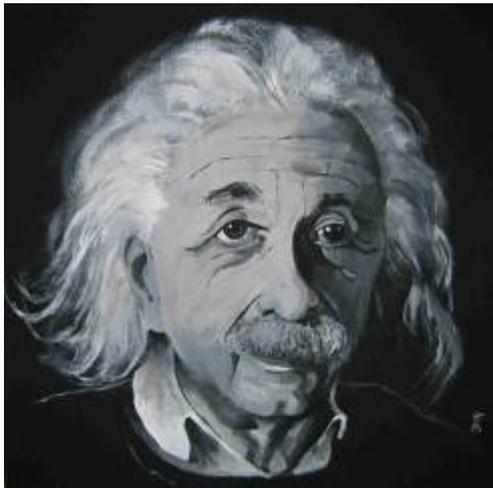


Lichtablenkung im Schwerfeld

Dirk Brockmann

1. Vorbemerkungen

„Ist die Allgemeine Relativitätstheorie in der Schule lehrbar?“. Mit dieser Frage unterschreibt Herr Lindner den Titel seines Aufsatzes „Die Lichtablenkung am Sonnenrand“ [Li04]. Er kommt, wie ich, zu dem Schluss, dass dies für ausgewählte Aspekte dieser Theorie durchaus möglich ist. Allerdings sollte eine entsprechende Unterrichtseinheit als Exkurs angelegt sein, der Wege in eine moderne Physik weist. Ein umfangreicheres Verständnis dieser modernen physikalischen Theorien kann auf der anderen Seite allenfalls ein Studium ermöglichen.



Im Folgenden werden zwei Modelle zur Veranschaulichung des Effektes der Lichtablenkung in Gravitationsfeldern vorgestellt. Danach wird eine [Anleitung zur Auswertung von Beobachtungsdaten](#) hinsichtlich von Sternfehlpitionen während der Sonnenfinsternis von 1922 gegeben. Die Abweichungen der beobachteten Sternörter von den erwarteten werden mit einem aus der klassischen

Physik heraus entwickelten Modell abgeglichen. Dabei zeigt sich eine Abweichung um den Faktor zwei, der im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie plausibel ist. An dieser Stelle wird deshalb eine Grenze des Gültigkeitsbereiches der klassischen Physik aufgezeigt, wenn auch die Einzelheiten bei der Herleitung der Einsteinschen Formeln im Rahmen der Schulphysik nicht erbracht werden können.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Mechanik, Relativitätstheorie	Lichtablenkung im Gravitationsfeld, Bewegungsgesetze , Messen , Arbeit mit Modellen
Astronomie	Kosmos	Galaxienbögen , Gravitationslinsen
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma	Trigonometrie , Datenauswertung mit dem Taschenrechner

2. Veranschaulichung der Raumkrümmung durch einen „Potentialtrichter“

[\(→zurück zum Anfang\)](#)



Modelle für Potentialtrichter können auf vielfältige Weise hergestellt werden. Im einfachsten Fall spannt man einen Müllsack oder ein dehnbare Gewebe über einen Holzrahmen und beschwert die Stelle, die das Gravitationszentrum darstellen soll, mit einem Gewicht, etwa einer Stahlkugel.

Interessanterweise eignen sich auch einige Lampenschirme oder Obstschalen in der Form einem solchen Potentialtrichter. Auf dem Bild ist beispielsweise ein Lampenschirm zu sehen, der, auf dem Kopf stehend, in die Platte eines ausgedienten

Tisches integriert wurde. Den Schülerinnen und Schülern muss in diesem Zusammenhang verdeutlicht werden, dass hier nur das Gravitationsfeld in einer Ebene modelliert wurde, die dritte Dimension, in die der Trichter wächst, steht hier für das Maß des Gravitationspotentials am jeweiligen Orts der Ebene. Man kann mit diesem Modell also, von oben betrachtet, den Bewegungsablauf eines Teilchens im Gravitationsfeld der zentralen Masse beobachten, indem man beispielsweise eine Murmel über die Ebene rollen lässt. Mit etwas Geschick bekommt man sogar elliptische Bahnen hin.

3. Das zerbrochene Weinglas

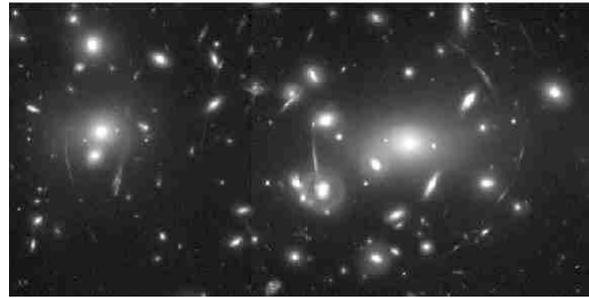
[\(→zurück zum Anfang\)](#)



Eine geeignete Modellierung des gekrümmten Raums wird von Herrn Lotze in [Lo04] beschrieben. Hier werden die Wirkungen der Raumkrümmung durch eine große Masse (**Gravitationslinse**) in Analogie durch eine speziell geformte Glaslinse mit ihrem gegen Luft höheren Brechungsindex simuliert. Eine Laune der Natur und Technik will es, dass die kostspielig herzustellende Speziallinse in guter Näherung durch einen abgebrochenen Weinglasfuß ersetzt werden kann. Betrachtet man durch

diesen ein kleines aber unverzerrtes Bild einer Galaxie (beispielsweise auf einer Kopie des so genannten Hubble Ultra Deep Field, zu beziehen von der NASA Homepage), so verformt es sich anschaulich zu einem Bogen. Bei geschickter Haltung des Linsenersatzes können sogar zwei Bilder derselben Galaxie gesehen werden.

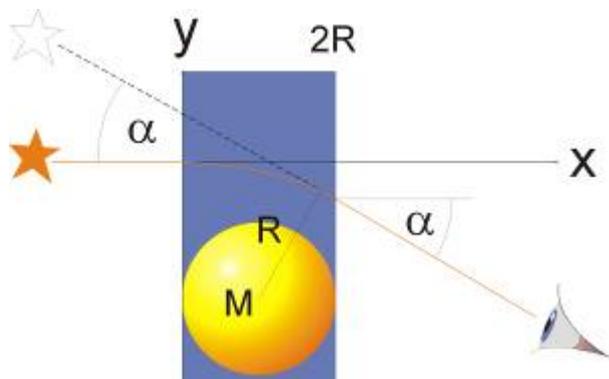
Die beobachteten Erscheinungen können dann mit realen Aufnahmen moderner Großteleskope verglichen werden. Schöne Beispiele für **Galaxienbögen** finden sich beispielsweise im Galaxienhaufen Abell 2218. Benutzt man im Unterricht eine Farbaufnahme des Galaxienhaufens, wie man sie leicht im Internet bekommt, werden Schüler mit der Kenntnis des optischen



Dopplereffektes möglicherweise vermuten, dass sich die gelblich erscheinenden Galaxien im Vordergrund der Aufnahme befinden, die bogenförmigen, rötlichen Galaxien weiter hinten. Es kann in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass von der Galaxienfarbe nicht unbedingt auf deren Entfernung geschlossen werden kann. Vielleicht vermuten die Schüler an dieser Stelle bereits, dass die Vordergrundgalaxien Einfluss auf die Form der weiter hinten liegenden nehmen. Als späteren, zusätzlichen Impuls kann das bemerkenswerte Resultat von (spektralen) Auswertungen des Bildes eingestreut werden, dass einige der Bögen offensichtlich dieselbe Galaxie darstellen. Man kann an dieser Stelle eine lebhafte Diskussion über Mechanismen der Entstehung der Bögen erwarten.

4. Auswertung der Sternortvermessung von W. W. Campbell (1922)

[\(→zurück zum Anfang\)](#)



Zunächst sollen zwei Funktionen aufgestellt werden, die den Winkel, um den das Sternenlicht am Sonnenrand gebogen wird, in Abhängigkeit vom minimalen Abstand des Lichtstrahles vom Sonnenmittelpunkt angeben. Die erste entspringt der klassischen Physik und bedient sich einiger Näherungen, ist dafür aber mit dem Kenntnisstand von Schülerinnen und -schülern der Oberstufe entwickelbar. Die zweite folgt aus den Überlegungen Albert Einsteins und muss

gegeben werden, da die entsprechenden Formeln nicht mit den Mitteln der Schulphysik erschlossen werden können. Der Sinn der hier beschriebenen Aufgabe besteht folglich darin, den Schülern zu verdeutlichen, dass sich auf Grund der beobachtbaren Phänomene die Notwendigkeit einer neuen physikalischen Theorie ergibt, die man sich bei Interesse in einem Studium erschließen kann. Sie liefert neben interessanten Beobachtungstatsachen einen Ausblick auf die moderne Physik und grenzt diese deutlich von der klassischen Physik ab, indem sie zeigt, dass die klassischen Gesetze in diesem Kontext keine Gültigkeit mehr haben. Die Schüler sollen im Plenum eine Näherung für den Ablenkwinkel α entwickeln. Dies kann auf differentiellern Wege erreicht werden. Möglich ist aber auch, dass die Schüler eine Analogie zur Ablenkung von Elektronen in einem homogenen Kondensatorfeld sehen und mit den **Bewegungsgleichungen** argumentieren. Für die Geschwindigkeit in waagerechter Richtung ergibt sich: $v_w=c$ und für die Geschwindigkeit in senkrechter Richtung mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz: $v_s=g \cdot t=(G \cdot M/R^2) \cdot t$.

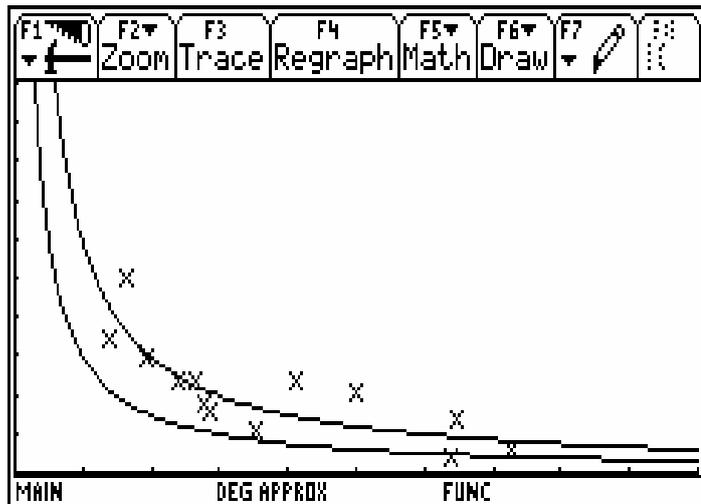
Nimmt man in guter Näherung an, dass ein Lichtstrahl lediglich abgelenkt wird, wenn er sehr nahe an der Sonne vorbeiläuft und sich im blau unterlegten Bereich der Länge $2 \cdot R$ befindet, gilt: $t=2 \cdot R/c$. Ein **trigonometrischer Ansatz** liefert dann folgende Gleichung:

$$\alpha(R) = \tan^{-1} \left(2 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2 \cdot R} \right).$$

Die Erarbeitung obiger Formel kann das Ziel einer Unterrichtsstunde sein. Im weiteren Verlauf soll nun die erarbeitete Formel untersucht werden. Dazu werden Beobachtungsdaten von Sternpositionen während der Sonnenfinsternis von 1922 verteilt. Den Schülern wird die Aufgabe gegeben, die Ablenkwinkel δ sowie die Abstände R für mehrere dargestellte Sterne zu vermessen und in ihre Taschenrechner einzugeben. Die beobachteten Abstände R der Sterne von der Sonnenmitte müssen dabei in Kilometern (am Ort der Sonne) eingegeben werden. Dazu muss man sich an Hand des Sonnendurchmessers einen geeigneten Maßstab verschaffen. Bei den stark übertrieben dargestellten Abweichungen der Sternpositionen (rechte Skala unter dem Beobachtungsblatt) muss berücksichtigt werden, dass diese in Bogensekunden skaliert sind.

Die Aufgaben 1 bis 3 im Aufsatz von Herrn Lotze [Lo05] können hier sinnvoll zur Einübung genutzt werden. Im Zuge von Aufgabe vier werden ebendort Aussagen über die sinnvolle Auswahl verwertbarer Sterndispositionen getroffen. Die mit 71 recht hohe Anzahl auswertbarer Ortverschiebungen kann je nach Interesse der Lerngruppe eine arbeitsteilige Auswertung erforderlich machen.

Die grafische Auswertung der Messungen kann auf Papier erfolgen oder mit Hilfe von **grafikfähigen Rechnern**, wie sie in vielen Bundesländern bereits in der SEK I verpflichtend eingeführt sind. Der Vorteil dieser Rechner liegt darin, dass sie jederzeit verfügbar sind, der Nachteil in der recht groben Auflösung. Ebenfalls wird die obige Formel als $\alpha(R)$ eingegeben. Formel und Messwerte können dann grafisch dargestellt werden:



Es sollte sich zeigen, dass die Messwerte im Vergleich zur Funktion $\delta(R)$ (unterer Graph) zu hoch liegen. Der von Albert Einstein berechnete Verlauf (oberer Graph) trifft die Messwerte aber recht gut. Er ergibt sich wie folgt:

$$\tan(\alpha) = 2 \cdot \frac{G \cdot M}{v^2 \cdot R} + 2 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2 \cdot R} \xrightarrow{v=c} \alpha = \tan^{-1} \left(4 \cdot \frac{G \cdot M}{c^2 \cdot R} \right).$$

Der erste Summand entstammt dabei dem Äquivalenzprinzip, der zweite der Raumkrümmung.

5. Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler sollen bei der Bearbeitung dieser Aufgaben...

- an Hand der Fotografien die Linsenwirkung von Galaxien erkennen und beschreiben.
- am Potentialtrichtermodell experimentieren.
- die beschriebene Formel herleiten.
- die geforderten Parameter für verschiedene Sterne vermessen und in die Tabellenkalkulation ihrer Rechner eingeben.
Sie sollen die Funktion gemäß der hergeleiteten Formel eingeben.
- die Abweichung der Messdaten von der theoretischen Kurve beschreiben und beurteilen.
- auf Grund der Befunde die Notwendigkeit einer modernen Physik erkennen.

6. Literatur und Bildnachweis

- [Ca22] W. W. Campbell, R. Trumpler: Observations on the deflection of light in passing through the sun's gravitational field: in: Lick Observatory Bulletin Vol. XI, Nr. 346, S. 41-54
- [Hö02] Stefan Hölters: Suche nach dunkler Materie: Seminararbeit an der RWTH Aachen (Sommersemester 2002)
- [Li04] Klaus Lindner: Die Lichtablenkung am Sonnenrand: in: Astronomie + Raumfahrt 41 (2004) 5
- [Lo04] Karl-Heinz Lotze: Eine gläserne "Gravitations"-Linse: in: Astronomie + Raumfahrt 41 (2004) 5
- [Lo05] Karl-Heinz Lotze: Wissenschaftsdidaktische Variationen über die Lichtablenkung am Sonnenrand: in: Praxis der Naturwissenschaften Jg. 54 2005(4), S.29-37

- Albert Einstein gemalt vom Autor 2005
- Der Galaxienhaufen Abell 2218, NASA, esa, STScI
- Grafik zur Erläuterung der mathematischen Modellierung vom Autor
- Bildschirmgrafik nach der Eingabe der Daten durch Schülerinnen und Schüler der Bismarckschule Hannover

Darstellung der Sterndispositionen aus [Ca22] – hier kann **gemessen** werden

