch, der später noch genauer vorgestellt wird, haben ältere bereits einen Zugang zu konzeptioneller Tiefe und sind in der Lage, die Größenverhältnisse einzuordnen oder die ART im Ansatz zu verstehen. Durch die Modularität der Experimente und Materialien ist eine situative Komplexitätsreduktion und damit eine individuelle Anpassung an die Altersklasse flexibel möglich. Prinzipiell wäre der Einsatz der Materialien natürlich auch für Kinder unterhalb der hier definierten Altersgrenze möglich, dies sollte jedoch mit Vorsicht geschehen, da die Gefahr besteht, dass unter Umständen hierdurch mehr neue Präkonzepte (siehe Kapitel 2.2.1) entstehen, als vorhandene korrigiert werden. Ein Grund dafür liegt darin, dass Kinder diesen Alters häufig noch nicht zwischen Modellen als herunterreduzierter Repräsentation der Wirklichkeit und den realen Phänomenen unterscheiden können. Es mangelt den Lernenden häufig noch an der grundlegenden Kompetenz, die als Modell dargestellten Experimente und Anschauungen adäquat auf die reale Welt zu übertragen; stattdessen werden diese für sich genommen schon als „Wahrheit“ angesehen (Urhahne u. a., 2019). Ein Beispiel dafür wäre die Bewegung der Murmeln auf dem Gravitationstisch (siehe Kapitel 2.3.6). Die Murmeln, die Repräsentanten der Planeten in unserem Sonnensystem darstellen und deren Bahndynamik abbilden sollen, werden durch die Reibung des Tuchs immer langsamer und ‚fallen‘ nach und nach in die Mitte des Tisches. Dass eine solche reibungsbedingte negative Beschleunigung aufgrund des im Universum herrschenden Vakuums nicht stattfinden kann, ist den meisten Lernenden ab einem gewissen Alter bewusst. Eigene Erfahrungen während der Führung haben gezeigt, dass kleinere Kinder nun beispielsweise vermuten, dass die Erde früher oder später in die Sonne stürzen werde.²

2.1.3 Lerndesign und Zielsetzung

Bevor die konkrete Konzeption der Führung vorgestellt werden kann, soll zunächst die zugrunde liegende didaktisch-pädagogische Zielsetzung erörtert werden. Diese

²Dem Verfasser ist bewusst, dass die hier geschilderte Beobachtung rein anekdotisch betrachtet werden muss und keinen repräsentativen Aussagewert besitzt.

orientiert sich im Wesentlichen an der gängigen Taxonomie nach Atkinson (Atkinson, 2022), welche die Lernziele in fünf wesentliche Kategorien unterteilt. Für das Design der Führung stehen vor allem die (meta-)kognitiven sowie affektiven Lernziele im Vordergrund.

(Meta-)kognitive Lernziele

Auf Ebene der Sachkompetenz soll durch die Führung zunächst ein grundlegendes Verständnis von zentralen astrophysikalischen Phänomenen, insbesondere rund um den Gravitationsbegriff, geschaffen werden. Beispielsweise soll das Sonnensystem im Hinblick auf Größen und Entfernungsverhältnisse, der Mond mitsamt Phasen und gebundener Rotation sowie die generelle Vorstellung von Gravitation als Krümmung der Raumzeit auch von Laien verstanden werden können. Dies gelingt vor allem dann, wenn wissenschaftliche Erklärungsmodelle an bereits vorhandene Alltagserfahrungen im Sinne eines Konzeptwechsels anknüpfen. Einige Möglichkeiten, um dies zu erreichen, werden ab Kapitel 2.2.2 genauer erklärt. Hinsichtlich der metakognitiven Lernziele (Atkinson spricht hier von Abstrahieren, Kontextualisieren und vor allem Konzeptualisieren) sind im Rahmen der Führung besonders die Experimente und Demonstrationen von Relevanz. Durch den Wechsel von rezeptiven und produktiven Phasen können so einerseits die Selbstwirksamkeit gesteigert und andererseits forschend-entdeckendes Lernen ermöglicht werden. Hierbei geht es insbesondere um die Arbeit an und mit vorhandenen Präkonzepten, was in Kapitel 2.2.1 noch genauer dargelegt wird. Abschließend fungiert auch der Lernort selbst als Lerngegenstand, indem die Geschichte, Aufgaben und Arbeitsweise von Sternwarten thematisiert wird (siehe dazu genauer Kapitel 2.1.5).

Affektive Lernziele

Auf der affektiven Ebene des Lernens geht es insbesondere darum, die motivationale Bereitschaft der Besucherinnen und Besucher und insbesondere die der Kinder zur Auseinandersetzung mit astronomischen, bzw. generell naturwissenschaftlichen Themen zu befördern. Diese Inhalte sollten daher nicht wie im traditionellen Unterricht hauptsächlich aus Zahlen und Formeln bestehen, sondern praktisch erfahrbar und erlebbar gemacht werden. Hierfür eignet sich eine solch authentische Lernumgebung wie die Sternwarte in besonderer Weise, da sie durch historische Ausstellungsstücke sowie die Himmelsbeobachtung durch moderne Teleskope einzigartige Möglichkeiten zur Auseinandersetzung mit dem Gegenstand bietet.

2.1.4 Begründung der thematischen Schwerpunktsetzung

Die Gravitation stellt, wie oben bereits besprochen, eine der vier fundamentalen Kräfte der Physik dar, was ihr eine enorme fachliche Relevanz verschafft. Sie beeinflusst nahezu alle Bewegungsphänomene in unserem Universum, wie beispielsweise die Fallbewegung auf der Erde, die Umlaufbahn des Mondes oder die Planetenbewegung um die Sonne.

Auf die Frage hin, was die Schwerkraft denn überhaupt sei, erhält man von SuS oft die naive Definition „dadurch fallen Dinge runter“. Diese Vorstellung von Gravitation ist, wenn auch nicht grundsätzlich falsch, so doch sehr einseitig und verkürzt gedacht. Deswegen soll im Rahmen der Führung ein reflektierter Umgang mit bestehenden Alltagsvorstellungen („Schwerkraft gibt es nur auf der Erde“ oder „Im Weltall steht alles still“) befördert werden, um am Ende ein differenzierteres Bild vom Wesen der Gravitation zu vermitteln und damit einen Konzeptwandel anzuregen.

Verschiedene astrophysikalische Themengebiete und wiederkehrende Fragen von Besucherinnen und Besuchern³ werden durch das Phänomen der Gravitation vereint; diese bietet somit einen geeigneten roten Faden, an dem sich die gesamte Dramaturgie der Führung ausrichten kann. Jede der später genauer vorgestellten Stationen verhandelt einen jeweils spezifischen Aspekt der Thematik, jedoch nicht in isolierter Form, sondern kontextualisiert und an die Erfahrungswelt der Zielgruppe angepasst.

2.1.5 Die Sternwarte als Lernort

Die Dr. Karl Remeis-Sternwarte in Bamberg wurde im Jahr 1886 mit Mitteln aus dem Nachlass ihres Namensgebers gegründet und fungiert seitdem als ein Ort des astronomischen Forschens und Lernens. Ihre reale Bedeutung als wissenschaftliche Forschungsstätte verleiht ihr ein enormes Maß an Authentizität und kann auf Seiten der Lernenden hierdurch Neugierde und Faszination erwecken. Sie stellt zudem einen

³Oft in der nicht unproblematischen Formulierungsweise: „Warum fällt der Mond nicht runter?“ Hierauf müsste man streng genommen antworten, dass er ja genau dies eigentlich tue.

historischen Lernort dar, da sie Exponate aus verschiedenen Epochen der astronomischen Forschung museumsartig ausstellt und didaktisch zugänglich macht. Kinder und Jugendliche können somit einen Eindruck von aktueller wie historischer Forschungspraxis erhalten.

Als außerschulischer Lernort bietet die Sternwarte die allgemein damit verbundenen Chancen. Sie macht forschend-entdeckendes Lernen möglich, bietet ein authentisches Lernumfeld, kann Interesse und Motivation steigern und eine greifbare Verbindung zwischen Theorie und Anwendung schaffen (Baar und Schönknecht, 2018).

Durch die verschiedenen Räume und Bereiche kann das episodische Gedächtnis unterstützt werden, wenn Orte wie der Ausstellungsgang oder die Beobachtungskuppel mit dem Wissen aus den Stationen verknüpft werden und damit Nachhaltigkeit erzeugen.

2.2 Didaktisch-methodische Grundlagen

2.2.1 Präkonzepte als Ausgangspunkt didaktischer Planung

Der Begriff „Präkonzept“, oder synonym auch „Schülvorstellung“ genannt, bildet einen zentralen Bestandteil der Physikdidaktik, weshalb in diesem Kapitel genauer erläutert werden soll, worum es sich hierbei handelt und inwiefern sich die didaktischen Entscheidungen, die im Rahmen der Konzeption der Führung getroffen wurden, daran orientierten.

„Schülvorstellungen beschreiben Dispositionen, d.h. Tendenzen von SuS, physikalische Begriffe in einer bestimmten Weise zu interpretieren oder Phänomene in einer bestimmten Weise zu beschreiben, die sich von der fach-physikalischen Darstellung unterscheidet“ (Schecker u. a., 2018). Dies bedeutet, dass Lernprozesse maßgeblich davon geprägt sind, welche Vorstellungen – in unserem Fall über die Physik und das Universum – von den Lernenden bereits mitgebracht werden. Diese Präkonzepte stellen somit alltagsnahe Deutungsmuster dar, welche individuell plausibel erscheinen, aber einer wissenschaftlichen Überprüfung oft nicht oder nur unzureichend standhalten. Duit formuliert dazu passend: „Vorstellungen bestimmen das Lernen, weil man das Neue nur durch die Brille des bereits Bekannten ‚sehen‘ kann“ (Duit, 2004).

Grundlegend unterscheidet die Forschung drei verschiedene Arten bzw. Ursprünge von Präkonzepten: Sprache, Wahrnehmungsmuster und Erfahrungen (Schecker u. a., 2018). Die Alltagssprache verwendet häufig Begriffe wie „Kraft“, „Energie“ oder „Schwere“, die dort allerdings teilweise anders verstanden werden können als in einem naturwissenschaftlichen Gebrauchszusammenhang. Sprachliche Bedeutungsüberschneidungen können somit falsche Vorstellungen evozieren. Auch der im Zentrum dieser Arbeit stehende Begriff der „Schwerkraft“ ist in dieser Hinsicht durchaus nicht unproblematisch, da er vorwissenschaftliche Vorstellungen fördern oder verstärken kann, die dem physikalischen Verständnis von Gravitation entgegenstehen, indem er die Idee einer von der Erde ausgehenden, nach unten ziehenden, aktiven Kraft impliziert. Daraus kann nun u.U. die Folgeannahme resultieren, dass es „im Weltall keine Schwerkraft“ gebe, da allgemein bekannt ist, dass die Astronauten auf der ISS schweben, dass es also keine Gravitation mehr gibt, sobald man die Erde verlässt. In Wahrheit wirkt auf der ISS nahezu dieselbe Gravitationskraft wie auf der Erdoberfläche. Durch alternative Formulierungen und didaktische Zugriffe könnte nun die Einsicht befördert werden, dass die Schwerelosigkeit dort lediglich ein Effekt des freien Falls in der Umlaufbahn ist und keineswegs durch die Abwesenheit von Schwerkraft entsteht.

Auch stark vereinfachte oder leicht missverständliche Darstellungen in Lehrbüchern, Schulmaterialien oder ganz allgemein Medien helfen bei der Entstehung von Präkonzepten. In vielen Schaubildern (siehe Abb. 7) werden beispielsweise die Planeten in annähernd gleichen Abständen und gleicher Größe dargestellt, was natürlich nicht ansatzweise der Wirklichkeit entspricht. Natürlich ist es im Rahmen modellhafter und schematischer Darstellungen bisweilen sinnvoll oder gar notwendig, Veränderungen bzw. Vereinfachungen vorzunehmen, doch in diesem Fall ist es besonders wichtig, deutlich zu machen, dass es sich hierbei um eine von der Realität abweichende Darstellung handelt (ein Hinweis, der auch im hier gezeigten Beispiel fehlt (Goruma, 2024)). Damit erhalten die SuS gar nicht erst die Chance, solchen Vorstellungen zu entkommen und schließen daraus, dass beispielsweise die Erde größer ist als der Saturn oder dass die Abstände zwischen den Planeten stets die gleichen sind (mehr dazu in Kapitel 2.3.7).

Doch nicht nur aus Sprache und Wahrnehmungsmustern heraus, sondern auch durch die eigenen Alltagserfahrungen können Präkonzepte entstehen. Lernende übertragen hierbei bereits gemachte Erfahrungen aus ihrer Lebenswelt auf physikalische Phänomene und versuchen, diese damit in Einklang zu bringen.

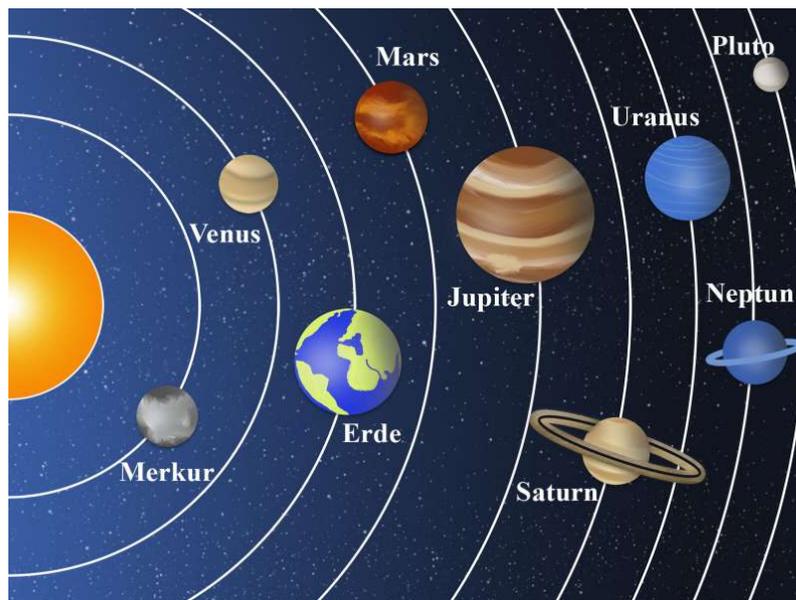


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung des Sonnensystems mit stark verzerrten Größen- und Abstandsverhältnissen. Derart nicht maßstabsgetreue Illustrationen prägen oft das Vorstellungsbild von Lernenden und können zu Präkonzepten führen, etwa der Annahme, die Planeten seien ähnlich groß und gleichmäßig verteilt (Goruma, 2024).

Dabei entstehen oft scheinbar logische, aber fachlich falsche Analogien. Beispielsweise macht man auf der alltäglichen Ebene die Erfahrung, dass bei der Annäherung an ein Feuer die spürbare Wärme zunimmt. Der Abstand wäre somit für den gefühlten Temperaturunterschied verantwortlich. Daraus resultiert nun ggf. die Vorstellung, dass die Erde der Sonne im Sommer näher sein müsse als im Winter und die Jahreszeiten somit durch die variierende Distanz von Erde und Sonne entstehen und nicht durch die Neigung der Erdachse (siehe Kapitel 1.2.3).

Präkonzepte sind jedoch nicht immer gleich falsch und im Alltag häufig sogar sehr sinnvoll, um entweder den Redefluss der Sprache nicht zu behindern oder um komplizierte Inhalte leichter zugänglich zu machen. Sie sind jedoch äußerst problematisch, wenn sie nicht eingeordnet und als solche erkannt werden. Vor allem in der Astronomie ist es schwierig, richtig mit diesen Vorstellungen umzugehen, da direkte Erfahrungen mit vielen Phänomenen oft nicht möglich sind. Vieles lässt sich nur mit teurem und großem Equipment aus weiter Ferne beobachten und die meisten Eigenschaften wie Raum, Zeit und Maßstäbe liegen weit außerhalb der menschlichen Anschauung. Präkonzepte sind also nicht von vornherein schlecht und bis zu einem gewissen Grad auch unvermeidbar, weshalb das Ziel nicht in der Verdrängung, son-

dern vielmehr in der produktiven Nutzung liegen sollte. Das Lernen sollte auf diesen Vorstellungen aufbauen, diese hinterfragen und die Grenzen derselben aufzeigen, um sie durch einen Konzeptwechsel in anschlussfähige Alternativen umzuwandeln. Eine in der Physikdidaktik sehr beliebte Methode, mit der genau das gelingen kann, wird nun im folgenden Abschnitt genauer erklärt.

2.2.2 Lernen durch Konzeptwechsel

Posners Theorie zum Umgang mit Präkonzepten von 1982 beschreibt keine Korrektur, da dies implizieren würde, dass die vorausgehende Vorstellung entwertet wird, sondern eine tiefgreifende kognitive Umstrukturierung (Posner u. a., 1982). Laut Posner et al. müssen vier Bedingungen erfüllt sein, damit Lernende ihre Alltagsvorstellung langfristig durch das neue wissenschaftliche Konzept austauschen.

Die erste Bedingung ist die Unzufriedenheit mit der bisherigen Vorstellung. Es muss von selbst festgestellt werden, dass die eigene Erklärung nicht mehr ausreicht, um einen Sachverhalt vollständig korrekt zu beschreiben. Dies geschieht meist, indem dem Lernenden eine neue Situation präsentiert wird, die durch das Präkonzept nicht erklärbar ist. Dies löst einen kognitiven Konflikt und laut Posner eine 'Unzufriedenheit' aus. Diese Unzufriedenheit braucht es, damit der Lernende von sich aus die Bereitschaft entwickelt, alte Vorstellungen anzupassen und in ein neues Konzept zu überführen, welches auch das hinzugekommene Problem zu lösen vermag. In Abbildung 8 sieht man jedoch deutlich, dass es damit noch nicht getan ist.



Abbildung 8: Ein Mädchen (Lucy) behauptet, Schnee komme aus dem Boden – Der Junge (Charlie Brown) fragt, wie der Schnee dann durch den Bürgersteig kommt. Die neue, nicht erklärbare Situation löst einen kognitiven Konflikt aus, der zur ersten Bedingung des Konzeptwechsels nach Posner führt: Unzufriedenheit mit dem bisherigen Erklärungsmodell, welche hier allerdings in Frustration ausartet, da keine attraktive Alternative dargeboten wurde (Schulz, 1955).

Das neue Konzept muss nämlich auch verständlich sein, damit es ohne größere Hürden angenommen werden kann. Diese Verständlichkeit bezieht sich zunächst primär auf die sprachliche und visuelle Zugänglichkeit, weniger auf das kognitive Verstehen an sich. Sprache, Modelle, Analogien, Grafiken und generelle Hilfsmittel, die benutzt werden, um die Präsentation des neuen alternativen Konzepts zu unterstützen, müssen prinzipiell verstanden werden können.

Die dritte Bedingung wäre nun, dass dieses neue Modell auf Anhieb plausibel sein muss, also logisch und stimmig erscheint. Es muss zum eigenen Weltbild und Alltagsverständnis passen, aber auch konsistent mit anderen Fachbereichen sein. Alle bisher bekannten Phänomene, die mit diesem Konzept in Zusammenhang stehen, müssen dadurch erklärbar werden, insbesondere natürlich auch die neue Situation, die ggf. zur Unzufriedenheit geführt hat. Es soll also in bereits bestehendes Wissen integriert werden und dieses gewinnbringend ergänzen.

Zu guter Letzt sorgt die Fruchtbarkeit dafür, dass das neue Modell auch auf zukünftige Situationen über den bereits bekannten Kontext hinaus anwendbar ist. Das neue Konzept erklärt also nicht nur die aktuelle Situation, sondern kann auch neue Fragen aufwerfen oder in Zukunft beim Problemlöseprozess helfen. Diese vierte Phase erfordert ein gewisses Maß an Reorganisation oder besser noch Transfer, weshalb sie oft aus Zeitgründen im schulischen Kontext weggelassen wird. Dies führt allerdings leider dazu, dass der Konzeptwechsel nicht komplett abgeschlossen wird und die Lernenden bei zukünftigen Problemen wieder zu neuen Präkonzepten tendieren oder das neue Konzept nach gewisser Zeit wieder verwerfen.

Wie die Umsetzung dieser einzelnen Stufen an einem Beispiel konkret aussehen kann, wird in Kapitel 2.3 im Detail gezeigt, wenn die einzelnen Stationen der Führung didaktisch vorgestellt und begründet werden.

2.2.3 Didaktische Rekonstruktion astrophysikalischer Inhalte

Nachdem nun ausführlich reflektiert wurde, wie ein Wechsel von vorwissenschaftlichen zu fachlichen Konzepten ablaufen kann, soll nun mithilfe der Methode der didaktischen Rekonstruktion (Kattmann, 2024) aus der Nahaufnahme des inneren Lernprozesses etwas herausgezoomt und überlegt werden, mit welchen Lernangeboten und didaktischen Strukturen optimale Rahmenbedingungen hierfür geschaffen

werden. Primär bezieht sich dieses Modell auf den Physikunterricht, doch viele Elemente sind ebenfalls auf externe Fortbildungsmöglichkeiten wie die Führung übertragbar.

Das Modell umfasst drei eng miteinander verbundene Bereiche: die fachliche Klärung, die Erfassung der Lernerperspektive und die didaktische Strukturierung (vgl. Abb. 9).

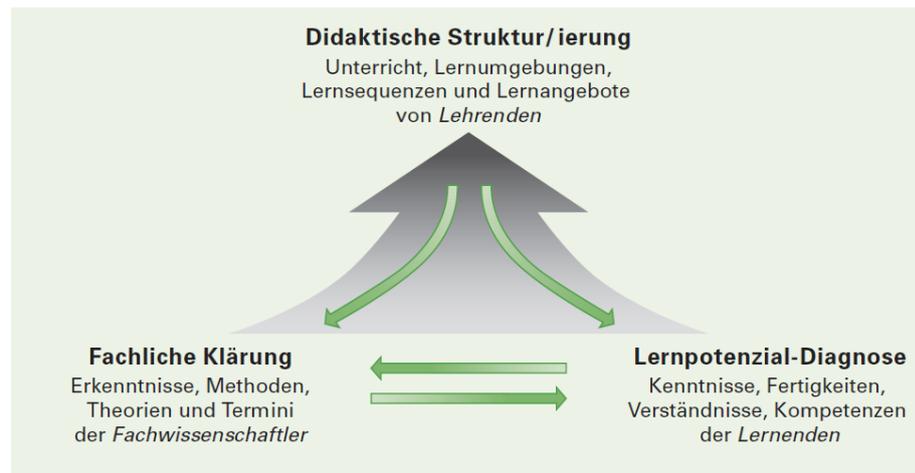


Abbildung 9: Das Modell der didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann et al.: Die didaktische Planung basiert auf drei wechselseitig aufeinander bezogenen Aufgabenbereichen – der fachlichen Klärung, der Diagnose von Lernvoraussetzungen und der didaktischen Strukturierung. Ziel ist die Entwicklung von Lernangeboten, die sowohl wissenschaftlich fundiert als auch anschlussfähig für die Lernenden sind (Kattmann, 2015).

Die didaktische Rekonstruktion versucht unter anderem, ähnlich des eben besprochenen Modells nach Posner, auf möglichst lernförderliche Art und Weise wissenschaftliche Themen und Schülervorstellungen systematisch zu verknüpfen, mit dem Ziel, die Lerninhalte so zu gestalten, dass sie verständlich und anschlussfähig sind. Die grundlegende Annahme dieser beiden Theorien ist die Einsicht, dass die fachliche und subjektive Perspektive gleichermaßen wichtig sind und somit auch zu gleichen Teilen in den didaktischen Planungsprozess mit einbezogen werden müssen. Dabei liegt der Unterschied hauptsächlich darin, dass Posners Modell die theoretische Grundlage für individuelle Lernprozesse liefert, während die didaktische Rekonstruktion konkrete Strategien zur Gestaltung dieser entsprechenden Lernumgebungen bereitstellt. Der Zusammenhang beider Theorien lässt sich gut anhand der obigen Grafik erkennen (siehe Abb. 9), in welcher sich der Übergang von Lernpotential-Diagnose

zu fachlicher Klärung durch Posner konkretisieren ließe. Die Rückrichtung sowie die Einflussnahme der didaktischen Strukturierung auf diese beiden Punkte kommen bei Kattmanns Theorie nun neu hinzu.

Die fachliche Klärung umfasst größtenteils Kapitel 1 dieser Arbeit und bildet mit ihren fachwissenschaftlichen Inhalten das konzeptionelle Rückgrat der Führung. Doch damit sind noch nicht alle Bedingungen für einen erfolgreichen Lernprozess gegeben, denn nur durch den Einbezug der Lernendenperspektive durch die Analyse von Präkonzepten, eigenen Deutungsmustern und Alltagserfahrungen kann dies nachhaltig entstehen. Wie Kattmann betont, ist es ein zentrales Ergebnis der Forschung, „dass alternative Schülervorstellungen [...] das Ergebnis ernsthafter Bemühungen sind, natürliche Phänomene zu verstehen“ und sich im Unterricht „erstaunlich widerstandsfähig gegen Veränderungen“ zeigen (Wandersee u. a., 1995). Diese beiden Punkte stehen nicht unabhängig nebeneinander, sondern beeinflussen sich gegenseitig in einem iterativen Planungsprozess. Die Gegenstände des Unterrichts sind dabei nicht gegeben, sondern entstehen erst durch eine bewusste didaktische Strukturierung auf Basis beider Perspektiven.

Hierdurch sollen Lerngelegenheiten geschaffen werden, in denen die Schülerperspektiven und die fachlich korrekte Sichtweise gleichermaßen berücksichtigt und in ein lernwirksames Verhältnis gebracht werden. Es geht darum, „die Vorstellungen von Schülern und Wissenschaftlern in Vermittlungsabsicht zusammenzubringen“ (Kattmann, 2024). Dies geschieht durch das Einsetzen von Modellen und Analogien, Visualisierungen, Experimenten, gezielten Fragen oder Gesprächsimpulsen und die Arbeit mit kognitiven Konflikten. Lernende sollen dabei nicht nur Wissen aufnehmen, sondern selbst an der Vermittlung und Entstehung dieses Wissens teilhaben. Konkrete Vorschläge für die genaue Umsetzung folgen in Kapitel 2.3. Wie unterschiedlich Lerninhalte aufgrund von Präkonzepten wahrgenommen werden können und wie wichtig es deshalb ist, mit diesen Bedeutungsüberlagerungen richtig umzugehen, zeigt die Karikatur von Roland Bühs in Abbildung 10. Dazu heißt es: „Alltagsvorstellungen der Lernenden können fachliche Vorstellungen überbieten“ (Kattmann, 2015).

Die dargestellten theoretischen Grundlagen, von der Bedeutung der Schülervorstellungen über das Modell des Konzeptwechsels bis hin zur didaktischen Rekonstruktion, bilden das Fundament der inhaltlichen und methodischen Planung der Führung. In der folgenden Umsetzung werden diese Prinzipien nicht abstrakt fortgeführt, sondern konkret angewendet – an Stationen, die zentrale Aspekte der Gravitation

exemplarisch aufgreifen und durch geeignete didaktische Mittel für die Zielgruppe erschließbar machen.

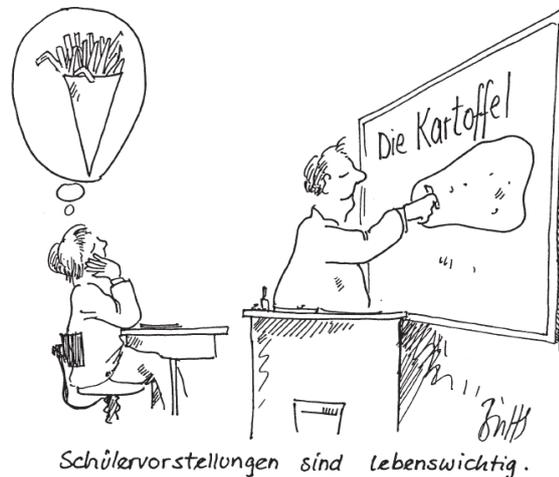


Abbildung 10: Die Karikatur zeigt, wie Begriffe im Unterricht individuell interpretiert werden: Der Lehrer erklärt „die Kartoffel“, der Schüler denkt an Pommes. Sie illustriert, dass fachliche Inhalte durch subjektive Vorstellungen der Lernenden gefiltert werden und daher eine bewusste Auseinandersetzung mit Alltagsvorstellungen erforderlich ist (Kattmann, 2015).

Die didaktische Reduktion fachlicher Inhalte, die Auswahl der Methoden und der Umgang mit typischen Lernschwierigkeiten werden dort jeweils am Beispiel deutlich. Alle Präkonzepte sind außerdem für die bessere Übersicht mitsamt Quellen und einer kurzen fachlichen Erklärung zusätzlich im Anhang „Präkonzepte und Quellen“ zu finden.

2.3 Methodik und Umsetzung der einzelnen Stationen

2.3.1 Begrüßung und Verhalten in der Forschungseinrichtung

Zu Beginn der Führung begrüßt der Guide die Gruppe im Außenbereich der Karl Remeis-Sternwarte, sofern es das Wetter zulässt. Speziell mit kleineren Kindern ist

es wichtig, vorab generelle Verhaltensregeln zu klären, bevor die Sternwarte betreten wird. Mit dem Hinweis, dass es sich um eine echte Forschungseinrichtung handelt, in der auch am Abend in den anliegenden Büros noch gearbeitet wird, sollen die Kinder sensibilisiert werden, einen gewissen Lautstärkepegel nicht zu überschreiten. Wie in einem Museum sollen auch die Ausstellungsstücke nicht ungefragt berührt werden und ein allgemeines Verantwortungsbewusstsein gegenüber dem Ort geschaffen werden. Wichtig ist dabei ein klarer, aber immer freundlicher und einladender Tonfall, da es natürlich nicht das Ziel sein kann, die Gruppe einzuschüchtern. Daher soll direkt im Anschluss ein kurzer Ausblick auf die bevorstehenden 90 Minuten gegeben und die Führung als gemeinsame Entdeckungsreise eröffnet werden. Es sollte deutlich gemacht werden, dass es nicht darum geht, so viel Faktenwissen wie möglich zu vermitteln, sondern um die Neugierde und Faszination rund um das Universum, mit der deutlichen Einladung, viele Fragen zu stellen.

2.3.2 Modell des Sonnensystems (Tellurium)

Nach der Begrüßung wird die Gruppe in die Eingangshalle geführt, in der sich der erste große Teil der Führung abspielt. Dort ist ein bewegliches Modell des inneren Sonnensystems aufgebaut, ein sogenanntes Tellurium. Nachdem sich alle Anwesenden rund um das Tellurium versammelt haben, kann zunächst das Eis gebrochen werden, indem die Kinder gefragt werden, was sie denn schon alles über unser Universum und das Sonnensystem wüssten. Somit erhält der Guide eine grobe Vorahnung über den Wissensstand der Kinder und gleichzeitig wird von Anfang an vermittelt, dass es gewünscht ist, sich einzubringen und Fragen zu stellen. Meistens werden von den Kindern unter anderem die Planeten des Sonnensystems aufgezählt, die anschließend als Überleitung am Tellurium gezeigt werden können. In der Mitte befindet sich eine kleine Lampe, die die Sonne repräsentieren soll, umringt von Merkur, Venus, Erde und Mars. Die Erde ist jedoch der einzige bewegliche Planet in diesem Modell. Während Merkur, Venus und Mars starr auf ihrer Umlaufbahn ausharren, kann sich die Erde elektrisch angetrieben sowohl um die Sonne als auch um sich selbst drehen. Unser Mond ist ebenfalls Teil des Modells und bewegt sich auf einer geneigten Achse um die Erde. Die äußeren Planeten sowie einige Sternbilder sind nur symbolisch auf der inneren Kugelschale aufgedruckt, die das Tellurium umgibt (siehe Abb. 11). Dabei sollte unbedingt erläutert werden, dass es sich lediglich um ein vereinfachtes Modell handelt und dieses weder Größen- noch Abstandsverhältnisse

korrekt darstellt. Dass diese explizite Einschränkung unbedingt notwendig ist, da Kinder solche Modelle oft unterbewusst mit der Realität gleichsetzen und so neue Präkonzepte entstehen können, wurde bereits an früherer Stelle thematisiert und soll hier noch einmal betont werden.



Abbildung 11: Das elektrisch betriebene Tellurium in der Haupthalle der Sternwarte veranschaulicht die Bewegung von Erde und Mond im inneren Sonnensystem. Als didaktisches Modell unterstützt es die Einführung in grundlegende astronomische Konzepte.

Das Modell kann anschließend dazu genutzt werden, die grundlegenden Eigenschaften der Planeten unseres Sonnensystems zu erklären. Dabei können die Unterschiede zwischen den inneren Gesteins- und den äußeren Gasplaneten verdeutlicht sowie einige ausgewählte interessante Fakten über die einzelnen Planeten präsentiert werden. Diese Phase soll weniger der Auflistung kleinster Details dienen, sondern lediglich die beeindruckendsten Informationen zielgruppengerecht darstellen. Abstrakte Fakten oder Zahlenangaben sind für jüngere Kinder nur schwer greifbar, sodass hier der Fokus auf anschauliche Vergleiche oder bildhafte Vorstellungen gelegt werden sollte, wie zum Beispiel „der Mars sieht rot aus und hat zwei kleine Monde, die übersetzt Angst und Schrecken heißen“ oder „Jupiter ist schwerer als alle anderen Planeten des Sonnensystems zusammen“.

Bei älteren Kindern hingegen kann man weitere ausgewählte Fakten einbringen, wie beispielsweise Umlaufzeiten oder Besonderheiten der Atmosphären. Die Venus kann hinsichtlich ihres Treibhauseffektes gut mit der Erde verglichen werden. Falls dies

bei den Besuchern auf Interesse stößt, könnte man darauf aufbauend ganz generell über Bedingungen reden, die es benötigt, damit Leben auf einem Himmelskörper möglich ist.

Eine entscheidende Rolle spielt bei dieser Station die didaktische Reduktion – nicht durch das Weglassen von Inhalten, sondern durch das gezielte Aussuchen anhand der Relevanz, Anschaulichkeit und Anschlussfähigkeit im Sinne der didaktischen Rekonstruktion (vgl. Kap. 2.2.3). Der Guide muss an dieser Stelle sorgfältig abwägen, welche Inhalte geeignet erscheinen und situativ entscheiden, wie tief in das Thema eingestiegen werden soll, abhängig von den Impulsen und dem Vorwissen der Kinder.

2.3.3 Konzeptwechsel zu Mondphasen

Im zweiten Teil der ersten Station soll es vor allem um die Bewegungen in unserem Sonnensystem gehen und die damit einhergehenden Phänomene. Im Zuge dessen sollen einige Schülervorstellungen benannt und mithilfe der im Folgenden präsentierten Experimente in ein fachlich korrektes Konzept überführt werden. Den Grundstein legt dabei eine Studie von Danaia und McKinnon, welche eine Reihe von Schülervorstellungen rund um astronomische Konzepte gesammelt und auf ihre Häufigkeit in den Jahrgangsstufen sieben bis neun untersucht haben (Danaia und McKinnon, 2008). Demnach kannten nur etwa 10 % der SuS die korrekte Antwort auf die Frage nach der Entstehung der Mondphasen, etwa 30 % der Befragten brachten zumindest teilweise korrekte Vorstellungen mit. Der Rest hatte entweder überhaupt keine Idee, wie solch ein Phänomen zustande kommt oder eine alternative Vorstellung davon. Mit einer Antworthäufigkeit von über 50 % wurde in der neunten Klasse das Präkonzept genannt, dass die Mondphasen durch den Schatten entstünden, den die Erde auf den Mond werfe. Diese hohe Zahl kann dadurch begründet werden, dass in der Schule lediglich spektakulärere Phänomene wie Mond- und Sonnenfinsternisse behandelt werden, bei welchen Schatten eine zentrale Rolle spielen. Bei diesem unterrichtsinduzierten Präkonzept wird daher die Rolle, die die Erde z.B. bei einer Mondfinsternis spielt, fälschlicherweise auf die Entstehung der Mondphasen übertragen. Nun ist es Aufgabe dieser Station, die Vorstellung der SuS zu dem in Kapitel 1.2.4 fachlich korrekten Konzept umzuwandeln.

Das Tellurium kann in Bewegung gesetzt werden und so die Umlaufbahn der Erde

um die Sonne sowie die geneigte Umlaufbahn des Mondes um die Erde demonstrieren. Entsprechend der Vorstellung müsste die Erde nun immer (außer bei Vollmond) einen Schatten auf den Mond werfen. Für die SuS wird schnell ersichtlich, dass dies in der geometrischen Anordnung nicht sein kann, was nach Posners Theorie Unzufriedenheit mit dem vorhandenen Konzept aufkommen lässt (vgl. Kapitel 2.2.2). Es kann gezeigt werden, dass die Mondphasen durch die relative Position von Sonne, Erde und Mond zueinander entstehen. Mit entsprechender Erklärung durch den Guide sollte das Tellurium als Modell im Sinne der Anschaulichkeit für die SuS verständlich und das neue Konzept auf Anhieb plausibel sein, da es das Phänomen erklären kann, das dafür benötigte Vorwissen vermittelt wurde und es nicht im Widerspruch zu anderen Konzepten steht.

Andernfalls kann dies durch den zweiten Teil des Experiments mithilfe eines eingebundenen Versuchs geschehen: Hier wird die Beobachtungsperspektive so verändert, dass die Lernenden selbst die Rolle der Erde übernehmen. Eine Styroporkugel auf einem kurzen Holzstab soll den Mond symbolisieren und leicht über Kopfhöhe mit ausgestrecktem Arm in der Hand gehalten werden. Für einen optimalen Effekt sollten die Lichter abgedunkelt oder ausgeschaltet werden, sodass die einzige Lichtquelle eine Taschenlampe ist, die am Ende des Raums befestigt oder vom Guide in der Hand gehalten wird. Diese Taschenlampe soll die Sonne darstellen und beleuchtet das Erde-Mond-System, das jetzt aus Kind und Styroporkugel besteht, von der Seite. Wenn sich die Versuchsperson nun, wie im realen System auch, mit gestrecktem Arm entgegen des Uhrzeigersinns um die eigene Achse dreht, kann aus der eigenen Perspektive beobachtet werden, wie sich die Phasen des Mondes durch den Betrachtungswinkel verändern (siehe Abbildung 12).

Somit wurde ein eingebundener Versuch geschaffen, welcher nicht nur die Verständlichkeit und Plausibilität des neuen Konzeptes verstärkt, sondern es auch zu einem körperlich erfahrbaren Erlebnis macht. Dabei ist es allerdings essentiell, dass der „Mond“ über Kopfhöhe gehalten wird, um einen Schattenwurf durch den eigenen Körper zu vermeiden. Dieser könnte ansonsten das vorhandene Präkonzept sogar verstärken, weshalb es umso wichtiger ist, auch hier zu betonen, dass es sich dabei nur um ein Modell handelt und dieses somit auch gewisse Einschränkungen mit sich bringt. Der letzte wesentliche Schritt des Konzeptwechsels ist die Anschlussfähigkeit an weitere Phänomene, also die „Fruchtbarkeit“ nach Posner (Posner u. a., 1982). Es müssen also weiterführende Phänomene gefunden werden, die ebenfalls sinnvoll durch dieses Konzept erklärt werden können.

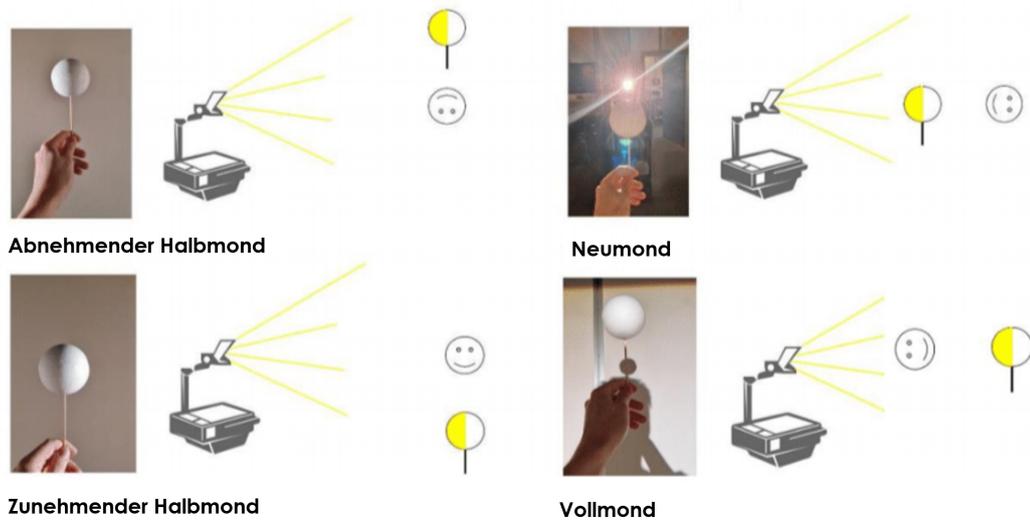


Abbildung 12: Darstellung der vier Hauptphasen des Mondes im eingebundenen Schülerversuch. Die Versuchsperson hält einen Styroporball als „Mond“ leicht über Kopfhöhe und dreht sich im Licht einer fixen Lichtquelle. Die Beleuchtungssituation wird aus der Perspektive der „Erde“ beobachtet und zeigt exemplarisch, wie sich die sichtbare beleuchtete Fläche des Mondes je nach Stellung im Umlauf verändert (eigene Darstellung).

Dafür wären nun Sonnen- und Mondfinsternis hervorragend geeignet. Im Tellurium wird sichtbar, dass diese nur entstehen können, wenn sich die drei Himmelskörper genau in einer Linie befinden. Dies ist auch im eingebundenen Versuch nachspielbar, indem die Styroporkugel auf Kopfhöhe gehalten wird. Es wird verdeutlicht, dass das Szenario der Mondfinsternis die einzige Konstellation darstellt, in der die Erde in der Lage ist, einen Schatten auf den Mond zu werfen. Andersherum kann mit der Kugel die Lichtquelle blockiert und so eine Sonnenfinsternis aus der eigenen Perspektive simuliert werden. Auch die Frage des Zusammenhangs/Unterschieds zwischen Sonnenfinsternis und Neumond, sowie Mondfinsternis und Vollmond kann mit dem neuen Konzept beantwortet werden und ist somit in vollstem Umfang anschlussfähig, wodurch zuletzt alle vier Kriterien des Konzeptwechsels nach Posner realisiert werden.

2.3.4 Konzeptwechsel zur gebundenen Rotation des Mondes

Das nächste Präkonzept, welches bei der Konzeption der Führung berücksichtigt wurde, betrifft die gebundene Rotation des Mondes. Dem Großteil der SuS ist das umgangssprachliche „Mondgesicht“ wohlbekannt und einige stellen sich daraufhin die berechtigte Frage, wie es denn sein kann, dass dieses „Gesicht“ immer, wenn der Mond sichtbar ist, auf die Erde „blickt“. Anders gesagt, der Mond ist stets mit der gleichen Seite der Erde zugewandt. Das erfahrungsbasierte Präkonzept, das aus dieser Beobachtung fälschlicherweise resultiert, lautet „der Mond dreht sich nicht um seine eigene Achse“ (Barrier, 2010). Der Begriff „Rotation“ wird mit einer sichtbaren Drehung gleichgesetzt und da im eigenen Bezugssystem eine solche Drehung nicht sichtbar ist, entsteht der Eindruck, dass keine Rotation stattfindet.

Zur didaktischen Arbeit an diesem Präkonzept wird erneut ein eingebundener Versuch verwendet, um sowohl die Unzufriedenheit mit dem bisherigen Konzept auszulösen, als auch die Verständlichkeit und Plausibilität des neuen Konzepts zu fördern. Die SuS sollen sich jeweils zu zweit gegenüberstehen und Erde und Mond repräsentieren. Die Versuchsperson, die den ‚Mond‘ darstellt, soll zweimal um die ‚Erde‘ herumlaufen. Diese hat dabei die Aufgabe, den Versuchspartner zu beobachten und zu versuchen, ihm kontinuierlich ins Gesicht zu schauen. Beim ersten Umlauf soll sich der ‚Mond‘ gemäß des Präkonzeptes nicht um die eigene Achse drehen. Hierbei stellt die ‚Erde‘ bereits nach einer viertel Umdrehung fest, dass sie das Gesicht des Partners nicht länger sehen kann, sondern zuerst nur noch dessen Ohr und nach einer halben Umdrehung den Hinterkopf (vgl. Abb. 13 (links)). Das eigene Erleben widerspricht also der Vorstellung eines nicht rotierenden Mondes und führt zur Unzufriedenheit mit dem bestehenden Konzept. Daher soll der ‚Mond‘ nun beim zweiten Umlauf die gebundene Rotation simulieren, sich also bei jeder viertel Drehung um die ‚Erde‘ auch um ein Viertel um sich selbst drehen (vgl. Abb. 13 (rechts)). Das Ergebnis: Der Augenkontakt bleibt erhalten und die ‚Erde‘ betrachtet immer dieselbe Seite des ‚Mondes‘. Diese als gebundene Rotation bezeichnete Bewegung stellt das tatsächliche Verhalten des Mondes dar und soll als neues Konzept in das Vorwissen der Lernenden integriert werden. Die neue Erklärung, dass der Mond sich genauso schnell um die eigene Achse drehen muss wie um die Erde, ist nach der körperlich-anschaulichen Erfahrung verständlich und auf Anhieb plausibel, da die Versuchspersonen unmittelbar wahrnehmen, wie dieser Effekt zustande kommt. Vertiefend könnte noch (angepasst an das entsprechende Vorwissen der SuS) der physikalische Hintergrund aus Kapitel 1.2.2 erläutert werden, nämlich dass die ge-

bundene Rotation langfristig durch die Gezeitenkräfte hervorgerufen wurde.

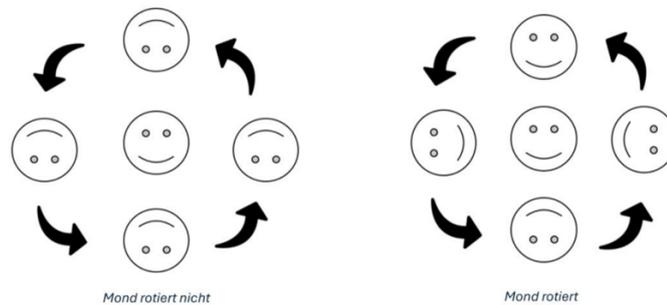


Abbildung 13: Schematische Darstellung zweier Bewegungsmodelle zur Mondrotation im eingebundenen Schülerexperiment. Links: Der Mond bewegt sich ohne Eigenrotation um die Erde – aus Sicht der Erde ändert sich dadurch kontinuierlich das sichtbare „Gesicht“ des Mondes. Rechts: Der Mond führt bei jeder Viertel-Umlaufbewegung auch eine Viertel-Drehung um die eigene Achse aus. Durch diese gebundene Rotation bleibt aus Sicht der Erde immer dieselbe Seite des Mondes sichtbar – dies entspricht der realen Bewegung des Mondes im Erde-Mond-System (eigene Darstellung).

Im Sinne der Anschlussfähigkeit an weitere Phänomene kann auch das Verhalten vieler anderer Monde in unserem Sonnensystem auf diese Weise erklärt werden, sowie der Tag- und Nachtzyklus und die Libration des Mondes.

2.3.5 Konzeptwechsel zu Jahreszeiten

Der letzte Konzeptwechsel, der mithilfe des Telluriums initiiert werden soll, ist die Entstehung der Jahreszeiten und der Veränderung der Tag- und Nachtlängen. Aufgrund der geneigten Erdachse ist dieses Modell hierfür besonders geeignet. Beide Phänomene sind den SuS aus ihren Alltagserfahrungen heraus bestens bekannt, doch problematischerweise liefern gerade derartige (auf lebensweltlicher Betrachtung beruhende) Annahmen oft falsche Erklärungsmuster. Das hierdurch induzierte Präkonzept ist die Vorstellung, die Jahreszeiten entstünden durch den schwankenden Abstand von Erde und Sonne (Danaia und McKinnon, 2008). Aus Sicht der SuS und im Übrigen auch vieler Erwachsener erscheint diese Vorstellung plausibel. Wer sich schon einmal an einem Lagerfeuer die Schuhsohlen verbrannt hat, wird daraus gelernt haben, in Zukunft mehr Abstand zu halten – so wie die Erde dies

vermeintlich im Winter tut. Doch wie bereits in Kapitel 1.2.3 erwähnt, ist es in der Realität genau andersherum, was eine großartige Möglichkeit bietet, die SuS mit den Schwächen ihres eigenen Konzepts zu konfrontieren.

Die Erde befindet sich zwar tatsächlich auf einer elliptischen Bahn um die Sonne, wodurch der Abstand um etwa fünf Millionen Kilometer im Jahresverlauf schwankt, doch dabei ist sie der Sonne genau dann am nächsten, wenn auf der Nordhalbkugel Winter herrscht. Durch diesen gezielten Impuls, mit dem der Moderator die SuS konfrontiert, sind diese aufgrund der entstehenden kognitiven Dissonanz gezwungen, im Widerspruch zur Alltagsannahme umzudenken. Damit wurde der Weg für ein neues Konzept geebnet, wobei nun die geneigte Erdachse ins Spiel kommt.

Die Neigung bewirkt, dass die Nordhalbkugel der Sonne im Sommer zugeneigt ist, sodass das Sonnenlicht steiler auf die Erdoberfläche trifft. Diese steileren Einfallswinkel führen zu einer höheren Flächenenergie und damit zu mehr Erwärmung (vgl. Kap 1.2.3). Im Winter hingegen steht die Sonne flacher am Himmel und geht früher unter, wodurch weniger Energie pro Flächeneinheit eingestrahlt wird und die Tage kürzer werden. Das Tellurium erlaubt es, diesen Zusammenhang unmittelbar visuell nachzuvollziehen, indem die Erdposition im Sommer und Winter eingestellt und der Lichteinfall beobachtet werden kann. Nachdem das Modell bereits an den vorherigen Experimenten beteiligt war, ist auch hier die Verständlichkeit als zweites Kriterium potenziell erfüllt. Ebenso verhält es sich mit Blick auf die Plausibilität, da das neue Erklärungsmuster imstande ist, die bisherige Alltagserfahrung besser zu begründen als das alte. Kinder können erkennen, dass die Jahreszeiten sich durch die geneigte Erdachse systematisch beschreiben lassen und das nicht nur in unserer Hemisphäre, sondern auch auf der Südhalbkugel.

Durch die Einbeziehung der schwankenden Tag- und Nachtlänge kann das neue Konzept ebenfalls fruchtbar gemacht werden, womit der Konzeptwechsel vollzogen wäre. Je nachdem, wie stark die Nord- oder Südhalbkugel der Sonne zugewandt ist, variiert die Länge des Tageslichts. Besonders eindrucksvoll wird dies an den Polarregionen sichtbar, in denen die Sonne im Sommer über Tage hinweg nicht untergeht („Mitternachtssonne“) bzw. im Winter nicht aufgeht („Polarnacht“).

2.3.6 Konzeptwechsel zur Gravitation (Gravitationstisch)

Das im Folgenden beschriebene Experiment stellt den Dreh- und Angelpunkt dieser Arbeit dar. Hierbei geht es um die Visualisierung und das Experimentieren mit der

Gravitation selbst. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein „Gravitationstisch“ handgefertigt und selbst konzipiert (siehe Abbildung 14). Mithilfe dieses Tisches soll es gelingen, die Raumzeitkrümmung innerhalb eines möglichst anschaulichen Modells darzustellen und durch Interaktion erfahrbar zu machen.

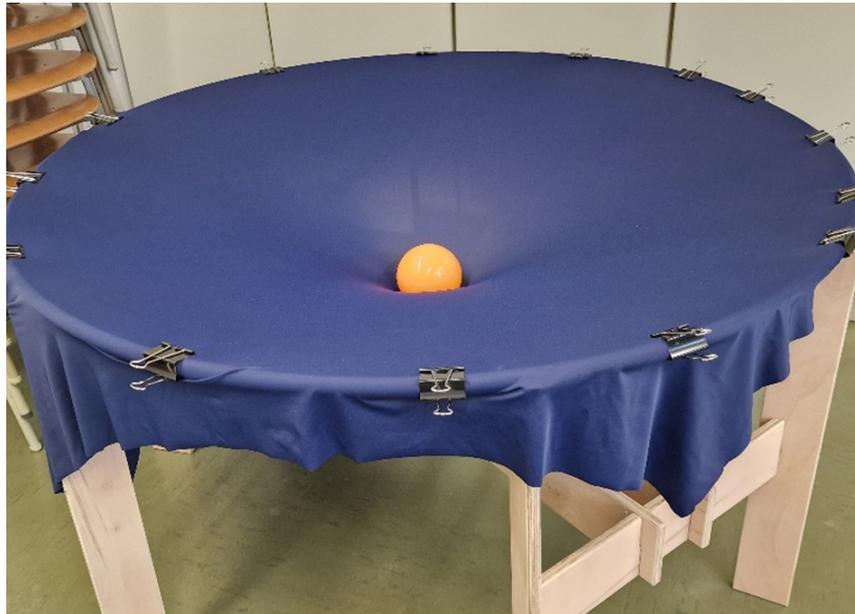


Abbildung 14: Gravitationstisch im aufgebauten Zustand mit eingesenktem Tuch durch eine zentrale Masse von 1 kg. Die symmetrische Verformung des bielastischen Gewebes veranschaulicht die Raumzeitkrümmung um eine große Masse im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie (eigene Darstellung).

Das Gerüst besteht aus drei Holzfüßen, die durch ein solides Y-förmiges Mittelstück verbunden werden. Das Mittelstück hat dabei zwei essentielle Funktionen: Einerseits wird die gesamte Stabilität deutlich erhöht und zum anderen sichert es ab, dass das Tuch nicht überladen werden kann und ggf. reißt. Wenn zu schwere Gewichte auf das Tuch gelegt werden, kann dieses sich höchstens bis auf Höhe des Verbindungsstücks verformen und wird ab dieser Maximallast von unten gestützt, was die Langlebigkeit des Spanntuchs erhöhen soll. Ausgiebige Tests im Vorfeld der ersten Einsätze ergaben, dass der Tisch somit der ca. 30-fachen Belastung (also 30 kg) standhält. Das Tuch selbst bildet nämlich den empfindlichsten und gleichzeitig wichtigsten Bestandteil und läuft damit keine Gefahr, zu reißen oder an Spannkraft zu verlieren. Die Wahl des Materials war bei der Konzeption des Tisches die größte Herausforderung, denn sowohl Stabilität, Rückstellkraft, Reibung als auch vor allem

möglichst gleichmäßige Elastizität sind die wichtigsten Eigenschaften, die es hierbei zu beachten galt. Ein Spannbettlaken beispielsweise ist sehr stabil und elastisch, bremst allerdings die Murmeln aufgrund der groben Struktur zu stark und lässt sich meist nur in eine Richtung dehnen. Dadurch kam keine kreisförmig symmetrische Wölbung zustande, sondern eine Ellipse. Als am besten geeignet erwies sich letztlich ein bielastischer Stoff aus 80 % Polyamid und 20 % Elasthan, der unter anderem häufig für Badeanzüge verwendet wird. Dieser Stoff ist mit Klammern an einem Hula-Hoop-Reifen mit 1,4 Metern Durchmesser an dessen 2,5 cm breiten Rand befestigt. Der Reifen wird bei der Vorbereitung auf die passenden farblichen Markierungen der Holzfüße gesteckt, womit der Aufbau abgeschlossen ist. Zur Bespannung des gesamten Reifens sind 1,5 laufende Meter Stoff genau ausreichend, damit beim Aufbau genug Spielraum und am Ende trotzdem wenig überschüssiges Material übrig bleibt. Alle Konstruktionsschritte sowie eine Materialliste, falls doch die eine oder andere Komponente mit der Zeit ausgetauscht werden muss, befinden sich im Anhang „Aufbau und Materialliste“. Das runde Design erlaubt eine maximal nutzbare Fläche bei möglichst geringem Platzbedarf. Ein quadratischer Tisch mit derselben Nutzfläche hätte vergleichsweise eine Diagonale von 1,98 Metern. Zudem können sich die SuS gleichmäßiger außen herum verteilen und die Verletzungsgefahr sinkt dadurch, dass es keine Holzkanten oder Ecken gibt. Das Design und die hierfür konzipierten Experimente basieren auf der Idee von Dan Burns (siehe (Burns, 2020)) und entwickeln diese weiter.

Das Tuch soll die Raumzeit in vereinfachter Form darstellen, indem ein oder mehrere zentrale Gewichte eine symmetrische Einsenkung verursachen. Murmeln können dann verwendet werden, um die Geodäten in dieser gekrümmten Raumzeit zu visualisieren. Sie stehen also für Raumsonden oder Himmelskörper, deren Flugbahn durch die Zentralmasse(n) beeinflusst werden. Dabei ist natürlich auch in didaktischer Hinsicht wichtig zu betonen, dass die eigentlich vierdimensionale Raumzeit (bestehend aus drei Raum- und einer Zeitdimension) hier auf ein zweidimensionales Tuch heruntergebrochen wird. Zudem erzeugt dieses Reibungseffekte, die es im Universum nicht gibt. Um nicht weitere Präkonzepte bei den Lernenden zu induzieren oder die Angst zu schüren, dass auch die Erde irgendwann wie diese Murmeln in die Sonne fällt, ist es wichtig, die Grenzen dieses Modells zu besprechen.

Da die Gravitation so facettenreich ist, sind es die entsprechenden Schülervorstellungen ebenso. Anders als in den vorherigen Kapiteln wird deshalb kein singuläres Präkonzept durchexerziert, sondern es werden vielmehr einige davon vorgestellt und

anschließend allgemein taugliche Experimente vorgeschlagen, welche in Analogie zu den bisherigen Verfahrensweisen einsetzbar sind.

In der Schule wird die Gravitation quantitativ durch das Newtonsche Gravitationsgesetz (siehe Kapitel 1.1.2) als Kraft eingeführt. Unabhängig davon, dass qualitative Erklärungen teilweise gänzlich ausbleiben, entspricht die Newtonsche Theorie (siehe Kapitel 1.1.4) auch rein fachwissenschaftlich nicht der gesamten Wahrheit. Die Gravitation als gekrümmte Raumzeit im Sinne der Relativitätstheorie ist zwar ein für SuS zunächst schwer greifbares Konzept, doch durch das Modell viel intuitiver und eine sinnvolle Ergänzung zu herkömmlichen Schulinhalten. Die im Folgenden angerissenen Vorstellungen stammen aus dem vielzitierten Grundlagenwerk „Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis“ von Horst Schecker (Schecker u. a., 2018) und decken sich hervorragend mit den Präkonzepten, die in bisherigen Führungen ausgemacht werden konnten.

Bei fast allen Führungen, die an der Sternwarte im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführt wurden, war die Vorstellung „Gravitation ist Magnetismus“ sehr häufig vertreten. Für Kinder ist dies naheliegend, da sowohl die Gravitation als auch der Magnetismus als „unsichtbare Kräfte“ wahrgenommen werden. Leider kann diese Vorstellung durch den Gravitationstisch noch verstärkt werden, was ein Grund dafür ist, dass mittlerweile Glasmurmeln anstelle von Edelstahlkugeln verwendet werden. Durch die visuelle Ähnlichkeit der Stahlkugeln zu Magneten, die die Kinder aus dem Alltag kennen, sind einige davon ausgegangen, dass die Richtungsänderungen aus einer magnetischen Anziehungskraft resultieren. Seit der Umstellung auf Glasmurmeln wurde diese Annahme deutlich seltener geäußert.⁴

Das nächste Präkonzept besteht in der Annahme, im Weltall gäbe es keine Gravitation, basierend auf dem Falschschluss, Schwerelosigkeit entspräche zwangsläufig der Abwesenheit von Schwerkraft. Man kennt die Bilder von der ISS, in welchen sich die Astronauten schwerelos durch die Raumstation bewegen, doch die Entfernung von gerade einmal etwas über 400 km reicht noch lange nicht aus, um dem Schwerfeld der Erde zu entkommen. Die SOI der Erde beträgt immerhin fast eine Million Kilometer (vgl. Kapitel 1.3). Um diesen Konflikt aufzulösen, muss den Kindern erklärt werden, dass die Schwerelosigkeit durch den freien Fall der Raumstation entsteht und nicht durch die Entfernung. Selbst auf der Erde kann dieser Effekt ähnlich nachgebildet werden, innerhalb eines Flugzeugs, welches sich im Sturzflug befindet.

⁴Dabei kann die Häufigkeit leider nur anhand der eigenen Erfahrung geschätzt werden, da im Rahmen dieser Arbeit keine Zeit mehr für eine empirische Datenerhebung war.

Dieses Beispiel könnte für die Kinder plausibler erscheinen, da es nicht so weit von der eigenen Lebenswelt entfernt ist.

Das erste Experiment des Gravitationstisches dient dazu, die grundlegende Funktionsweise verständlich zu machen. Es wird eine 1 kg schwere Kugel in die Mitte gelegt, die unsere Sonne repräsentieren soll. Dabei wird das Tuch, das die Raumzeit modellhaft darstellen soll, symmetrisch um die Kugel verformt. Um die Bahn eines Planeten sichtbar zu machen, wird nun eine Murmel tangential zur Wölbung des Kreises auf das Tuch geworfen (siehe Abb. 15).



Abbildung 15: Demonstration der Raumzeitkrümmung mithilfe des Gravitationstisches. Eine zentrale Masse (orange Kugel) erzeugt eine symmetrische Einsenkung im elastischen Tuch. Eine Murmel wird am Rand mit Tangentialimpuls angestoßen und folgt einer gekrümmten Bahn um die zentrale Masse. Die weiße Pfeillinie visualisiert die Bahn der Murmel als Annäherung an eine Geodäte in der gekrümmten Raumzeit.

Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video).

Die kleine Kugel hinterlässt aufgrund ihres Gewichts eine geringe Delle im Tuch als die größere orangene Kugel, genauso wie auch leichtere Himmelskörper die Raumzeit weniger krümmen als die Sonne. Aus diesem Grund bewegt sich auch der Mond in der gekrümmten Raumzeit der Erde um sie herum. Diesen Effekt kann man auf dem Gravitationstisch deutlich machen, indem man die kleine Murmel durch eine etwas größere austauscht, welche die Erde symbolisieren soll. Dadurch sieht man die lokale Krümmung des Tuchs sehr deutlich und in dieser Wölbung kann die kleine Murmel, die den Mond symbolisieren soll, um die Erde kreisen. Wenn man

nun beide Murmeln geschickt nebeneinander auf dem Tuch um die ‚Sonne‘ rotieren lässt, zeigt sich, dass beide Kugeln nicht nur um den Mittelpunkt kreisen, sondern die kleine auch zusätzlich um die größere (siehe Abb. 16).

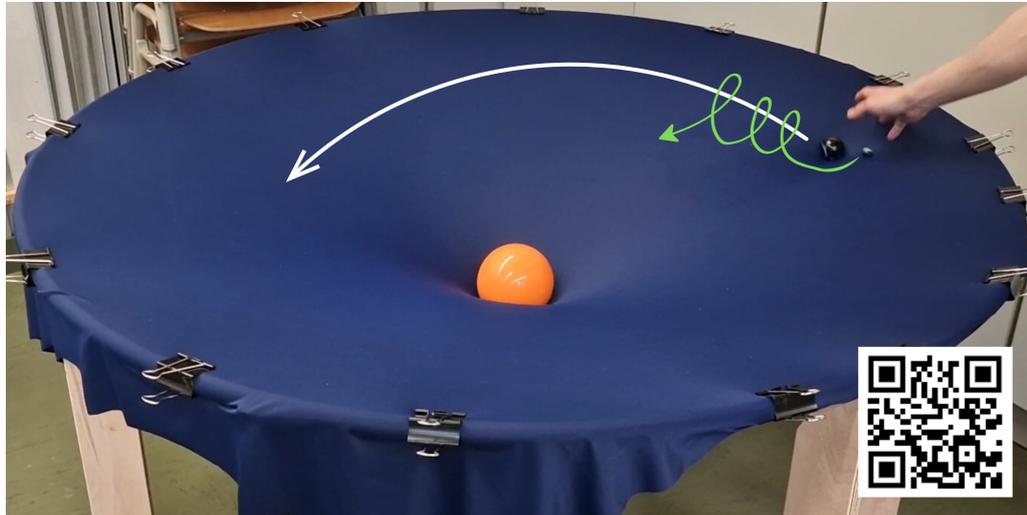


Abbildung 16: Darstellung einer Mondumlaufbahn (grüner Pfeil) um die Erde auf dem Gravitationstisch.

Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video).

Für das nächste Experiment werden zwei Gewichte auf das Tuch gelegt, welche zwei verschiedene Himmelskörper darstellen sollen. Hierfür gibt es nun zwei Möglichkeiten: Entweder repräsentieren die Gewichte ein Doppelsternsystem oder zwei Planeten (bzw. einen Planeten und einen Mond). Je nach Himmelskörper und Massenunterschied benutzt man hier entweder zwei identische 500-Gramm-Gewichte oder für größere Massenunterschiede nur eines davon und ersetzt das andere mit der üblichen Kugel (1 kg). Da das Doppelstern-Experiment relativ identisch zum ersten verläuft (die Kugeln rotieren hierbei nicht um eine, sondern um zwei Zentralmassen), konzentriert sich die Darstellung im Folgenden auf den Fall des swing-by-Manövers (siehe Kapitel 1.3). Das erste Gewicht stellt unsere Erde dar; von hier aus muss eine Murmel, welche das Raumschiff repräsentieren soll, aus dem Orbit tangential zur lokalen Tuchwölbung in Richtung des zweiten Gewichts beschleunigt werden. Dort angekommen wird sie ohne äußeren Einfluss (in der Analogie also ohne Treibstoff zu verbrauchen) vom zweiten Gewicht abgelenkt und beschleunigt, was je nach Winkel und Gewicht entweder zur Folge hat, dass sie von alleine wieder zurück zur Erde fliegt (siehe Abb. 17), oder ihren Kurs ändert und in eine andere Richtung beschleunigt wird, z.B. zu einem anderen Planeten, wie dem Saturn.

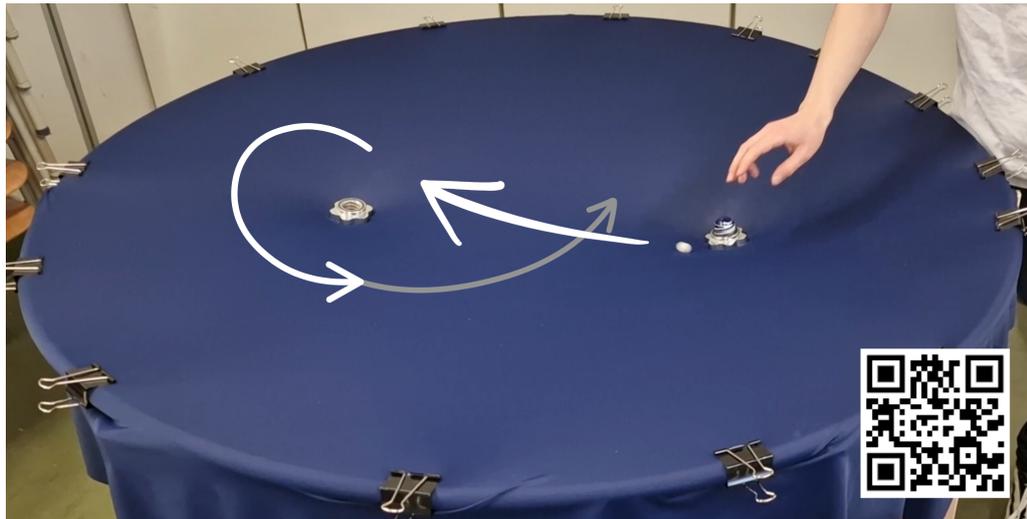


Abbildung 17: Demonstration eines swing-by-Manövers mit dem Gravitationsstisch. Eine Murmel (Raumsonde) wird zunächst in Richtung einer zweiten Masse (z.B. Mond) geschickt und dort durch die Krümmung des Tuches umgelenkt. In Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Anflugwinkel kann sie auf eine Rückflugbahn zur Erde gelenkt oder auf eine beschleunigte Flugbahn zu einem anderen Ziel gebracht werden – ganz ohne weiteren Energieaufwand. Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video).

Dort angekommen beginnt auch schon das vorletzte Experiment mithilfe des Gravitationsstisches; hier soll gezeigt werden, wie der Saturn zu seinen eindrucksvollen Ringen gekommen ist. Dies geschah der neuesten Theorie zufolge vor etwa 100 Millionen Jahren, als ein Mond zu nah an den Saturn geraten war und so von seinen Gezeitenkräften zerrissen wurde (Germerott, 2022). Die minimale Entfernung, ab der die Gezeitenkräfte stark genug wirken, um diesen Effekt zu erzeugen, nennt man die sogenannte „Roche-Grenze“. Wie sich die dadurch entstandenen kleinen Bruchstücke im Laufe der vielen Millionen Jahre zu dem gleichmäßigen Ringsystem entwickelt haben, kann im folgenden Experiment schön gezeigt werden. Hierfür lege man eine Zentralmasse in die Mitte des Tuches, gebe anschließend eine Handvoll Murmeln in ein möglichst breites Glas und stelle dieses mit der offenen Seite nach unten auf das Tuch. Damit sich die Murmeln nicht frühzeitig durch das elastische Tuch aus dem Glas davonestehlen, ist es ratsam, dieses von unten zu stützen. Die optimale Menge an Murmeln erkennt man daran, dass die Fläche ausgefüllt ist und sich keine Murmeln stapeln. Mithilfe des Glases sollen nun alle gleichzeitig wieder tangential zum Mittelpunkt beschleunigt werden, wonach das Glas schnell nach

oben gezogen werden soll, um die Murmeln nach dem Anfangsimpuls frei zu lassen (siehe Abb. 18 [linke Seite]).

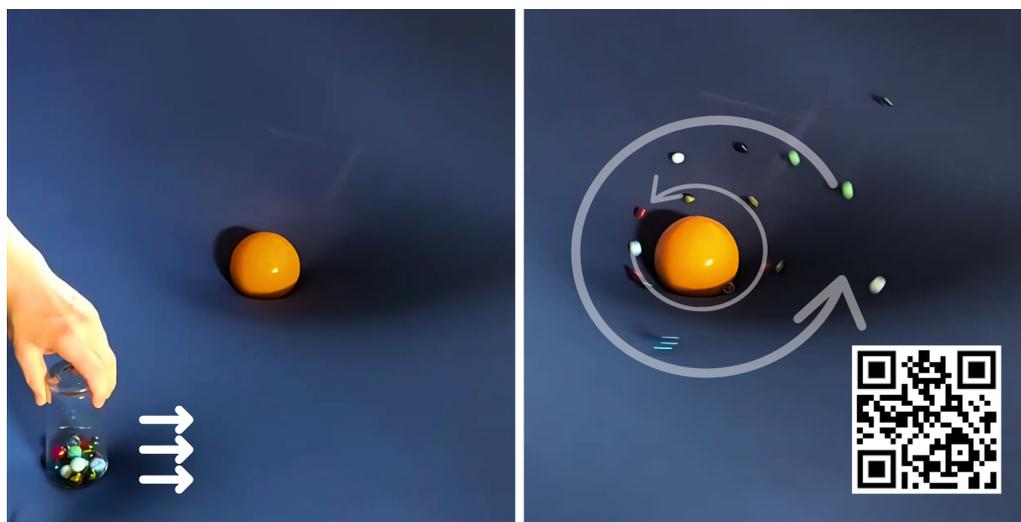


Abbildung 18: Entstehung eines Ringsystems auf dem Gravitationstisch: Links werden viele kleine Murmeln gleichzeitig und tangential zur zentralen Masse freigesetzt. Die inneren Kugeln erfahren dabei eine stärkere Krümmung der ‚Raumzeit‘ und bewegen sich schneller als die äußeren. Rechts ist erkennbar, wie sich die ursprünglich kompakte Verteilung allmählich auflöst und in differenzierten Umlaufbahnen zu einem Ringsystem entwickelt. Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video).

Je weiter entfernt sich die Murmeln zu Beginn noch befinden, umso stabiler hängen sie zusammen. Doch je näher sie dem Mittelpunkt und der zunehmenden Krümmung der Raumzeit kommen, umso instabiler werden sie. Die Murmeln, die zu Beginn näher in der Mitte befanden, sind nun exponentiell schneller geworden und lassen die äußeren deutlich hinter sich. Mit der Zeit formt sich eine gerade Linie, in der die Abstände allerdings immer weiter zunehmen. Irgendwann haben die inneren Kugeln die äußeren überrundet und man kann beobachten, wie sich je nach Umlaufzeit unterschiedliche Ringe mit unterschiedlichen Radien bilden (siehe Abb. 18 [rechte Seite]). Natürlich muss auch hier wieder der Modellcharakter betont werden, insbesondere die Reibung des Tuches. Trotzdem eignet sich dieses Experiment dennoch in besonderer Weise, um das Konzept verständlich darzustellen.

Zu guter Letzt soll mithilfe des Gravitationstisches die experimentelle Darstellung der Entstehung des Sonnensystems vollzogen werden. Besonders eindrucksvoll und unterhaltsam an diesem Versuch ist, dass er umso besser funktioniert, je mehr

Leute mitmachen. Jede Versuchsperson erhält zunächst eine kleine Handvoll Murmeln. Das Ziel besteht nun darin, diese möglichst gleichmäßig und gleichzeitig in verschiedene Richtungen auf das Tuch zu werfen; sowohl im als auch entgegen des Uhrzeigersinns. Dafür teilt man die Gruppe am besten immer abwechselnd in zwei Richtungen ein, sodass jeder Teilnehmende in eine andere Richtung wirft als seine beiden Nachbarn. Die Erfahrung im Rahmen der Führungen hat gezeigt, dass die Murmeln eher zu stark geworfen werden, deshalb wäre ein kurzer Hinweis an die Versuchspersonen ratsam, beim ersten Versuch lieber mit etwas weniger Kraft zu agieren. Anschließend kann gemeinsam heruntergezählt werden und wenn alles glatt gelaufen ist, entsteht ein reines Murmelchaos auf dem Tisch (siehe Abb. 19 [linke Seite]).

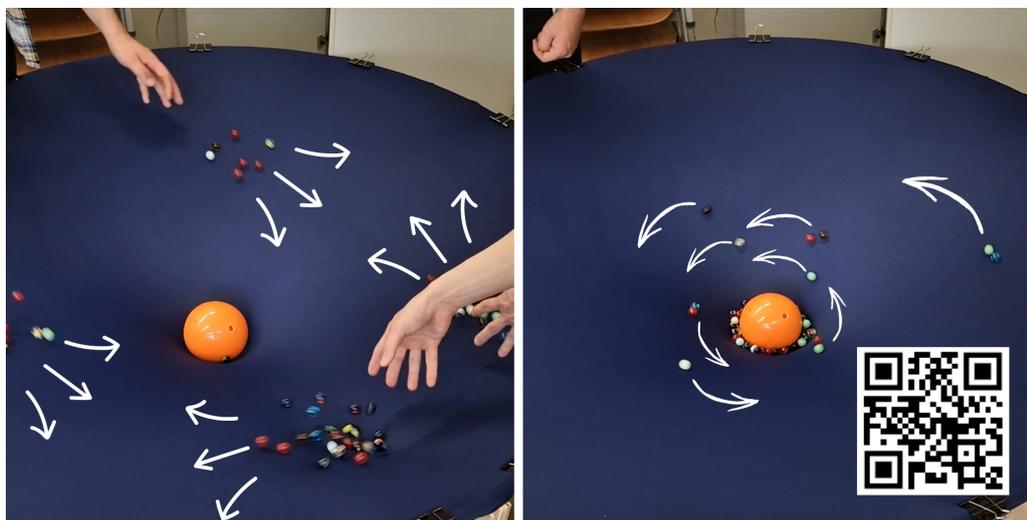


Abbildung 19: Modellhafte Darstellung der Entstehung des Sonnensystems mit dem Gravitationstisch: Links: Viele kleine Kugeln (Materie und Staubteilchen) werden aus unterschiedlichen Richtungen auf das Tuch geworfen, was zunächst zu einem unstrukturierten System aus Kollisionen und Überlagerungen führt. Rechts: Im Laufe der Zeit dominiert eine gemeinsame Rotationsrichtung und es bildet sich eine rotierende Scheibe mit Teilchenkondensation als Analogie für die Entstehung von Planeten.

Der QR Code führt zu einem YouTube-Video, in dem das Experiment vorgeführt wird (eigene Darstellung, eigen erstelltes Video).

Zunächst sieht es so aus, als würden die Murmeln, welche die Materie und Teilchen darstellen sollen, aus denen unser Sonnensystem entstanden ist, ohne System wahllos miteinander kollidieren. Ein vergleichbares Chaos herrschte allerdings auch

bei dessen Entstehung vor einigen Milliarden Jahren, bevor sich allmählich eine rotierende Scheibe aus Gas und Staub daraus geformt hat. Sowohl damals als auch hier ist die Impulsverteilung der Murmeln nicht in Gänze homogen, sondern der Drehimpuls einer Richtung überwiegt leicht. Dieser statistische Effekt wird natürlich umso drastischer, je mehr Teilchen/Murmeln beteiligt sind. Dies führt dazu, dass sich nach genug Zeit und vielen Kollisionen letztendlich immer eine Drehrichtung durchsetzen wird. Das Ergebnis ist also ein System, in welchem sich alle Murmeln in die selbe Richtung bewegen und sogar teilweise (wie bei der Entstehung der Planeten) mit anderen Murmeln eine Einheit bilden, indem sie sich gegenseitig durch die Krümmung des Tuchs anziehen (siehe Abb. 19). All die hier vorgestellten Experimente besitzen das Potenzial, im Rahmen eines Konzeptwechsels korrigierend wirksam zu werden, ohne dass hierbei, wie eingangs erwähnt, eine konkrete Schülervorstellung im Fokus steht.

2.3.7 Konzeptwechsel zu Größen- und Abstandsverhältnissen

Je nach Wetterlage, Zeit und Interesse der Gruppe kann diese hier als zuletzt beschriebene Station entweder im Außenbereich im Rahmen eines Planetenwegs absolviert werden (siehe dazu (Nagel, 2025)) oder alternativ im Museumsgang der Sternwarte, wovon im Folgenden ausgegangen wird.

Im Vorfeld wurde bereits immer wieder betont, wie wichtig es ist, dass die Modellcharakteristik der Experimente und Analogien, die im Laufe der Führung verwendet werden, deutlich gemacht wird. Insbesondere die Größenverhältnisse konnten bisher in keinem der bisherigen Versuche adäquat dargestellt werden. Doch wie sollen Lernende eine auch nur annähernd korrekte Vorstellung von den realen Maßen unseres Sonnensystems bekommen, wenn sie zwangsläufig nur mit vereinfachten Modellen konfrontiert werden? Genau diesem Problem widmet sich die letzte der hier vorgestellten Stationen. Das hier verhandelte Präkonzept wurde bereits in Kapitel 2.2.1 thematisiert, wobei sich herausgestellt hat, dass stark vereinfachte Darstellungen in Schulmaterialien oder anderen Medien (siehe Abb. 7) dazu führen können, dass ein verzerrtes Bild von Größen- und Abstandsverhältnissen entsteht. Miller et al. zeigten 2010, dass sich dieses Präkonzept unter anderem darin äußert, dass z.B. die Entfernung zum Mond deutlich unterschätzt und die Entfernung zur Sonne überschätzt wird (Miller und Brewer, 2010). Doch nicht nur die Entfernung innerhalb

des Sonnensystems wird fehlerhaft eingeschätzt: Eine zusätzliche, weit verbreitete Vorstellung ist, dass Planeten größer sind als Sterne. Diese Annahme basiert auf der Beobachtung, dass weit entfernte Sterne am Himmel deutlich schwächer leuchten als die sich um viele Größenordnungen näher befindlichen Planeten, wie beispielsweise die hell scheinende Venus (Rajpaul u. a., 2018). Das neue Konzept, dass die scheinbare Helligkeit anderer Sterne – im Vergleich zu einigen Planeten – der enormen Entfernung und nicht der Größe geschuldet ist, soll mithilfe dieser Station verständlich gemacht werden.

Die größte Herausforderung bei der Konzeption dieser Station bestand darin, einen geeigneten Maßstab zu finden, in welchem sowohl die Größenverhältnisse als auch die Entfernungen aller Himmelskörper korrekt dargestellt werden können. Diese werden je nach Größe durch Styropor bzw. Edelstahlkugeln dargestellt. Da die Kugeln nur bis zu einer minimalen Größe von ca. einem Millimeter gut zu sehen und zu handhaben sind, muss das kleinste Objekt dieses Modells (der Mond) eben diesen Durchmesser besitzen. Dies führt zu einem Maßstab von ca. 1:3,5 Milliarden, in welchem auszugsweise die Sonne 40 cm, der Jupiter 4,1 cm und die Erde 3,6 mm im Durchmesser aufweisen. Die genauen Daten aller Himmelskörper sind in Tabelle 1 im Anhang nachzulesen. Trotz dieses so stark verkleinernden Maßstabs, in dem der ‚Mond‘ gerade noch so sichtbar ist, beträgt der Abstand des ‚Merkur‘, welcher mit einem Durchmesser von nur 1,5 mm der ‚Sonne‘ am nächsten steht, bereits stolze 16 Meter. Die ‚Erde‘ ist 43 Meter entfernt und das Ende des inneren Sonnensystems stellt der ‚Mars‘ mit 61 Metern dar. Wie in Abbildung 20 zu sehen, beträgt die Länge des Museumsgangs der Sternwarte zufälligerweise ebenfalls 43 Meter. Mit dem großen Styroporball der ‚Sonne‘ auf der einen Seite des Gangs und der ‚Erde‘ auf der gegenüberliegenden, befindet sich der ‚Mond‘ nun maßstabsgetreu in einem Abstand von etwa 10 cm von der ‚Erde‘ entfernt. Bei Verlängerung des Weges bis zur Rückseite der Eingangshalle passt auch der ‚Mars‘ gerade noch so in das Gebäude.

Diese Konstellation kann bis dahin noch hervorragend im Rahmen eines Schülerexperiments dargestellt werden. Zunächst werden die SuS dazu aufgefordert, aus einer Sammlung an Kugeln verschiedener Größen jeweils diejenige auszuwählen, die ihrer Meinung nach der maßstabsgerechten Größe des entsprechenden Planeten des Sonnensystems gleichkommt. Damit vor allem die kleinsten Edelstahlkugeln nicht verloren gehen, werden diese auf zylinderförmigen Neodymmagneten gehalten. Nachdem die korrekten Größenverhältnisse durch den Guide aufgelöst und besprochen wurden, stellen sich die SuS in einem nächsten Schritt entsprechend der von ihnen vermuteten

Distanzverhältnisse zur ‚Sonne‘ auf. Dieser Prozess kann völlig autonom passieren oder auch bei Bedarf durch den Guide etwas moderiert und angeleitet werden. Anschließend werden die Positionen der SuS mit der Realität des Maßstabs abgeglichen, wodurch sehr eindrucksvolle Wahrnehmungseffekte entstehen, da auf dem gesamten Gelände der Sternwarte lediglich die vier inneren Planeten überhaupt positionierbar wären (siehe Abb. 20).

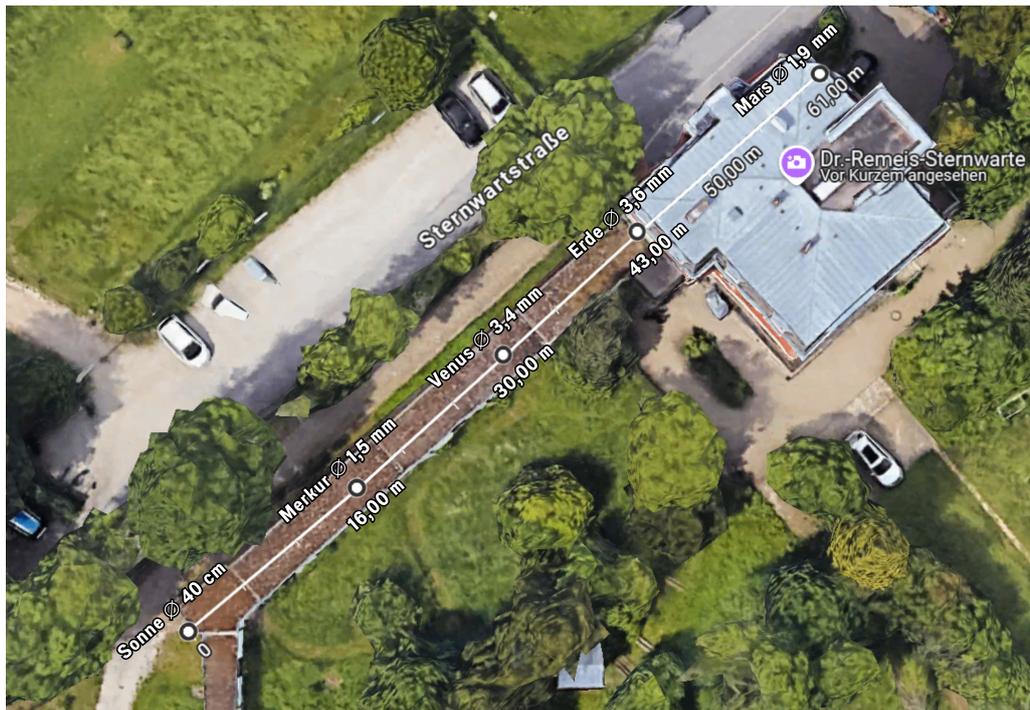


Abbildung 20: Satellitenaufnahme der Dr. Karl Remeis-Sternwarte in Bamberg (Google LLC, 2025). Mithilfe des Tools „Entfernung messen“ wurden die maßstabsgetreuen Abstände der inneren Planeten visualisiert. Grundlage ist der in dieser Arbeit verwendete Maßstab von 1 : 3,5 Milliarden (eigene Darstellung).

Der ‚Jupiter‘ wäre nämlich bereits 222 Meter entfernt und somit nur im Rahmen eines Outdoor-Planetenwegs realistisch darstellbar. In der hier beschriebenen Führung können die restlichen Planeten daher leider nur im Rahmen eines Gedankenexperiments behandelt werden. Jupiter befände sich ungefähr an der Kreuzung der Sternwartstraße am Fuß des Berges, welchen jede Gruppe bei der Anreise zwangsläufig hinauffahren muss. Der Uranus mit einer Entfernung von 819 Metern entspräche einer 1,5 cm großen Kugel direkt neben dem Bamberger Dom und Neptun läge mit einem Durchmesser von 1,4 cm beim Michaelsberg-Kloster etwa 1290 Meter entfernt. Beide Orte lassen sich gut von der Kuppel aus beobachten. Die große Preisfrage,

um das Gedankenexperiment abzurunden und das zuletzt genannte Präkonzept zu beseitigen, ist die Frage nach der Entfernung und Größe des nächstgelegenen Sternsystems. Da es sich hier bei Alpha Centauri um ein dreifach Sternsystem handelt, bezieht sich die Analogie lediglich auf den Stern Alpha Centauri A. Dieser läge mit einer Größe von 49 cm und einer Entfernung von 11700 km auf der Insel Bali oder in der Atacama-Wüste in der Nähe des Paranal-Observatoriums. Auch diese beiden eingebundenen Experimente erfüllen die bereits mehrfach genannten Kriterien des Konzeptwechsels nach Posner hinreichend und bieten somit einen gewinnbringenden Ansatz zur produktiven Arbeit mit Schülervorstellungen.

Fazit und Schlussbetrachtung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, das bestehende Führungskonzept an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte in Bamberg neu zu gestalten und dieses sowohl fachwissenschaftlich als auch didaktisch zu begründen. Den Ausgangspunkt aller Überlegungen bildete dabei die Tatsache, dass Kinder und Jugendliche (bzw. häufig auch Erwachsene) verschiedenste Präkonzepte mitbringen, die ihre Entstehung zu einem nicht unerheblichen Teil auch der marginalisierten Behandlung der Astronomie durch den Lehrplan verdanken.

Den gemeinsamen Nenner aller Stationen stellt die Gravitation als Hauptthema dar, weshalb in einem fachwissenschaftlichen Vorspann zunächst alle wesentlichen Theorien, Konzepte und Modelle erläutert wurden, welche den Grundstein für das inhaltliche Verständnis der Führungskonzeption legen. Einschränkend ist zu erwähnen, dass alle in diesem Rahmen angestellten Überlegungen aufgrund der gegebenen Grenzen einer solchen Arbeit immer nur überblicksartig und ohne Anspruch auf Vollständigkeit erfolgen konnten. Im Zentrum des Interesses standen unter anderem die Keplerschen Gesetze, die Newtonsche Gravitationslehre sowie die Relativitätstheorie nach Einstein am Beispiel der relativistischen Periheldrehung des Merkur. Auch Phänomene wie die daraus resultierende gravitative Zeitdilatation, Grundlagen der Raumfahrt und abschließend Spezialfälle der Gravitation (Schwarze Löcher, Neutronensterne und Gravitationswellen) wurden in entsprechender Weise ausgeführt.

Die methodische Gestaltung und Strukturierung der modularisierten Einzelstationen orientierte sich dabei am Modell der „didaktischen Rekonstruktion“ nach Kattmann (Kattmann, 2024), mit deren Hilfe eine Verbindung zwischen Fachstruktur und Schülervorstellungen herzustellen versucht wurde. Hierfür wurden spezifische und gut erforschte Präkonzepte (Schecker u. a., 2018) gezielt aufgegriffen und durch experimentelle Settings (z.B. Gravitationstisch, Tellurium, Modellversuche mit Styroporkugel und Lichtquelle) mithilfe der Theorie des Konzeptwechsels nach Posner

(Posner u. a., 1982) bearbeitet. Durch die Auslösung kognitiver Konflikte sowie die handlungsorientierte Auseinandersetzung mit dem Gegenstand soll das konzeptuelle Lernen der SuS (und anderer Teilnehmender) angeregt und befördert werden, um hierdurch nicht zuletzt ein generelles Interesse und eine gesteigerte Motivation zur Auseinandersetzung mit astronomischen Phänomenen zu wecken.

Potenzial für den schulischen Unterricht

Auch wenn die Astronomie als Unterrichtsgegenstand im bayerischen Lehrplan durchaus unterrepräsentiert ist (Bayerischer Landtag, 2013), ließen sich einige Stationen dennoch gewinnbringend einbauen. So sieht der bayerische Lehrplan der 11. Klasse des Gymnasiums, wie eingangs bereits erwähnt, eine sechsstündige Einheit mit dem Titel „Astronomische Weltbilder“ vor (ISB, 2025a). Zum Thema „heliozentrisches Weltbild“ eignet sich beispielsweise der Einsatz des Telluriums (siehe Kapitel 2.3.2) hervorragend. Ein professionelles Modell wie jenes der Sternwarte übersteigt in der Anschaffung natürlich den finanziellen Spielraum jeder Physiksammlung, Abhilfe können hier Modelle der Firma „Lego“ oder „AstroMedia“ schaffen.⁵ Wenn es im Unterricht um „Objekte im Universum (Sonnensystem)“ (ebd.) geht, können die eingebundenen Experimente zu Größen- und Abstandsverhältnissen (siehe Kapitel 2.3.7) hilfreich sein, um für eine realistische Vorstellungsbasis zu sorgen. Zur Veranschaulichung der „Struktur des Universums“ sowie zur Einführung in die Relativitätstheorie (ebd.) liefert natürlich der Gravitationstisch vielfältige Möglichkeiten; da ein solcher in der Konstruktion jedoch recht aufwändig und durchaus kostenintensiv ist, kann ein derartiges Vorhaben an der Schule wohl nur im Rahmen eines Projektes realisiert werden.

Auch interdisziplinäre Anwendungsmöglichkeiten wären denkbar, denn der Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild wird beispielsweise nicht nur in der Physik, sondern auch im Geschichtsunterricht der 7. Klasse („Neue räumliche und geistige Horizonte“) thematisiert (ISB, 2025b). Auch wenn der Geographieunterricht in der 5. Klasse im Lernbereich 2 das Thema „Planet Erde“ behandelt und sich mit der „Grundstruktur unseres Sonnensystems“ auseinandersetzt (ISB, 2025c), bieten sich die oben genannten Experimente zur Veranschaulichung an. Ergänzend

⁵Lego: <https://www.lego.com/de-de/product/planet-earth-and-moon-in-orbit-42179>
AstroMedia: <https://astromedia.de/Das-Kopernikus-Planetarium>

könnte in dieser Sequenz der Zusammenhang zwischen Gezeitenkräften und Mondrotation mithilfe des partizipativen Experiments zur gebundenen Rotation (siehe Kapitel 2.3.4) verdeutlicht werden.

Desiderate und Ausblick

Leider war es dem Verfasser im Zuge dieser Untersuchung aus zeitlichen Gründen nicht möglich, eine empirische Evaluation des didaktischen Effektes vorzunehmen. Es bleibt also offen, ob und inwieweit die entwickelten Experimente auf der realen Ebene tatsächlich einen Konzeptwechsel anregen. Die einzige Rückmeldung, die punktuell Vermutungen über die Wirksamkeit des didaktischen Settings zuließ, stellte die persönliche Interaktion mit den Teilnehmenden im Rahmen der Führung dar. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sind durchaus vielversprechend, lassen jedoch selbstverständlich keine repräsentativen Aussagen zu. Die Effekt- und Wirksamkeitsforschung hinsichtlich der Transformation von Präkonzepten durch spezifische didaktische Methoden stellt demnach noch immer ein interessantes und bedürfnisreiches Forschungsfeld dar. Auch eine alters- bzw. zielgruppendifferenzierte Analyse musste leider ausbleiben.

Ursprünglich war ein hierauf abzielender Pre-/Posttest im Kontext dieser Ausarbeitung durchaus vorgesehen, nicht zuletzt deshalb, weil es derartige Assessments zum sog. „concept inventory“ zwar in vielfältiger Weise für kosmologische Vorstellungswelten gibt, die Gravitation als Präkonzept jedoch noch relativ wenig erforscht ist. Zu diesem Zweck wurde mit den Autorinnen des „Newtonian Gravity Concept Inventory (NGCI)“-Tests (Williamson und Willoughby, n.d.) an der Montana State University Kontakt aufgenommen und ein Zugang zu dem lesegeschützten Konzepttest erbeten. Leider darf dieser nicht publiziert und daher im Anhang nicht mitgeliefert werden. Ein solches Vorhaben wäre zum Beispiel im Rahmen eines weiterführenden Forschungsprojekts denkbar.

Einbettung in das Gesamtkonzept der Führung

Abschließend ist zu erwähnen, dass die hier vorgestellten Stationen lediglich einen ersten Teil des gesamten Führungskonzepts der Dr. Karl Remeis-Sternwarte darstel-

len. Im Anschluss hieran folgt eine weiterführende Sequenz, in welcher sich die Teilnehmenden mit dem Themenbereich „Himmelsbeobachtung“ beschäftigen. Hierbei geht es zum einen um die dafür notwendigen Werkzeuge (Teleskope, Präzisionsuhren etc.), welche zum einen als historische Exponate betrachtet und zum anderen als aktuelle Forschungsinstrumente ausprobiert werden können. Diesem zweiten Teil der Führungskonzeption widmet sich die Arbeit „Astronomische Beobachtung im Bildungskontext: Konzeption einer astronomischen Führung zur Transformation von Präkonzepten des Themenbereichs ‚Teleskope und astronomische Beobachtung‘ an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte Bamberg“ von Heiko Nagel (Nagel, 2025) (zur Gesamtübersicht siehe Tabelle 2 und 3 im Anhang).

Auf diese Weise steht den Besucherinnen und Besuchern der Dr. Karl Remeis-Sternwarte ein fachwissenschaftlich fundiertes, didaktisch-methodisch begründetes, individuell anpassbares und authentisches Lernerlebnis an einem besonderen und faszinierenden Lernort zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- Atkinson, S. P. (2022). *Writing Good Learning Outcomes and Objectives*. London: Sijen Education.
- Australian Space Academy (2023). *LEO Parameters*. Zuletzt aktualisiert am 20 Februar 2023. Zugriff am 16. Juni 2025. URL: <https://www.spaceacademy.net.au/watch/track/leopars.htm>.
- Baar, R. und G. Schönknecht (2018). *Außerschulische Lernorte: didaktische und methodische Grundlagen*. Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- Barrier, R. M. (2010). „Astronomical Misconceptions“. In: *The Physics Teacher* 48.5.
- Barry, C. (2024). *Tidal Locking*. Zuletzt aktualisiert am 10. Dezember 2024. Zugriff am 4. April 2025. URL: <https://science.nasa.gov/moon/tidal-locking/>.
- Bayerischer Landtag (2013). *Astronomie-Unterricht an bayerischen Schulen. Schriftliche Anfrage des Abgeordneten Thomas Mütze, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN vom 16.04.2013, Antwort der Staatsregierung vom 10.06.2013*. Zugriff am 2. Juli 2025. URL: https://www.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP16/Drucksachen/Schriftliche%5C%20Anfragen/16_0016824.pdf.
- Bronstein, I. N., K. A. Semendjajew, G. Grosche, V. Ziegler und D. Ziegler (2013). *Springer-Taschenbuch der Mathematik*. 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Burns, D. (2020). *Gravity Visualized*. Zugriff am 31. Mai 2025. URL: <https://the-physics-well.net/gravity-visualized/>.
- Center for Computational Relativity and Gravitation (2025). *Binary Neutron Stars*. Rochester Institute of Technology, Zugriff am 9. April 2025. URL: <https://ccrg.rit.edu/research/area/binary-neutron-stars>.

- Chandrasekhar, S. (1983). *On Stars, Their Evolution and Their Stability: Nobel Lecture*. Nobel Lecture, 8. Dezember 1983, The University of Chicago.
- Chruściel, P. (2010). „How many different kinds of black holes are there?“ In: *Einstein Online* 4. Zugriff am 9. April 2025.
- Clausnitzer, L. (2021). „Ist die Astronomie ein Spezialgebiet? Über den Umgang der Bundesländer mit der Astronomie“. In: *Sterne und Weltraum* 10.
- Danaia, L. und D. H. McKinnon (2008). „Common Alternative Astronomical Conceptions Encountered in Junior Secondary Science Classes: Why Is This So?“ In: *Astronomy Education Review* 6.2.
- Demtröder, W. (2006). *Experimentalphysik 1*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Dietrich, T. (2019). „First Measurement of Gravitational Waves of Colliding Neutron Stars“. In: *Einstein Online* 11. Zugriff am 9. April 2025.
- DLR (n.d.). *Wenn die Uhr an Bord langsamer geht*. Zugriff am 10. Mai 2025. DLR_next. URL: <https://www.dlr.de/de/next/raumfahrt/spannendes/ku-rioses-aus-dem-all/wenn-die-uhr-an-bord-langsamer-geht>.
- Duit, R. (2004). *Schülervorstellungen und Lernen von Physik*. Zugriff am 11. Dezember 2024. URL: <https://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf>.
- Dyson, F. W., A. S. Eddington und C. Davidson (1920). „A Determination of the Deflection of Light by the Sun’s Gravitational Field, from Observations made at the Total Eclipse of May 29, 1919“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 220.
- Einstein, A. (1915). „Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie“. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*.
- Event Horizon Telescope Collaboration (2019). „First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole“. In: *The Astrophysical Journal Letters* 875.1.
- Fließbach, T. (2016). *Allgemeine Relativitätstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

- Fraknoi, A., D. Morrison und S. Wolff (2022). „Astronomy 2e“. In: Zugriff am 9. April 2025. Houston, Texas: OpenStax, Rice University. Kap. 23.5 The Evolution of Binary Star Systems.
- Germerott, I. (2022). *Wie entstanden die Ringe des Saturn?* Zugriff am 14. Juni 2025. National Geographic. URL: <https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2022/09/wie-entstanden-die-ringe-des-saturn>.
- Glistau, S. (2015). *Die Patek Philippe Calibre 89 – komplizierter geht es nicht.* Zugriff am 5. Mai 2025. URL: <https://100percentpassion.net/2015/01/04/die-patek-philippe-calibre-89-komplizierter-geht-es-nicht/>.
- Gohd, C. (2024). *What Happens When Something Gets Too Close to a Black Hole?* Zuletzt aktualisiert am 22. Oktober 2024. Zugriff am 9. April 2025. URL: <https://science.nasa.gov/universe/what-happens-when-something-gets-too-close-to-a-black-hole/>.
- Goodstein, D. L. und J. R. Goodstein (1996). *Feynman's Lost Lecture: The Motion of Planets Around the Sun.* Rekonstruktion einer Vorlesung von Richard P. Feynman. W. W. Norton & Company.
- Google LLC (2025). *Google Maps: Dr.-Karl-Remeis-Sternwarte, Bamberg.* Zugriff am 27. Juni 2025. URL: <https://www.google.com/maps>.
- Goruma (2024). *Sonne und Planeten.* Zugriff am 21. Mai 2025. Goruma. URL: <http://www.goruma.de/erde-und-natur/astronomie/sonne-und-planeten>.
- Gubler, M. und A. Hepp (2011). *Herleitung der Keplergesetze aus dem Gravitationsgesetz.* nach Hans Roth, Sternschnuppen, DMK Themenheft Astronomie, Orell Füssli Verlag 1996.
- Hanslmeier, A. (2014). *Einführung in Astronomie und Astrophysik.* 3. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hanslmeier, A. (2016). *Faszination Astronomie: Ein topaktueller Einstieg für alle naturwissenschaftlich Interessierten.* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Hartle, J. B. (2021). *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity.* Cambridge University Press.

- Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) (2017). *Discovery of the simultaneous emission of a gravitational wave and of gamma photons by a binary system of coalescing neutron stars*. Zugriff am 9. April 2025. URL: <https://www.irap.omp.eu/en/2017/10/discovery-of-the-simultaneous-emission-of-a-gravitational-wave-and-of-gamma-photons-by-a-binary-system-of-coalescing-neutron-stars/>.
- Interrante, A. (2024). *Why Do Eclipses Happen?* Zuletzt aktualisiert am 4. November 2024. Zugriff am 4. April 2025. URL: <https://science.nasa.gov/eclipses/geometry/>.
- ISB (2025c). *LehrplanPLUS Gymnasium: Fachlehrplan Geographie Jahrgangsstufe 5*. Zugriff am 4. Juli 2025. URL: <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/5/geographie>.
- ISB (2025b). *LehrplanPLUS Gymnasium: Fachlehrplan Geschichte Jahrgangsstufe 7*. Zugriff am 2. Juli 2025. URL: <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/7/geschichte>.
- ISB (2025a). *LehrplanPLUS Gymnasium: Fachlehrplan Physik Jahrgangsstufe 11*. Zugriff am 17. Oktober 2024. URL: <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/11/physik>.
- Kattmann, U. (2015). *Schüler besser verstehen. Alltagsvorstellungen im Biologieunterricht*. Hallbergmoos: Aulis Verlag in der Stark Verlagsgesellschaft.
- Kattmann, U. (2024). *Didaktische Rekonstruktion*. Zugriff am 13. April 2025. URL: <https://uol.de/p54616>.
- Kazmierczak, J. (2024). *Types of Black Holes*. Zuletzt aktualisiert am 22. Oktober 2024. Zugriff am 9. April 2025. URL: <https://science.nasa.gov/universe/black-holes/types/>.
- Kher, A. (2025). *How Often Do Solar Eclipses Occur?* Zugriff am 4. April 2025. URL: <https://www.timeanddate.com/eclipse/how-often-solar-eclipse.html>.
- Kuphal, E. (2013). „Finsternisse“. In: *Den Mond neu entdecken*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

- Le Verrier, U. (1859). „Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète“. In: *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences* 49.
- LIGO Laboratory (2025). *Gravitational Wave Sources*. California Institute of Technology. Zugriff am 9. April 2025. URL: <https://www.ligo.caltech.edu/page/gw-sources>.
- Malek, E. (2020). „The Singularity Theorem (Nobel Prize in Physics 2020)“. In: *Einstein Online* 12. Zugriff am 9. April 2025.
- Matousek, S. (2025). *An illustration of the escape velocity in the Solar System*. Zugriff am 8. April 2025. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/basics/chapter4-1/>.
- Max-Planck-Gesellschaft (2018). *In the field of gravity of the black hole*. Veröffentlicht am 26. Juli 2018. Zugriff am 9. April 2025. URL: <https://www.mpg.de/12146084/in-the-field-of-gravity-of-the-black-hole>.
- Max-Planck-Institut für Radioastronomie (n.d.). *Sagittarius A*. Zugriff am 13. Mai 2025. URL: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/525565/sagittarius-a>.
- Meschede, D. (2005). *Gerthsen Physik*. 23. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Miller, B. und W. Brewer (2010). „Misconceptions of Astronomical Distances“. In: *International Journal of Science Education* 32.
- Müller, A. (2007). *Gravitation*. Zugriff am 26. Februar 2025. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/gravitation/150>.
- Nagel, H. (2025). *Astronomische Beobachtung im Bildungskontext: Konzeption einer astronomischen Führung zur Transformation von Präkonzepten des Themenbereichs "Teleskope und astronomische Beobachtung an der Dr. Karl Remeis-Sternwarte Bamberg*. Zulassungsarbeit.
- NASA (2025). *Neutron Star Collision Creates Kilonova*. Zuletzt aktualisiert am 28. März 2025. Zugriff am 9. April 2025. URL: <https://science.nasa.gov/asset/hubble/neutron-star-collision-creates-kilonova/>.

- Newcomb, S. (1897). *The Elements of the Four Inner Planets and the Fundamental Constants of Astronomy*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
- Ohanian, H. C. und R. Ruffini (2013). „Newton’s gravitational theory“. In: *Gravitation and Spacetime*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Overduin, J. (2007). *The Principle of Equivalence*. Zugriff am 26. Februar 2025. URL: <https://einstein.stanford.edu/SPACETIME/spacetime2.html>.
- Posner, G. J., K. A. Strike, P. W. Hewson und W. A. Gertzog (1982). „Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change“. In: *Science Education* 66.2.
- Pössel, M. (2010). „Träge und schwere Masse“. In: *Einstein Online* 04. Zugriff am 26. Februar 2025.
- Rajpaul, V. M., C. Lindstrøm, M. C. Engel, M. Brendehaug und S. Allie (2018). „Cross-sectional study of students’ knowledge of sizes and distances of astronomical objects“. In: *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 14 (2).
- Roddenberry, G. (1966). *Star Trek: The Original Series Intro*. Zugriff am 17. Oktober 2024. URL: <https://www.startrek.com>.
- Schecker, H., T. Wilhelm, M. Hopf und R. Duit (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin: Springer Spektrum.
- Schulz, C. M. (1955). *Peanuts Comicstrip vom 21. Januar 1955*. Zugriff am 21. Mai 2025. URL: https://peanuts.fandom.com/wiki/January_1955_comic_strips.
- Titz, S. (2015). *Warum wir immer nur eine Seite des Mondes sehen*. Zugriff am 5. Mai 2025. URL: <https://www.weltdrphysik.de/thema/hinter-den-dingen/gebundene-rotation-des-mondes/>.
- Universität zu Köln (2015). *Was wiegt die Erde?* Veröffentlicht am 26. Mai 2015. Zuletzt aktualisiert am 30. April 2025. Zugriff am 13. Mai 2025. URL: <https://uni-koeln.de/universitaet/aktuell/koelner-universitaetsmagazin/unimag-einzelansicht/was-wiegt-die-erde>.
- Urhahne, D., M. Dresel und F. Fischer (2019). *Psychologie für den Lehrberuf*. 1. Aufl. Springer Berlin, Heidelberg.

- Wagenschein, M. (1968). *Verstehen lehren: Genetisch - Sokratisch - Exemplarisch*. Weinheim, Germany: Beltz.
- Walter, U. (2017). *Astronautics: The Physics of Space Flight*. 3rd. Cham: Springer.
- Wandersee, J. H., R. Good und S. S. Demastes (1995). „Forschungen zum Unterricht über Evolution“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 1.
- Williams, D. R. (2024a). *Earth Fact Sheet*. Zuletzt aktualisiert am 15. November 2024. Zugriff am 4. April 2025. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>.
- Williams, D. R. (2024b). *Mercury Fact Sheet*. Zuletzt aktualisiert am 11 January 2024. Zugriff am 4. April 2025. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>.
- Williams, D. R. (2024c). *Moon Fact Sheet*. Zuletzt aktualisiert am 11. Januar 2024. Zugriff am 4. April 2025. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>.
- Williamson, K. und S. Willoughby (n.d.). *Newtonian Gravity Concept Inventory (NGCI), Version 3*. URL: <https://www.physport.org/assessments/assessment.cfm?I=97&A=NGCI>.
- Wom, D. (2023). „Einsteins Relativitätstheorie verstehen“. In: *Das Wissen*.
- Zirker, J. B. und J. Houfgast (2025). *Eclipse: The Frequency of Solar and Lunar Eclipses*. Fact-checked by The Editors of Encyclopaedia Britannica. Zuletzt aktualisiert am 25. März 2025. Zugriff am 4. April 2025. URL: <https://www.britannica.com/science/eclipse/The-frequency-of-solar-and-lunar-eclipses>.

Anhang

Tabellen

Tabelle 1: Maßstabsgetreue Größen und Entfernungen im Sonnensystem
(Der Maßstab beträgt 1 : 3,5 Milliarden)

Himmelskörper	Durchmesser [m]	Entfernung zur Sonne [m]	Durchmesser im Maßstab [cm]	Entfernung im Maßstab [m]
Sonne	$1,4 \cdot 10^9$	0	40	0
Merkur	$4,9 \cdot 10^6$	$57,9 \cdot 10^9$	0,15	16
Venus	$12,1 \cdot 10^6$	$108,2 \cdot 10^9$	0,34	30
Erde	$12,7 \cdot 10^6$	$149,6 \cdot 10^9$	0,36	43
Mond	$3,4 \cdot 10^6$	$0,38 \cdot 10^9$ (zur Erde)	0,1	0,1 (zur Erde)
Mars	$6,7 \cdot 10^6$	$228,0 \cdot 10^9$	0,19	61
Jupiter	$143,0 \cdot 10^6$	$778,5 \cdot 10^9$	4,1	222
Saturn	$120,5 \cdot 10^6$	$1432,0 \cdot 10^9$	3,4	409
Uranus	$51,1 \cdot 10^6$	$2867,0 \cdot 10^9$	1,5	819
Neptun	$49,5 \cdot 10^6$	$4515,0 \cdot 10^9$	1,4	1290
Alpha Centauri A	$2,2 \cdot 10^9$	$4,132 \cdot 10^{16}$	49,0	$11,7 \cdot 10^6$

Tabelle 2: Übersicht der in der vorliegenden Arbeit behandelten Stationen

Begrüßung	
Dauer	10 min
Inhalt	Ziel der Führung, Verhaltensweisen, Einstiegsthema
Methodik	(Unterrichts-)Gespräch
Tellurium	
Dauer	10-20 min
Inhalt	(inneres) Sonnensystem, Tag-Nacht-Zyklus, Jahreszeiten, Mondbewegung, Mond-/Sonnenfinsternis, Charakter des Modells
Präkonzepte	Die Jahreszeiten entstehen durch die Änderung des Abstandes der Erde zur Sonne, Mondphasen entstehen durch Erdschatten, Größenordnungen
Methodik	Beobachten, Gespräch, Vorführexperiment
Mondphasen	
Dauer	5 min
Inhalt	Entstehung der Mondphasen, Abgrenzung zu Eklipsen
Präkonzept	Die Mondphasen entstehen durch den Erdschatten, der auf den Mond fällt.
Methodik	Schülerexperiment
Mondrotation	
Dauer	5 min
Inhalt	Erklärung und Entstehung der gebundenen Mondrotation
Präkonzepte	Der Mond dreht sich nicht um die eigene Achse, da Seite von der Erde aus immer die gleiche zu sehen ist.
Methodik	Schülerexperiment
Gravitationstisch	
Dauer	15-20 min
Inhalt	Gravitation als Krümmung der Raumzeit, Orbit des Erde-Mond-Systems um die Sonne, Swing-By-Manöver, Doppelsternsysteme, Entstehung der Saturnringe, Entstehung des Sonnensystems
Präkonzepte	Gravitation ist Magnetismus, Im Weltall gibt es keine Schwerkraft
Methodik	Vortrag, Vorführexperiment, Schülerexperiment
Maßstabsmodell	
Dauer	10-15 min
Inhalt	Größe und Abstand der Himmelskörper im Sonnensystem, α -Centauri System
Präkonzepte	Planeten sind größer als Sterne, Die Entfernung des Mondes wird unterschätzt und die der Sonne überschätzt, Sonne ist kein Stern
Methodik	Ratespiel, Schülerexperiment, Vortrag

Tabelle 3: Übersicht der hier nicht vorgestellten Stationen (siehe (Nagel, 2025))

Planetenweg	
Dauer	25-30 min
Inhalt	Sonnensystem, Planeten, α -Cen System
Präkonzepte	Größenordnungen, Sonne ist kein Stern
Methodik	Gespräch, Schülerexperiment
Präzisionsuhr	
Dauer	5-10 min
Inhalt	Geschichte der Sternwarte, Koordinatensysteme
Präkonzepte	Fehlvorstellungen zur Erdbewegung
Methodik	Gespräch
Meteoriten	
Dauer	5-10 min
Inhalt	Sonnensystem, Meteoriten, Asteroiden, Kometen
Präkonzepte	Größenordnungen, im Weltall gibt es keine Schwerkraft
Methodik	Gespräch, Vorführexperiment
Museumsgang	
Dauer	20-30 min
Inhalt	Geschichte der Sternwarte, Teleskopaufbau, astronomische Beobachtung
Präkonzepte	Instrumente senden Signal aus, IR ist rot, UV ist blau, Licht wird eingefärbt, künstliche/natürliche Strahlung
Methodik	Gespräch, Vorführung
Teleskopmodelle	
Dauer	10-15 min
Inhalt	Geschichte der Sternwarte, astronomische Beobachtung, Teleskopaufbau
Präkonzepte	Instrumente senden Signal aus, zum Sehen muss es hell sein, Licht wird eingefärbt
Methodik	Schülerexperiment
Teleskopfunktion	
Dauer	5-10 min
Inhalt	Teleskopaufbau
Präkonzepte	Instrumente senden Signal aus, zum Sehen muss es hell sein, Licht wird eingefärbt, künstliche/natürliche Strahlung, Licht kann mehr oder weniger werden
Methodik	Vorführexperiment, Beobachten
Kuppel	
Dauer	20-30 min
Inhalt	Arbeitssicherheit, Funktion der Kuppel, Funktion des Teleskops, astronomische Beobachtung, Geschichte der Sternwarte, Koordinatensysteme
Präkonzepte	Größenordnungen, Licht kann mehr oder weniger werden, zum Sehen muss es hell sein, Licht wird eingefärbt
Methodik	Gespräch, Vorführexperiment, Beobachten

Aufbau und Materialliste

Mondphasen:

- Taschenlampe als Sonne
- 5 cm Styroporball am Stock als Mond

Gravitationstisch:

- Ring
- Y-förmiges Mittelstück zur Stabilisation
- 3× Holzfüße
- bielastisches Stofftuch
- Klammern
- viele kleine Murmeln, mind. eine große Murmel
- 1× 1 kg Gewicht (orangene Kugel)
- 2× 500 g Gewichte (rote Kugeln)

Aufbau Gravitationstisch:

- Farbliche Markierung des Rings beachten.
- Holzfüße in richtiger Farbreihenfolge kreisförmig aufstellen. Abstand muss mit dem Ring übereinstimmen.
- Y-förmiges Mittelstück zur Stabilisation mit passenden Farben zwischen den Füßen anbringen.
- Ring mit passenden Farben oben auf die Holzfüße setzen.
- Bielastisches Tuch mit Klammern gleichmäßig über den oberen Ring spannen.

Größen und Entfernungen im Sonnensystem:

- 40 cm Styroporball als Sonne
- Magnetschale mit verschiedenen Magnet- und Styroporkugeln
- 3,6 mm Kugel entspricht der Erde
- 1 mm Kugel entspricht dem Mond
- restliche Kugeln zur Verwirrung

Ersatzteile:

- Styroporbälle: <https://www.kreativ-depot.de/basismaterial/styroporformen/styropor-kugeln/>
- Metallkugeln: <https://www.kugel-winnie.de/Kugeln>
- Reifen: <https://www.hula-hoop-shop.eu/Hula-Hoop-Rohling>
- Stofftuch (Farbe: marine): <https://www.giffels.de/Stoffe-elastisch/Stoff-Kategorie/Lycra--Super-Lycra/Matt-Lycra-Badeanzugstoff.html>
- Klammern (Größe: 51 mm): <https://www.ebay.de/itm/302164540818?var=601001118800>
- **Gewichte:** 1 kg: <https://amzn.eu/d/6QnQzXk>,
2× 500 g: <https://amzn.eu/d/1vKpKmx>

Präkonzepte und Quellen

Die Entstehung der Mondphasen:	
<p>Präkonzept:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Mondphasen entstehen durch den Erdschatten, der auf den Mond fällt. 	<p>Fachlich Korrekt:</p> <ul style="list-style-type: none"> Mondphasen entstehen durch die unterschiedliche Sichtbarkeit der von der Sonne beleuchteten Mondhälfte, während der Mond die Erde umkreist.
<p>Quelle: Danaia, L., & McKinnon, D. H. (2008). <i>Common alternative astronomical conceptions encountered in junior secondary science classes: Why is this so? Astronomy Education Review</i>, 6(2).</p>	
Gebundene Rotation des Mondes:	
<p>Präkonzept:</p> <ul style="list-style-type: none"> Der Mond dreht sich nicht um die eigene Achse, da Seite von der Erde aus immer die gleiche zu sehen ist. 	<p>Fachlich Korrekt:</p> <ul style="list-style-type: none"> Der Mond dreht sich in derselben Zeit um seine eigene Achse, wie er die Erde umrundet (gebundene Rotation).
<p>Quelle: Barrier, R. M. (2010). <i>Astronomical misconceptions. The Physics Teacher</i>, 48(5).</p>	
Entstehung der Jahreszeiten:	
<p>Präkonzept:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Jahreszeiten entstehen durch die Änderung des Abstandes der Erde zur Sonne. 	<p>Fachlich Korrekt:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Jahreszeiten entstehen durch die Neigung der Erdachse, wodurch sich der Einfallswinkel und die Dauer des Sonnenlichts auf der Erdoberfläche ändern.
<p>Quelle: Danaia, L., & McKinnon, D. H. (2008). <i>Common alternative astronomical conceptions encountered in junior secondary science classes: Why is this so? Astronomy Education Review</i>, 6(2).</p>	
Gravitationstisch:	
<p>Präkonzept:</p> <ul style="list-style-type: none"> Gravitation ist Magnetismus. Im Weltall gibt es keine Schwerkraft. 	<p>Fachlich Korrekt:</p> <ul style="list-style-type: none"> Gravitation wirkt unabhängig von magnetischen Eigenschaften. Gravitation wirkt überall im Universum; Schwerelosigkeit entsteht durch den freien Fall eines Objekts in einem Gravitationsfeld.
<p>Quelle: Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., & Duit, R. (2018). <i>Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis</i>. Berlin: Springer.</p>	
Größen und Entfernungen im Sonnensystem:	
<p>Präkonzept:</p> <ul style="list-style-type: none"> Planeten sind größer als Sterne. 	<p>Fachlich Korrekt:</p> <ul style="list-style-type: none"> Sterne sind größer, erscheinen lediglich aufgrund ihrer großen Entfernungen als kleine Punkte am Himmel.
<p>Quelle: Rajpaul, V. M., Lindstrøm, C., Engel, M. C., Brendehaug, M., & Allie, S. (2018). <i>Cross-sectional study of students' knowledge of sizes and distances of astronomical objects. Physical Review Physics Education Research</i>, 14(2), 020108.</p>	
<p>Präkonzept:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Entfernung des Mondes wird unterschätzt und die der Sonne überschätzt. 	<p>Fachlich Korrekt:</p> <ul style="list-style-type: none"> Abstand Mond-Erde: 384.400km. Abstand Erde-Sonne: 149.600.000km.
<p>Quelle: Miller, B. W., & Brewer, W. F. (2010). <i>Misconceptions of astronomical distances. International Journal of Science Education</i>, 32(12).</p>	

Erklärung zur Hausarbeit gemäß 29 (Abs.6) LPOI

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig verfasst wurde und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt wurden. Weitere Personen waren an der Fertigung nicht beteiligt. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, sind in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Die Stellen der Arbeit, die unter dem Einsatz von generativer Künstlicher Intelligenz erstellt wurden, sind in jedem einzelnen Fall unter Angabe des verwendeten technischen Hilfsmittels dokumentiert. Ggf. bestehende fachspezifische Anforderungen (z. B. des Lehrstuhls, des Fachbereichs oder der Hochschule) hinsichtlich des Umfangs dieses Einsatzes und der Art der Dokumentation wurden eingehalten. Diese Erklärung erstreckt sich auch auf etwa in der Arbeit enthaltene Zeichnungen, Kartenskizzen und bildliche Darstellungen.

Oberasbach, 11.07.2025

Leonard Billing