

## Im Spektrum – Stationenarbeit zur Radialgeschwindigkeitsmethode

In Bezug auf den Beitrag: „Zwei erdähnliche Exoplaneten um GJ 1002“ in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ 10/23, Rubrik: Nachrichten, S. 15, Zielgruppe: Mittel- und Oberstufe.

Katharina Supp

Bis heute (Stand August 2023) wurden insgesamt 1058 Exoplaneten (von insgesamt 5484) mithilfe der **Radialgeschwindigkeitsmethode** nachgewiesen. Zu diesen Entdeckungen zählen auch die beiden erdähnlichen Exoplaneten um den Roten Riesen GJ 1002, auf die der SuW-Beitrag „Zwei erdähnliche Exoplaneten um GJ 1002“ vom Oktober 2023 Bezug nimmt.

Die physikalischen Hintergründe, die es bedarf, um diese Methode zu verstehen, sind vielschichtig. Im vorliegenden Material wurden **fünf Stationen** ([Lichtspektrum](#), [Spektroskopie](#), [Absorptionslinien](#), [Radialgeschwindigkeit](#), [Doppler-Effekt](#)) entwickelt, die den Schüler\*innen die Radialgeschwindigkeitsmethode näherbringen sollen. Die Materialien sind so gestaltet, dass sie von den Schüler\*innen selbstständig, mit hohem experimentellen Anteil bearbeitet werden können. Eine besondere Rolle spielt hierbei der **Einsatz von Smartphones** zur Aufnahme und Auswertung von Versuchsdaten (u.a. Bau eines [Handyspektrometers](#)).

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Sterne, Astropraxis	<a href="#">Exoplanet</a> , <a href="#">Radialgeschwindigkeitsmethode</a> , <a href="#">Radialgeschwindigkeit</a> , <a href="#">Spektroskopie</a> , <a href="#">Fraunhoferlinien</a> , <a href="#">Sonnenspektrum</a>
Physik	Optik, Quantenphysik, Mechanik	<a href="#">Lichtwellen</a> , <a href="#">Brechung</a> , <a href="#">Beugung</a> , <a href="#">Lichtspektrum</a> , <a href="#">Absorption</a> , <a href="#">Vektorzerlegung</a> , <a href="#">Doppler-Effekt</a> , <a href="#">Gravitationsgesetz</a> , <a href="#">Schwerpunkt</a> , <a href="#">Hebelgesetz</a> , <a href="#">Modellversuch zur Bewegung um gemeinsamen Schwerpunkt</a>
Fächerverknüpfung	Astro - Mathematik Astro – Informatik	<a href="#">Vektorzerlegung</a> <a href="#">App-Nutzung</a> , <a href="#">Smartphoneeinsatz</a>
Lehrer allgemein	Kompetenzen (Erkenntnisgewinnung, Kommunikation), Lehr-/Sozialformen, Unterrichtsmittel	<a href="#">praktisches Arbeiten</a> , <a href="#">Freihandversuche</a> , <a href="#">Smartphoneeinsatz</a> , <a href="#">Internetrecherche</a> , <a href="#">Stationenarbeit</a> , <a href="#">Gruppenarbeit</a> , <a href="#">Arbeitsblätter</a> , Lesetexte, <a href="#">Lückentexte</a> , <a href="#">Handy-Spektrometer</a> , <a href="#">App @LightSpectrumPro</a> , <a href="#">App @Phyphox</a>

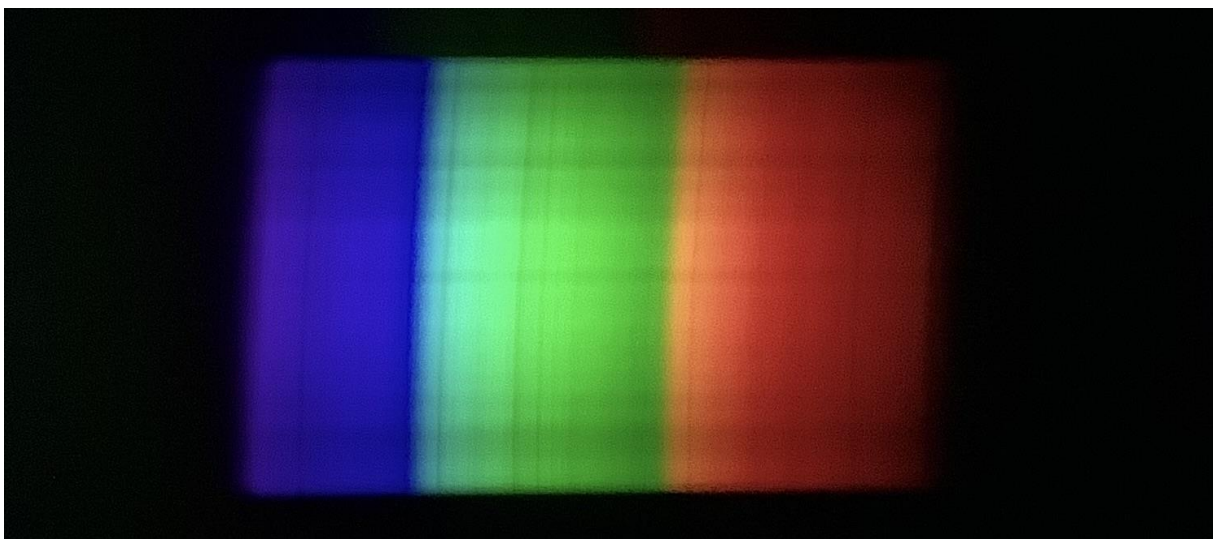


Abbildung 1: Sonnenspektrum aufgenommen mit einem selbstgebauten Handyspektrometer. © Katharina Supp

## Station 1: Lichtspektrum

### *Hinweise für die Lehrkraft:*

Kreist ein Exoplanet um einen Stern, kann man diesen aufgrund der großen Entfernungen meist nicht direkt beobachten. Stattdessen nutzt man **indirekte Methoden**, d.h. man untersucht Effekte, die der Planet auf seinen Zentralstern hat.

Bei der **Radialgeschwindigkeitsmethode** macht man sich folgenden Effekt zunutze:

Besitzt ein Stern einen ausreichend schweren planetaren Begleiter, dann bewegt er sich gemeinsam mit ihm messbar um den gemeinsamen Schwerpunkt. Die Ursache dafür sind die Gravitationskräfte, die beide Objekte aufeinander ausüben. Diese Bewegung des Sterns lässt sich von der Erde aus beobachten. Jedoch ist sie so klein, dass man sie nicht durch ein Fernglas, sondern nur im **Lichtspektrum** des Sterns sehen kann. Die Radialgeschwindigkeitsmethode ist also eine Methode der **Spektroskopie**.

Um den Schüler\*innen die Spektroskopie näher zu bringen, wird in Station 1 zunächst das Lichtspektrum anhand zweier Freihandversuche thematisiert.<sup>1</sup> Die Freihandversuche sind gleichzeitig eine Vorarbeit für den Bau des eigenen Handyspektrometers in Station 2.

### *Benötigte Materialien:*

- AB „[Lichtspektrum](#)“
- für den [Versuch](#) „Zerlegung von weißem Licht durch Brechung“:
  - Handylampe o.ä.
  - 2 Holzbretter ca. 200 × 200 × 40 mm mit geraden Schnittkanten
  - weiße Wand
  - Glas- oder Plexiglasprisma
- für den [Versuch](#) „Zerlegung von weißem Licht durch Beugung“:
  - Handylampe o.ä.
  - 2 Holzbretter (Maße: ca. 200 × 200 × 40 mm) mit geraden Schnittkanten
  - weiße Wand
  - Durchlicht-Beugungsgitter 1000 Linien/mm (z.B. von [Astromedia](#)) in Papprahmen (Maße: ca. 15 × 40 mm)

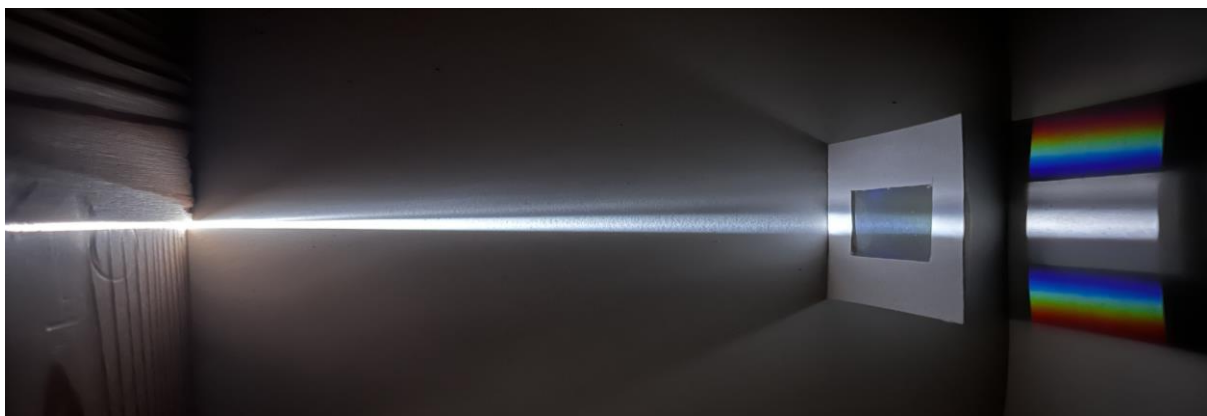


Abbildung 2: Versuchsaufbau „Zerlegung von weißem Licht durch Brechung“. Im Maximum 1. Ordnung entsteht ein kontinuierliches Farbspektrum, wobei blau weiter innen liegt als rot. Für gute Beobachtungsergebnisse muss unbedingt darauf geachtet werden, dass der Eintrittsspalt links möglichst schmal und parallel ist. ©: Katharina Supp

<sup>1</sup> Das Beugungsgitter zur Erstellung des Lichtspektrums wird in diesen Unterrichtsmaterialien als Blackbox behandelt. Ziel der Freihandversuche ist lediglich eine phänomenologische Betrachtung. In der Kursstufe bietet sich eine Verknüpfung mit dem Physikunterricht an, um auch auf die Hintergründe der Beugung von Lichtwellen und ihrer Überlagerung einzugehen.

## Station 2: Spektroskopie

### *Hinweise für die Lehrkraft:*

Lichtspektren werden mit so genannten **Spektrografen** (Spektrometer + Detektor) aufgenommen. In Station 2 bauen die Schüler\*innen in Kleingruppen ein eigenes **Handyspektrometer** (Müller, Marina: Handyspektrometer für den Unterrichtseinsatz, [https://www.ipp.mpg.de/4071259/ZuLa\\_Mueller.pdf](https://www.ipp.mpg.de/4071259/ZuLa_Mueller.pdf)), das die Kamera von einem **Smartphone** bzw. Tablet als Detektor nutzt.

Bei dem Handyspektrometer handelt es sich um ein Gitterspektrometer, d.h. es wird ein Beugungsgitter zur Erzeugung des Spektrums genutzt. Für gute Ergebnisse ist es wichtig, dass die Schüler\*innen insbesondere auf saubere Schnittkanten beim Eintrittsspalt achten und das Beugungsgitter möglichst staub- und fingerabdruckfrei halten. Mit dem Handyspektrometer am Handy oder Tablet können die Schüler\*innen dann die Spektren unterschiedlicher Lichtquellen aufnehmen (Beispiele vgl. [Abb. 3](#)).

*Tipp:* Die Helligkeit der Spektren lässt sich durch eine Veränderung des Abstands zwischen dem Spektrografen und der Lichtquelle erreichen. Bei besonders hellen Lichtquellen (z.B. helle Glühlampe, Sonnenlicht) wird besser das Streulicht auf einer weißen Oberfläche genutzt.

### *Benötigte Materialien:*

- AB „[Spektroskopie](#)“
- für den Bau der Handyspektrografen (pro Spektrograf):
  - Original-[Ausschneidebogen](#) auf dunklem Karton (ca. 200 g/m<sup>2</sup>)
  - Beugungsgitterfolie mit 1000 Linien/mm, zugeschnitten auf ca. 20mm × 25mm (z.B. von [Astromedia](#))
  - Schere, Cutter-Messer, Lineal
  - Falzbein o.ä. zum Rillen
  - Alleskleber
  - leicht ablösbares schwarzes Isolierband
  - evtl. schuleigene Tablets
- für den Versuch: „[Aufnahme verschiedener Lichtspektren](#)“
  - verschiedene Lichtquellen, z.B. LEDs, Glühlampen, Kerzen, ...

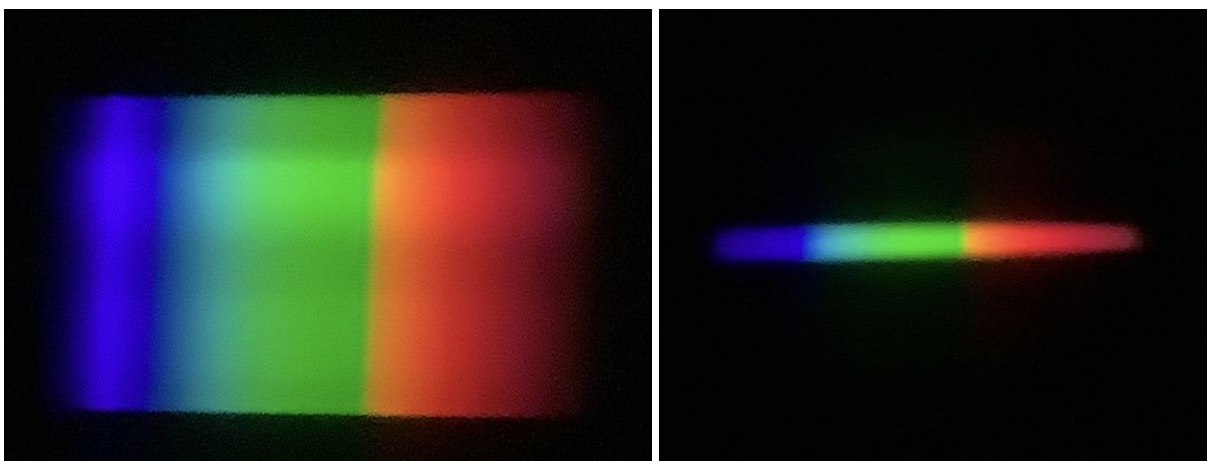


Abbildung 3: Kontinuierliches Spektrum einer Glühlampe (links) und einer Kerzenflamme (rechts), aufgenommen mit dem selbstgebauten Handyspektrometer. © Katharina Supp

## Station 3: Absorptionslinien

### Hinweise für die Lehrkraft

Anders als Glühlampen und Kerzenflammen haben Sterne kein reines kontinuierliches Spektrum. In ihrer Atmosphäre werden bestimmte Wellenlängen absorbiert, was zu den sog. [Absorptionslinien](#) in ihren Spektren führt. Die Absorptionslinien sind für jeden Stern charakteristisch und sagen etwas über die Elemente, die in der Atmosphäre dieses Sterns vorkommen, aus.

Mithilfe des selbstgebautes Handyspektrometers aus Station 2 sollen die Schüler\*innen in Station 3 die Absorptionslinien der Sonne (auch [Fraunhoferlinien](#)) zunächst aufnehmen (vgl. [Abb. 4](#)).

Die Auswertung des Sonnenspektrums erfolgt mithilfe der App ©[LightSpectrumPro](#). Diese App ist zwar kostenpflichtig (einmalig 1,50 Euro), jedoch ist sie sehr benutzerfreundlich und ermöglicht die Aufnahme und Auswertung der Spektren an einem Gerät. Eigene Messungen haben gezeigt, dass die App für die hier gezeigten Zwecke im mittleren Spektralbereich recht zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Die Werte in [Tab. 1](#) wurden mit der App ©[LightSpectrumPro](#) ermittelt. Sie zeigen maximale Abweichungen von  $\pm 4$  nm für die F- und E-Linie. D<sub>1</sub> und D<sub>2</sub> ließen sich nicht auflösen. G und C konnten bei der eigenen Versuchsreihe nicht gefunden werden.

Alternative Auswertungstools für genauere Ergebnisse sind das für Bewegungsanalysen bekannte Programm ©[Tracker](#) bzw. das Grafikprogramm ©[ImageJ](#).

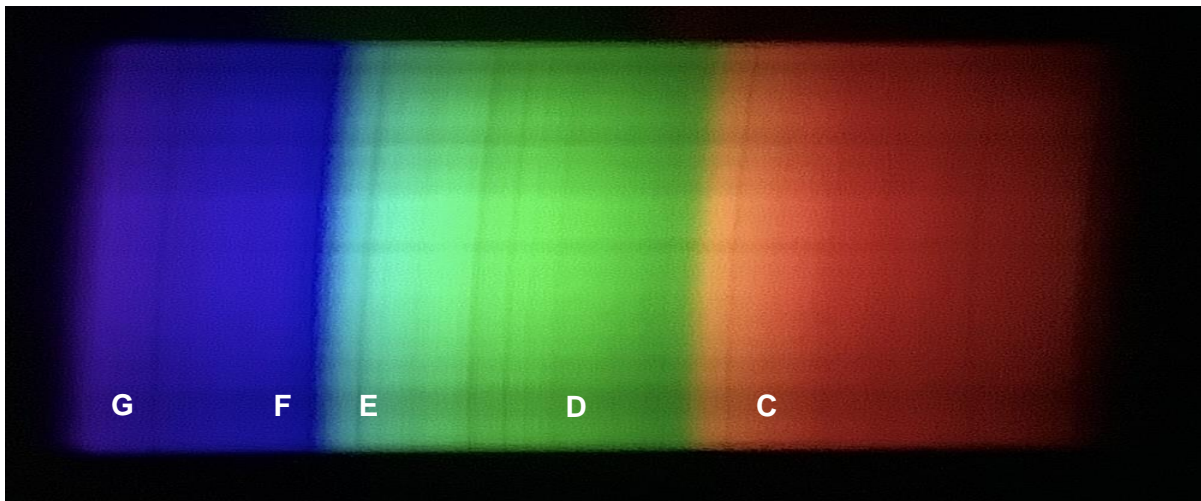


Abbildung 4: Sonnenspektrum aufgenommen mit dem selbstgebautes Handyspektrometer. Gut zu erkennen sind die Fraunhoferlinien G, F, E, D<sub>1</sub>/D<sub>2</sub>, C. ©: Katharina Supp

Name Fraunhoferlinie	Literaturwert	Wert mit © <a href="#">LightSpectrumPro</a>	Element
G	430	-	Fe und Ca
F	486	482	H
E	572	570	Fe
D <sub>1</sub> /D <sub>2</sub>	590/589	586	Na
C	656	-	Ha

Tabelle 1: Vergleich der selbst ermittelten Werte einiger Fraunhoferlinien mit den Literaturwerten.

### Benötigte Materialien:

- AB „[Absorptionslinien](#)“
- für die Untersuchung des [Sonnenspektrums](#):
  - selbstgebautes Handyspektrometer
  - Endgerät (z.B. Schul-Tablet) mit App ©[LightSpectrumPro](#) (kostenpflichtig!)
  - Kompaktleuchtstofflampe (zur [Kalibrierung](#) des Spektrografen)



## Station 4: Radialgeschwindigkeit

### *Hinweis für die Lehrkraft:*

Von den Stationen [1](#), [2](#) und [3](#) wissen die Schüler\*innen, dass bei der Radialgeschwindigkeitsmethode das Spektrum von Sternen genauer untersucht wird. Doch was genau wird in den Spektren gesucht? Dieser Frage widmen sich die Stationen 4 und [5](#).

Ist ein Planet groß genug, sorgen seine Gravitationskräfte dafür, dass sich sein Zentralstern gemeinsam mit ihm merklich um den gemeinsamen Schwerpunkt dreht. Der Radius der Drehbewegung des Sterns wird dabei größer, je schwerer und näher sein planetarer Begleiter ist.

In Station 4 wird den Schüler\*innen diese Bewegung an einem Modell aus Styroporkugeln veranschaulicht (vgl. [Abb. 5](#)). Der Schüler kann am Modell sehen, dass sich der Stern mit einer Komponente seiner Bewegung radial (mit der periodisch sich verändernden **Radialgeschwindigkeit**) von ihm weg und wieder auf ihn zu bewegt.

### *Benötigte Materialien:*

- AB „[Radialgeschwindigkeit](#)“
- für den [Modellversuch](#):
  - Styroporkugel groß (d = 120 mm)
  - Styroporkugeln klein (d = 60 mm, 80 mm, 100 mm)
  - dünner Holzstab (l = 0,5 m)
  - Wollfaden o.ä.
  - Stoppuhr



Abbildung 5: Versuchsaufbau des Modellversuchs „Radialgeschwindigkeit“. Im Modell stellt die große Styroporkugel „S“ den Zentralstern, die kleine „P“ den Planeten dar. © Katharina Supp

## Station 5: Doppler-Effekt

### Hinweis für die Lehrkraft:

Bewegt sich ein Stern auf den Beobachter zu, werden die von ihm ausgesandten Lichtwellen gestaucht. Dadurch wird deren Wellenlänge kleiner (bzw. die Frequenz größer), was zur Folge hat, dass die mit dem Spektrografen aufgefangenen Farbbänder (und mit ihnen die messbaren Spektrallinien) **blauverschoben** sind. Entfernt sich der Stern wieder vom Beobachter, werden die Lichtwellen gestreckt. Die Wellenlänge wird größer (bzw. die Frequenz kleiner). Die Farbbänder samt der Spektrallinien sind dann **rotverschoben**. Eine regelmäßige Blau- und Rotverschiebung im Sternspektrum ist folglich ein Hinweis auf einen Planeten, der um den Stern kreist.

Die vom Bewegungszustand des Senders und/oder Empfängers abhängige Änderung der Wellenlänge einer Welle bezeichnet man als **Doppler-Effekt**.

Bekannt ist der Doppler-Effekt insbesondere aus der Akustik. In Station 5 steht ein Versuch zum akustischen Doppler-Effekt – als **Analogieversuch zum optischen Doppler-Effekt** – im Zentrum. Dabei wird die App ©[Phyphox](#) zum Aufnehmen und Auswerten der Daten eingesetzt (vgl. [Abb. 6](#)).

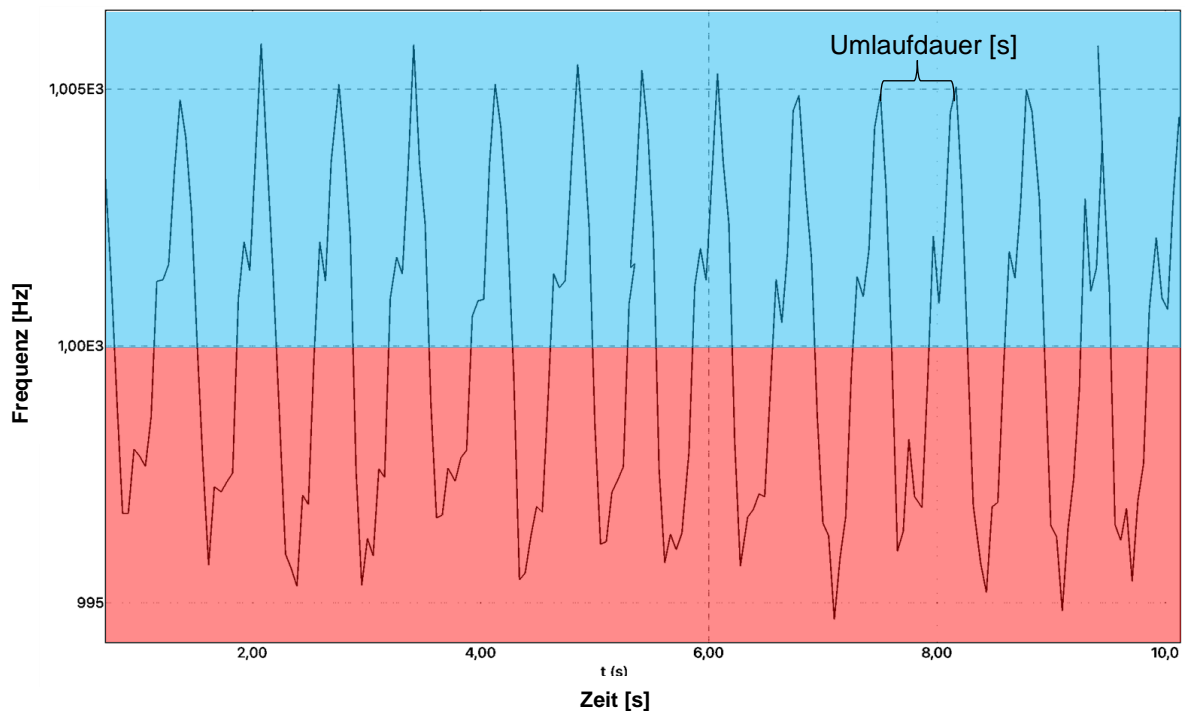


Abbildung 6: Ergebnisse vom Versuch „Akustischer Doppler-Effekt“ in der App ©[Phyphox](#). Auf den Achsen werden die Frequenz der Schallwelle und die Zeit dargestellt. Man erkennt Bereiche, in denen sich der Sensor von der Schallquelle wegbewegt (rot markiert) und auf ihn zubewegt (blau markiert). Der Abstand zwischen zwei Maxima entspricht der Umlaufdauer des Sensors. © Katharina Supp

### Benötigtes Material:

- AB „[Doppler-Effekt](#)“
- für den Versuch „[Akustischer Dopplereffekt](#)“:
  - 2 Smartphones oder Tablets
  - App ©[Phyphox](#)
  - Drehteller mit Halterung aus Stativstangen und Klemmen



## Arbeitsblätter

## Das Lichtspektrum

Licht verbreitet sich in Wellen durch den Raum. Dabei unterscheiden sich die **Lichtwellen** in ihrer Auslenkung (auch **Amplitude**) und ihrer **Wellenlänge** (vgl. Abb. 1).

Die Amplitude der Lichtwellen bestimmt die Helligkeit, eine „höhere“ Welle bedeutet, dass wir eine Lichtquelle als heller empfinden. Die Wellenlänge entscheidet darüber, welche Farbe wir wahrnehmen.

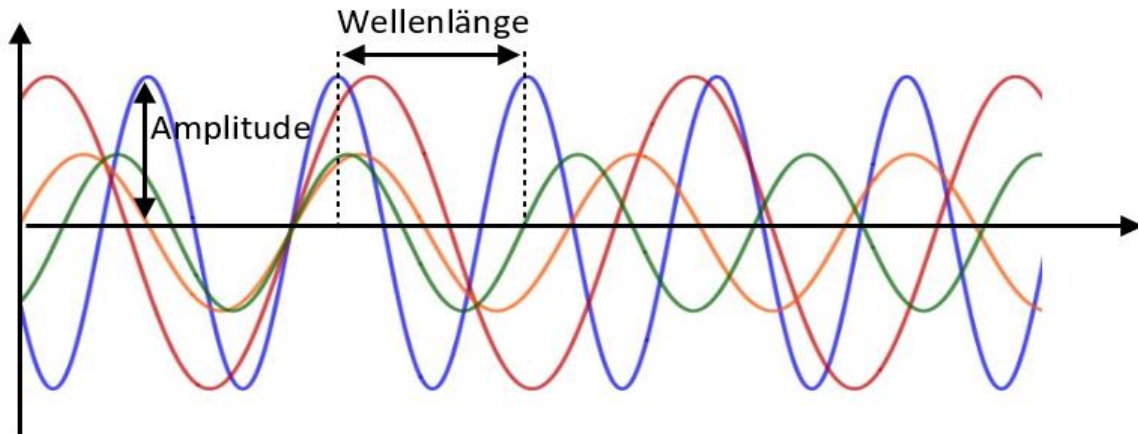


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung von Lichtwellen unterschiedlicher Farbe und Intensität. © Katharina Supp

Farbe	Wellenlänge [nm]	Frequenz [Hz]
violett	380 bis 425	
blau	425 bis 485	
grün	485 bis 560	
gelb	560 bis 590	
orange	590 bis 630	
rot	630 bis 700	

Tabelle 1: Wellenlängen und Frequenzen der Spektralfarben.

Aus Tab. 1 kann man ablesen, dass jede **Spektralfarbe** eine charakteristische **Wellenlänge** hat. Eine andere Größe, mit der sich Lichtwellen charakterisieren lassen, ist ihre **Frequenz** (Einheit: Hertz). Die Frequenz ist die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde. Wellenlänge und Frequenz hängen direkt zusammen. Je größer die Wellenlänge einer Welle ist, desto geringer ist ihre Frequenz. Es gilt:

$$\text{Frequenz} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit}}{\text{Wellenlänge}}. \quad (\text{Tipp: Lichtgeschwindigkeit} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$$

### Aufgaben:

1) Ergänze die rechte Spalte von Tab. 1. Berechne dafür die Frequenzbereiche der sechs angegebenen Hauptfarben. Denke daran, die Einheit der Wellenlängen in die SI-Einheit Meter umzurechnen, bevor du die Werte in die Formel einsetzt (Tipp:  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ).

2) Die meisten Lichtquellen im Alltag sind weiß. Untersuche das weiße Licht deiner Handylampe.

### Zerlegung von weißem Licht durch Brechung



#### Material:

- Handylampe o.ä.
- 2 Holzbretter ca.  $200 \times 200 \times 40 \text{ mm}$  mit geraden Schnittkanten
- weiße Wand
- Glas- oder Plexiglasprisma



[zurück zum Anfang](#)

**Arbeitsauftrag:**

Dunkle das Zimmer ab. Schalte die Lichtquelle ein und stelle sie in ca. 50 cm Abstand vor die weiße Wand. Positioniere die beiden Holzbretter nun so vor der Lichtquelle, dass auf der Wand ein schmaler weißer Lichtstreifen erscheint. Bringe in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Schirm das Prisma. Beschreibe deine Beobachtung.

**Erklärung:** Ergänze dazu den **Lückentext** durch die unten vorgegebenen Wörter.

Das weiße Licht wird beim Übergang von Luft in Glas \_\_\_\_\_ .  
\_\_\_\_\_ findet beim Übergang zwischen Medien unterschiedlicher optischer  
\_\_\_\_\_ statt, beispielsweise an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser,  
beim Prisma zwischen Luft und \_\_\_\_\_. Verschiedene  
\_\_\_\_\_ werden unterschiedlich stark gebrochen. Der kurzwellige  
\_\_\_\_\_ Anteil im weißen Licht wird beim Übergang zwischen zwei Medien stärker  
gebrochen als der langwellig \_\_\_\_\_.  
Aus diesem Grund wird weißes Licht, das durch ein Prisma fällt, in verschiedene  
\_\_\_\_\_ zerlegt. Es entsteht ein kontinuierliches Spektrum mit den so ge-  
nannten \_\_\_\_\_.

blaue | Dichte | gebrochen | Brechung | rote | Farbbereiche | Glas | Spektralfarben | Wellenlängen

**3) Zerlegung von weißem Licht durch Beugung**



**Materialien:**

- Handylampe o.ä.
- 2 Holzbretter (Maße: ca. 200 × 200 × 40 mm) mit geraden Schnittkanten
- weiße Wand
- Durchlicht-Beugungsgitter 1000 Linien/mm (Maße: ca. 15 × 40 mm) in Papprahmen

**Arbeitsauftrag:**

**a)** Benutze den Versuchsaufbau vom letzten Versuch ohne Prisma. Bringe in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Schirm das Durchlicht-Beugungsgitter.

Beschreibe deine Beobachtungen.

*Tipp:* Wenn du nichts beobachten kannst, dann drehe das Beugungsgitter um 90°.

**b)** Variiere jetzt die Breite des Lichtstreifens, den Abstand des Beugungsgitters zum Schirm sowie den Winkel zwischen Lichtstreifen und Beugungsgitter. Beschreibe, welche Veränderungen du beobachtest. Formuliere daraus Regeln, die beim Experimentieren mit Durchlicht-Beugungsgittern beachtet werden müssen.

**Erklärung:**

Das Durchlicht-Beugungsgitter ist von sehr vielen, sehr feinen Rillen durchzogen (z. B. 1000/mm). An diesen Rillen wird das Licht gebeugt. Der langwellige rote Lichtanteil wird stärker gebeugt als der kurzwellige blaue. Dadurch wird das weiße Licht – ähnlich wie beim Glasprisma – in seine farbigen Anteile zerlegt.  
Beugung und die anschließende Überlagerung der Lichtwellen sind die Ursache für die farbige Auffächerung bei diesem Versuch.

**4)** Nenne Beispiele aus dem Alltag, bei denen du die Zerlegung von weißem Licht in seine Spektralfarben durch Lichtbrechung oder -beugung beobachten kannst.

## Spektroskopie

Ein Spektrograf ist ein Messgerät, das Strahlung in seine einzelnen Farbanteile – sprich Wellenlängen – zerlegen und dann detektieren kann. Spaltet man das Licht der Sonne oder anderer Lichtquellen in seine farbigen Bestandteile, so erhält man ein Farbspektrum. Dieses Spektrum erhält – je nach Bauart – für auf dem Erdboden ankommende Strahlung alle Wellenlängen vom nahen infraroten über sichtbares Licht bis hin zu Ultraviolettstrahlung.

Spektrografen werden dazu benutzt, um die Zusammensetzung verschiedener Lichtquellen zu untersuchen. In der Astronomie sind sie ein gängiges Mittel, um das ausgesandte Licht von Sternen, Nebeln und anderer Objekte am Himmel zu untersuchen.

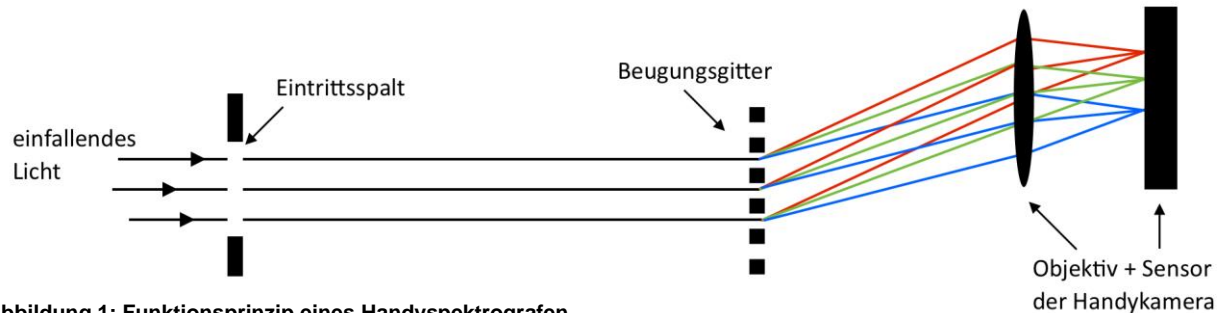


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines Handyspektrografen.

Das Licht einer beliebigen Lichtquelle wird durch einen schmalen Eintrittsspalt gebündelt. Das Lichtbündel trifft auf das Beugungsgitter. Dort werden verschiedene Wellenlängen unterschiedlich stark gebeugt. Die gebeugten Lichtwellen überlagern sich, sodass ein Lichtspektrum entsteht. Im Beispiel dient eine Handykamera als Detektor. © Katharina Supp

### Aufgaben:

#### 1) Bauanleitung für den Handyspektrografen



#### Materialien:

- auf dunklem Karton (ca. 200 g/m<sup>2</sup>)
- Beugungsgitterfolie mit 1000 Linien/mm, zugeschnitten auf ca. 20mm × 25mm
- Schere, Cutter-Messer, Lineal
- Falzbein o.ä. zum Rillen
- Alleskleber
- leicht ablösbares schwarzes Isolierband

#### Anleitung:

##### → Gehäuse:

- Kopiere den Ausschneidebogen auf den Karton.
- Schneide alle Bauteile sowie die Aussparungen 1 und 2 mit dem Cutter-Messer aus.
- Klebe eines der beiden Rechtecke für den Bau des Eintrittsspalts so auf die schraffierte Fläche 3 des Gehäuses, dass es längsseitig an den Hilfslinien anliegt. Klebe das zweite Rechteck so auf die andere Seite der schraffierten Fläche, dass zwischen beiden Rechtecken ein schmaler paralleler Spalt (ca. 0,1 bis 0,2 mm) entsteht (vgl. Abb. 2, links).
- Ziehe die gestrichelten Linien des Gehäuses mit dem Falzbein nach, damit saubere Knickkanten entstehen. Falte anschließend das Gehäuse an den Knickkanten.
- Klebe das Gehäuse zusammen. Die Seite, an der das Gitter angebracht werden soll, wird noch offengelassen. Überprüfe, ob an den Ecken oder Kanten des Gehäuses noch Licht eindringt und dunkle ggf. mit dem Isolierband ab.
- Klebe das Beugungsgitter auf die Innenseite der Aussparung 1. Achte dabei darauf, dass du das Gitter nur am Rand berührst und der Klebstoff das Gitter nicht verschmiert.
- Halte das Gitter gegen das Licht, bis du einen Farbverlauf von blau nach rot siehst. Richte das Gitter so aus, dass dieser Farbverlauf des Gitters senkrecht zum Eintrittsspalt liegt.

*Tipp:* Klebe das Gitter zuerst an einer Ecke fest und prüfe die Ausrichtung.

[zurück zum Anfang](#)

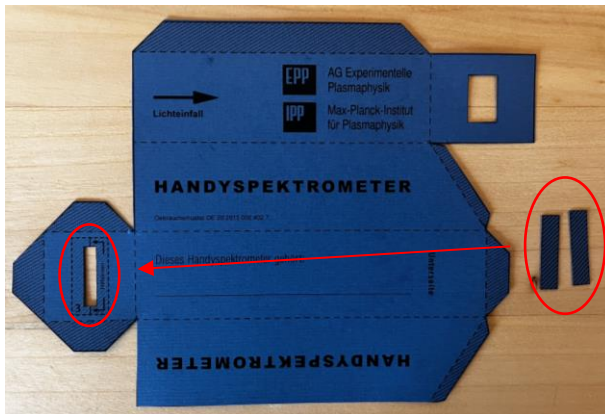


Abbildung 2: Gehäuse des Handyspektrometers und die beiden Rechtecke für den Eintrittsspalt (links), fertiges Spektrometer am Tablet (rechts). © Katharina Supp

- Schließe das Gehäuse, ohne es festzukleben. Richte das Spektrometer anschließend auf eine Lichtquelle und schaue hinein. Du solltest nun mehrere farbige Linien sehen, die parallel zueinander auf gleicher Höhe liegen. Falls du verschobene Linien siehst, muss du das Gitter durch vorsichtiges Drehen nachjustieren.
- Sobald alles richtig justiert ist, schließe das Gehäuse und klebe die offene Seite zu.

➔ **Aufsetzeinheit:**

- Schneide die Aufsetzeinheit 1 und die grau hinterlegte Aussparung mit dem Cutter-Messer aus.
- Klebe die Aufsetzeinheit auf das Handyspektrometer. Achte dabei darauf, dass das Gitter zu sehen bleibt.
- Befestige das Spektrometer mit einem Stück Isolierband am Smartphone oder Tablet. Richte dabei das Gitter so aus, dass es direkt vor der Kamera liegt und die Spektrallinien parallel zum Bildrand verlaufen.

## 2) Aufnahme verschiedener Lichtspektren



### **Materialien:**

- selbstgebautes Handyspektrometer
- verschiedene Lichtquellen, z.B. farbige LED, Glühlampe, Kerzenflamme, ...

### **Arbeitsauftrag:**

Befestige das Handyspektrometer an deinem Smartphone/Tablet. Öffne die Kamera. Zum Aufnehmen eines Lichtspektrums musst du den Eintrittsspalt zur Lichtquelle hin ausrichten. Auf dem Display des Smartphones/Tablets erscheint dann das Beugungsbild des Eintrittsspalts. Die verschiedenen Farben entsprechen den unterschiedlichen spektralen Anteilen der Lichtquelle. Je nach Helligkeit der Lichtquelle kannst du den Abstand zur Lichtquelle vergrößern oder verkleinern, damit das Spektrum nicht über- oder unterbelichtet wird. Bei besonders hellen Lichtquellen ist es auch möglich, das Streulicht an einer weißen Oberfläche zu untersuchen. Fotografiere auf diese Weise die Spektren der unterschiedlichen Lichtquellen.

## Absorptionslinien

Mittels des Arbeitsblatts „Lichtspektrum“ hast du gelernt, dass sich Licht durch Brechung oder Beugung in seine verschiedenen Wellenlängen zerlegen lässt. Mithilfe deines selbstgebauten Handyspektrografen hast du bereits das Spektrum einer Glühlampe und anderen Lichtquellen aufgenommen.

### Aufgaben:

#### 1) Aufnahme des Sonnenspektrums



Nimm mithilfe deines Handyspektrografen das Spektrum des Sonnenlichts auf.

*Tipp:* Nutze das Streulicht an einer weißen Oberfläche.

Vergleiche das Sonnenspektrum mit dem Spektrum der Glühlampe. Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede stellst du fest?

#### **Erklärung**

Die schwarzen Linien, die du im Sonnenspektrum beobachtest, sind die so genannten **Fraunhoferlinien**.

*Tipp:* Wenn du keine schwarzen Linien im Spektrum beobachten kannst, kann das an einem zu breiten Eintrittsspalt des Spektroskops liegen. Justiere in diesem Fall den Eintrittsspalt nach, bis du

#### Was sind Fraunhoferlinien und wie entstehen sie?



Vom unteren Rand der Sonnenatmosphäre strahlt die Sonne noch so ähnlich wie eine helle Glühlampe. Dieses Licht würde dementsprechend ein **kontinuierliches Spektrum** ganz ohne Linien ergeben. Die charakteristischen dunklen Linien entstehen erst in der Sonnenatmosphäre. Hier trifft das Licht aus dem Sonneninneren auf die Gasatome der Sonnenatmosphäre (vgl. Abb. 1).

Gemäß dem Bohrschen Atommodell umkreisen Elektronen ihren Atomkern auf diskreten Bahnen. Jede dieser Bahnen verfügt über ein fest definiertes Energieniveau, das von einem einzelnen Elektron besetzt werden kann. Ein Elektron auf einer höheren, weiter außen liegenden Bahn besetzt dabei ein höheres Energieniveau als ein Elektron auf einer niedrigeren Bahn. Trifft Licht auf die Atome, absorbieren die Elektronen bestimmte Wellenlängen des Lichts. Dabei gelangen sie von einem tieferen Energieniveau auf ein höheres. Die dafür benötigte Energiemenge entspricht einer festen Wellenlänge. Strahlung dieser Wellenlänge wird im Lichtspektrum reduziert und erscheint weniger hell als dunkle Linie (**Absorptionslinie**, vgl. Abb. 1). Zwar wird die gleiche Wellenlänge bei der so genannten Rekombination wieder abgegeben, jedoch in alle Richtungen, d.h. meist in eine andere Richtung und die Linie im Spektrum bleibt dunkel.

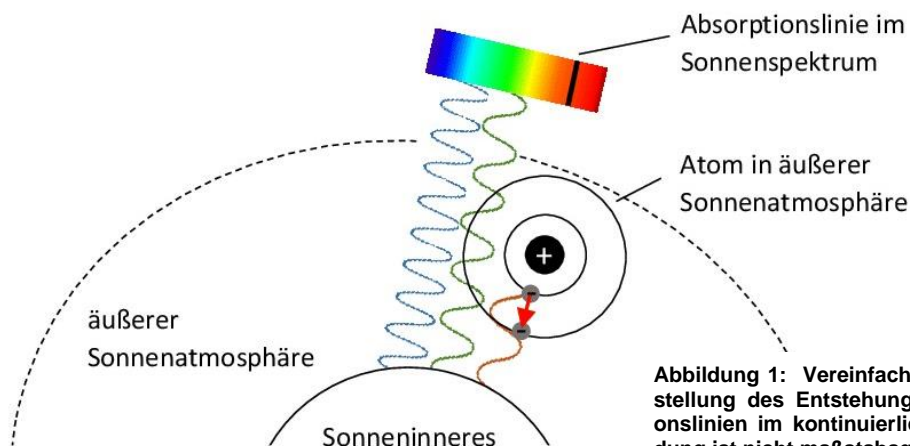


Abbildung 1: Vereinfachte und schematisierte Darstellung des Entstehungsprozesses von Absorptionslinien im kontinuierlichen Spektrum. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu. © Katharina Supp

[zurück zum Anfang](#)

**Joseph von Fraunhofer** hat insgesamt 574 mehr oder weniger intensive schwarze Linien im Sonnenspektrum entdeckt und genau vermessen. Ihm zu Ehren wurden die schwarzen Linien dann auch als Fraunhoferlinien bezeichnet. Das Spektrum in Abb. 2 stellt die auffälligsten Absorptionslinien im Sonnenspektrum dar. Die Bezeichnung mit Buchstaben stammt von Fraunhofer.

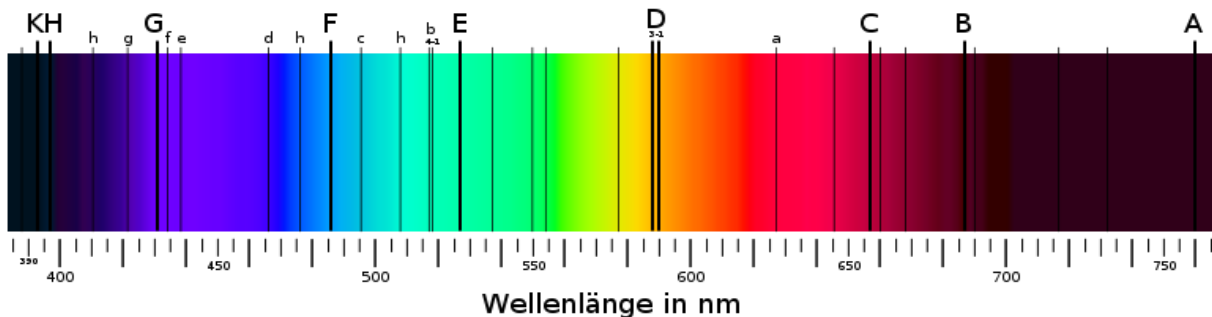


Abbildung 2: Die wichtigsten Fraunhoferlinien im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. © gemeinfrei

Später entdeckten die deutschen Physiker **Robert Bunsen** und **Gustav von Kirchhoff**, dass sich jede Absorptionslinie einem bestimmten chemischen Element zuordnen lässt. Die Absorptionslinien geben also Auskunft über die Gaszusammensetzung in der Sonnenatmosphäre und der Erdatmosphäre.

### Aufgaben:

2) *Untersuchung des Sonnenspektrums mit der [App ©LightSpectrumPro](#)*



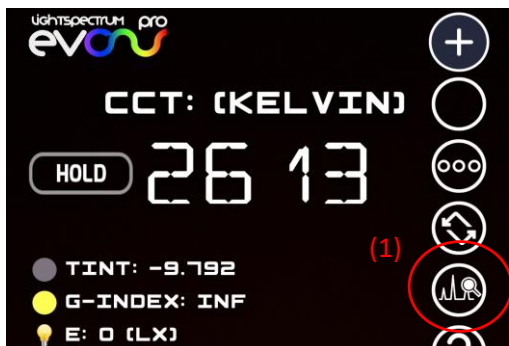
#### Materialien:

- Handyspektrometer
- Smartphone/Tablet
- Kompaktleuchtstofflampe

#### Arbeitsauftrag:

- Befestige das Handyspektrometer an deiner Handykamera.
- Bevor du das Sonnenspektrum genauer untersuchst, musst du den Handyspektrografen zunächst mithilfe einer **Kompaktleuchtstofflampe** kalibrieren. In dieser Art Lampen befindet sich eine spezielle Gasmischung, welche ein Spektrum mit vier charakteristischen Spektrallinien erzeugt. Diese Linien besitzen eine feste Wellenlänge und können deshalb zur **Kalibrierung** genutzt werden.

#### A: Kalibrierung:



- Öffne die App.
- Klicke auf Symbol (1) am rechten Bildschirmrand und anschließend im neuen Fenster unten auf (2) (vgl. Abb. 3).



Abbildung 3: Screenshot vom Symbolfenster der App ©LightSpectrumPro.



[zurück zum Anfang](#)

- Schalte die Kompaktleuchtstofflampe an und halte deinen Spektrografen in Richtung der Lichtquelle.

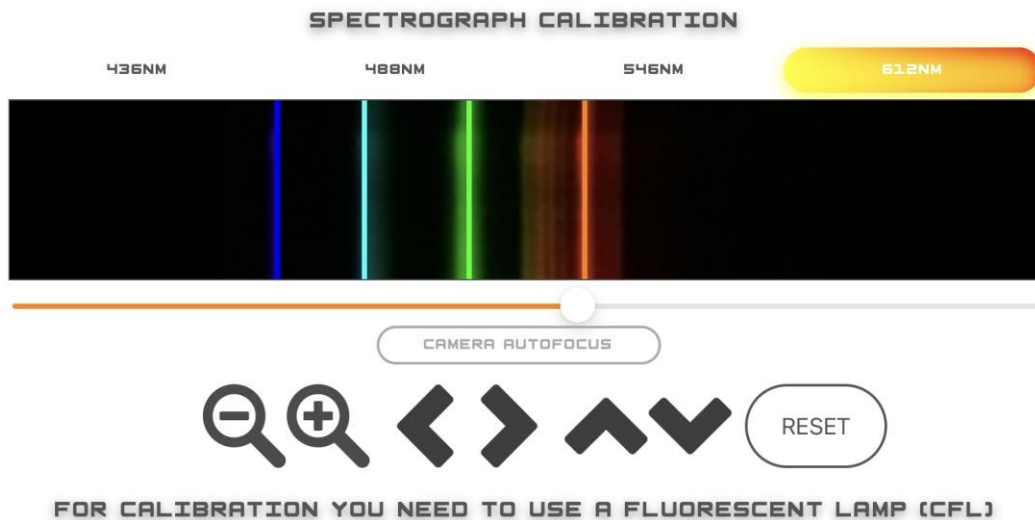


Abbildung 4: Ansicht zur Kalibrierung des Handyspektrografen in der App ©LightSpectrumPro.

- Du siehst jetzt die charakteristischen Spektrallinien der Lampe. Benutze die (+) und (-) Symbole sowie die Pfeile, um das Spektrum gut sichtbar in die Mitte des Sichtfensters zu rücken (vgl. Abb. 4).
- Wähle nacheinander die vorgegebenen Referenzlinien (436 nm, 488 nm, 546 nm, 612 nm) aus und positioniere sie an der Stelle, an der du die Spektrallinien der Lampe siehst (vgl. Abb. 4).
- Wenn alle Referenzlinien richtig positioniert sind, musst du nur noch auf „save“ klicken. Du hast nun einen kalibrierten Handyspektrografen, mit dem du u.a. die Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum untersuchen kannst.

### ***B: Untersuchung des Sonnenspektrums***

- Nimm jetzt mit der App das Spektrum des Sonnenlichts auf. Speichere das Spektrum, indem du auf (3) klickst.
- Untersuche dein gespeichertes Sonnenspektrum. Klicke dafür auf (4) und wähle durch Klicken auf das Ordnersymbole deine abgespeicherte Datei auf.
- Unter dem fotografierten Spektrum siehst du einen Grafen, der die Intensität (= Stärke) der einzelnen Wellenlängen anzeigt. Die dunklen Absorptionslinien bedeuten einen Einbruch der Intensität bei einer bestimmten Wellenlänge. Suche die Intensitätsminima und bestimme jeweils die Wellenlänge.
- Identifiziere die Absorptionslinien mithilfe von Tab. 1. Trage deine Werte in die dritte Spalte der Tabelle.
- Recherchiere im Internet, welches Element sich jeweils zu den Fraunhoferlinien in Tab. 1 zurechnen lässt und ergänze die vierte Spalte der Tabelle.

Name Fraunhoferlinie	Literaturwert	Wert mit ©LightSpectrumPro	Element
G	430		
F	486		
E	572		
D1/D2	590/589		
C	656		

Tabelle 1: Übersicht über die wichtigsten Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum.

## Radialgeschwindigkeit

Betrachtet man ein Planetensystem – zur einfacheren Darstellung bestehend aus einem Planeten (P) und einem Stern (S) (vgl. Abb. 1) – genauer, stellt man fest, dass sowohl der Planet als auch der Stern um einen gemeinsamen **Schwerpunkt** kreisen. Erklären lässt sich das mit dem **Gravitationsgesetz**. Demnach üben alle Körper aufgrund ihrer Masse aufeinander anziehende Kräfte aus – die **Gravitationskräfte**. Dabei ist die Gravitationskraft umso größer, je größer die Masse der Objekte und je kleiner ihr Abstand zueinander sind. Bezogen auf das Planetensystem bedeutet das, dass nicht nur der Stern eine Gravitationskraft auf den Planeten ausübt, sondern umgekehrt auch der Planet eine Gravitationskraft auf den Stern. Die Gravitationskräfte wirken hierbei jeweils als **Zentralkraft**, die sowohl den Planeten als auch den zentralen Stern auf ihrer Bahn um den gemeinsamen Schwerpunkt hält.

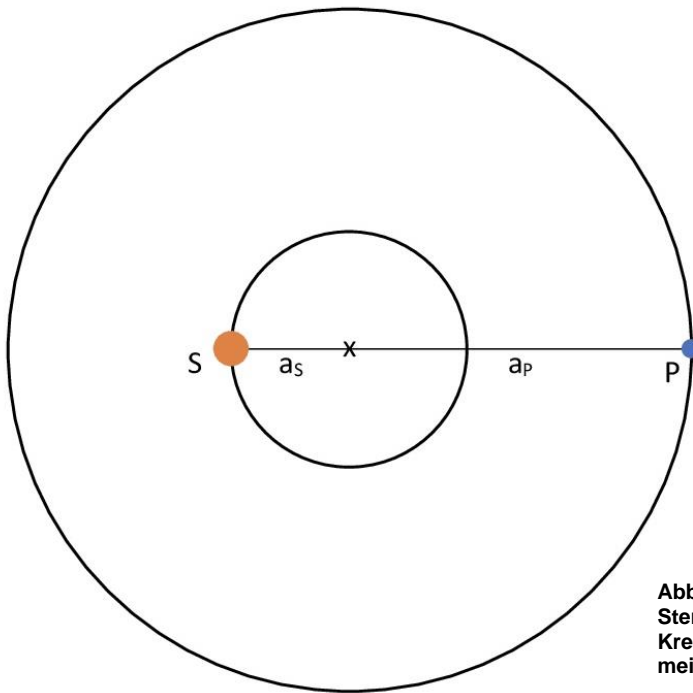


Abbildung 1: Schematische Darstellung von einem Stern (S) und einem Planeten (P), die sich in einer Kreisbahn mit dem Radius  $a_s$  und  $a_p$  um den gemeinsamen Schwerpunkt drehen. © Katharina Supp

### Aufgaben:

#### 1) Modell zur Radialgeschwindigkeit



#### Materialien:

- Styropor-Modell „Stern mit Planet“
- weitere Styroporkugeln
- Stoppuhr

#### Arbeitsauftrag:

- Vor dir liegt das Styropor-Modell von einem Stern (S), der durch einen Holzstab in festem Abstand mit seinem Planeten (P) verbunden ist. Hänge das System an einem Faden auf und finde den gemeinsamen Schwerpunkt, bei dem sich „Stern“ und „Planet“ im Gleichgewicht befinden. Miss die Strecken  $a_s$  und  $a_p$ .
- Versetze das aufgehängte System jetzt in eine Drehbewegung. Miss mit der Stoppuhr die Umlaufdauern vom „Stern“ ( $T_s$ ) und vom „Planet“ ( $T_p$ ). Was stellst du fest?
- Variiere die Masse des „Planetens“, indem du die leichtere Styropor-Kugel P mit  $P_2$  bzw.  $P_3$  austauschst. Bestimme erneut den gemeinsamen Schwerpunkt und miss  $a_s$  und  $a_p$ . Was stellst du fest?

[zurück zum Anfang](#)

**d)** Informiere dich online über das „**Hebelgesetz**“.

Erkläre deine Beobachtungen zum Radius der Umlaufbahnen  $a_S$  und  $a_P$  mithilfe des Hebelgesetzes.

**e)** Exoplaneten sind i.d.R. zu klein, um mit einem Teleskop direkt beobachtet zu werden.

Bei der **Radialgeschwindigkeitsmethode** wird deshalb ein Exoplanet aufgrund der **Bewegung seines Zentralsterns** nachgewiesen. Erkläre mithilfe deines hier erarbeiteten Wissens, warum mit dieser Methode vor allem sehr massereiche, sternnahe Exoplaneten nachgewiesen werden.

**f)** Drehe das Modell erneut. Gehe dabei mit deinen Augen auf eine Ebene mit den beiden drehenden Kugeln. Du kannst beobachten, dass sich die beiden Kugeln regelmäßig von dir weg und wieder zu dir hinbewegen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Objekte auf dich zu bzw. von dir wegbewegen, bezeichnet man als **Radialgeschwindigkeit**.

Dabei ist die Radialgeschwindigkeit immer nur die Komponente der Bahngeschwindigkeit, die direkt zum Beobachter zeigt. Eine positive Radialgeschwindigkeit bedeutet, dass sich das Objekt von dir entfernt, eine negative, dass es sich dir nähert.

**2)** Bestimme die Radialgeschwindigkeit folgender Sternposition (Abb. 2). **Zerlege** dazu den Vektorpfeil, der die Bahngeschwindigkeit darstellt, in zwei Komponenten – eine zum Beobachter hin und eine senkrecht dazu. Miss mit deinem Geodreieck die Länge der ersten Komponente.

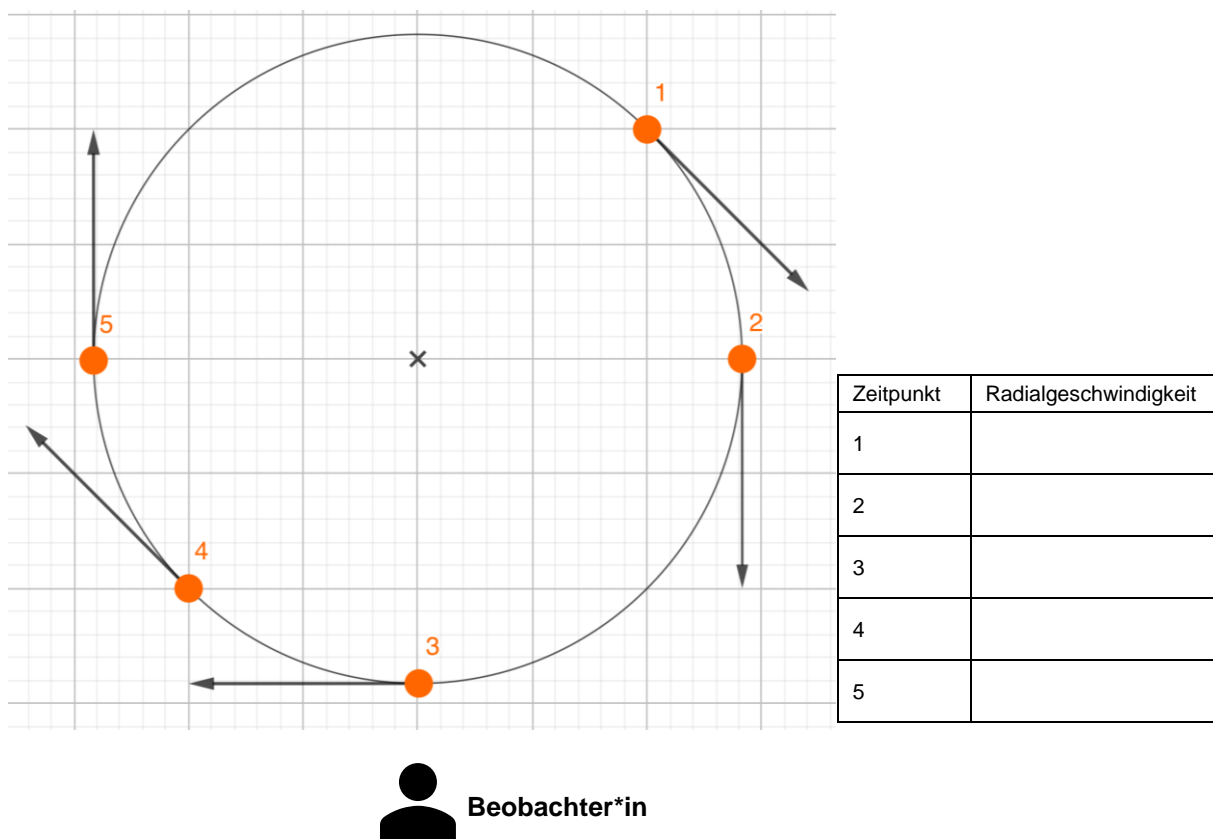


Abbildung 2: Die Pfeile in der Abbildung stellen die Bahngeschwindigkeit eines Sterns zu fünf Zeitpunkten bei der Kreisbewegung um einen Schwerpunkt dar. Durch Vektorzerlegung wird daraus jeweils die Radialgeschwindigkeitskomponente bestimmt (in Tabelle rechts eintragen, in der Einheit ‚Kästchen‘). © Katharina Supp

## Doppler-Effekt

Vom AB „Radialgeschwindigkeit“ weißt du: Ein Planet, der sich um einen Stern dreht, übt auch eine Gravitationskraft auf seinen Stern aus. Diese Gravitationskraft wirkt als Zentralkraft, die den Stern ebenfalls zu einer Kreisbewegung zwingt. Befindet sich das System aus Beobachter, Stern und Planet auf einer Ebene, sieht es für den Beobachter so aus, als bewege sich der Stern periodisch auf ihn zu und wieder von ihm weg.

Wenn sich nun ein Stern aufgrund seiner Drehbewegung auf den Beobachter zubewegt, werden die

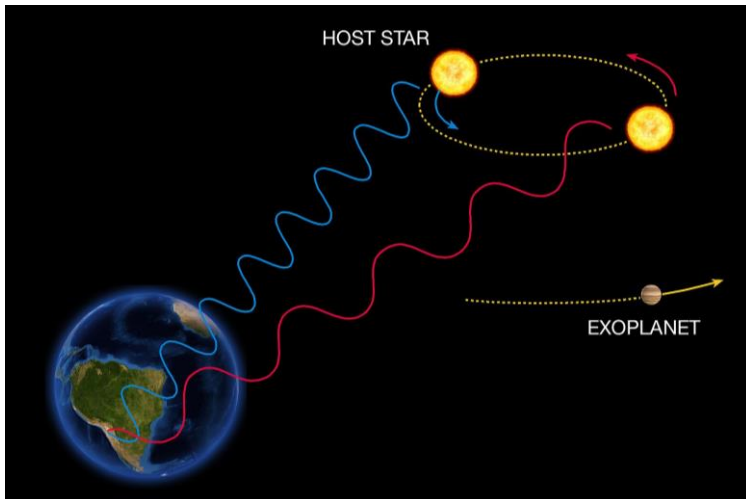


Abbildung 1: Schematische Darstellung des optischen Doppler-Effekts  
© ESO CC BY 4.0, <https://www.eso.org/public/images/eso0722e/>.

Lichtwellen, die von ihm ausgehen, gestaucht. Dadurch werden die Wellenlängen kleiner und damit „blauer“. Entfernt sich der Stern dann wieder von der Erde, werden die Wellenlängen größer und damit insgesamt „röter“. Man bezeichnet diesen Effekt als **Doppler-Effekt**.

Der Doppler-Effekt tritt nicht nur in der Optik, sondern auch in der Akustik auf. Beim akustischen Doppler-Effekt werden statt Lichtwellen Schallwellen gestaucht bzw. gestreckt. In der Folge soll der akustische Doppler-Effekt als Analogieversuch für den optischen Doppler-Effekt untersucht werden.

### Aufgaben:

1) Fasse in eigenen Worten zusammen, was man unter dem Doppler-Effekt versteht. Warum lassen sich damit Exoplaneten, die um einen Zentralstern kreisen, nachweisen?

2) *Akustischer Doppler-Effekt* 

#### Materialien:

- 2 Smartphones oder Tablets
- App ©Phyphox
- Drehteller mit Halterung aus Stativstangen und Klemmen



Abbildung 2: Versuchsaufbau zum Versuch „Akustischer Doppler-Effekt“. © Katharina Supp

[zurück zum Anfang](#)

**Arbeitsauftrag:**

**a)** Öffne auf einem der beiden Smartphones/Tablets die App ©Phyphox. Wähle den **Tongenerator** und stelle die Frequenz 1000 Hz ein. Positioniere dich direkt vor dem Smartphone/Tablet. Starte den Tongenerator und beginne den Drehteller mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit zu drehen. Beschreibe, was du wahrnimmst.

**b)** Variiere die Drehgeschwindigkeit und den Radius der Kreisbahn (Vor- und Zurückschieben der Stativstange). Beschreibe, welche Veränderungen du wahrnimmst.

**c)** Untersuche den Doppler-Effekt jetzt quantitativ mit der App ©Phyphox.

Öffne dafür auf dem zweiten Smartphone/Tablet ©Phyphox. Wähle den Versuch **Doppler-Effekt** und übernahm im Einstellungsfenster folgende Einstellungen:

<b>Frequenz</b>	1000 Hz
<b>Frequenzspanne</b>	10 Hz
<b>Zeitintervall</b>	50 ms
<b>Schallgeschwindigkeit</b>	340 m/s

Aktiviere durch Klicken auf die drei Punkte im oberen rechten Bildschirmck die **Zeitautomatik**, um den Anlauf des Versuchs nicht aufnehmen zu müssen. Stelle das Smartphone/Tablet anschließend sicher auf. Achte dabei darauf, dass sich beide Geräte auf gleicher Höhe befinden (vgl. Abb. 2).

Starte den Tongenerator und den Versuch „Doppler-Effekt“ und beginne damit, den Drehteller mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit zu drehen. Dabei wird ein ähnlicher Graph wie in Abb. 3 erstellt.

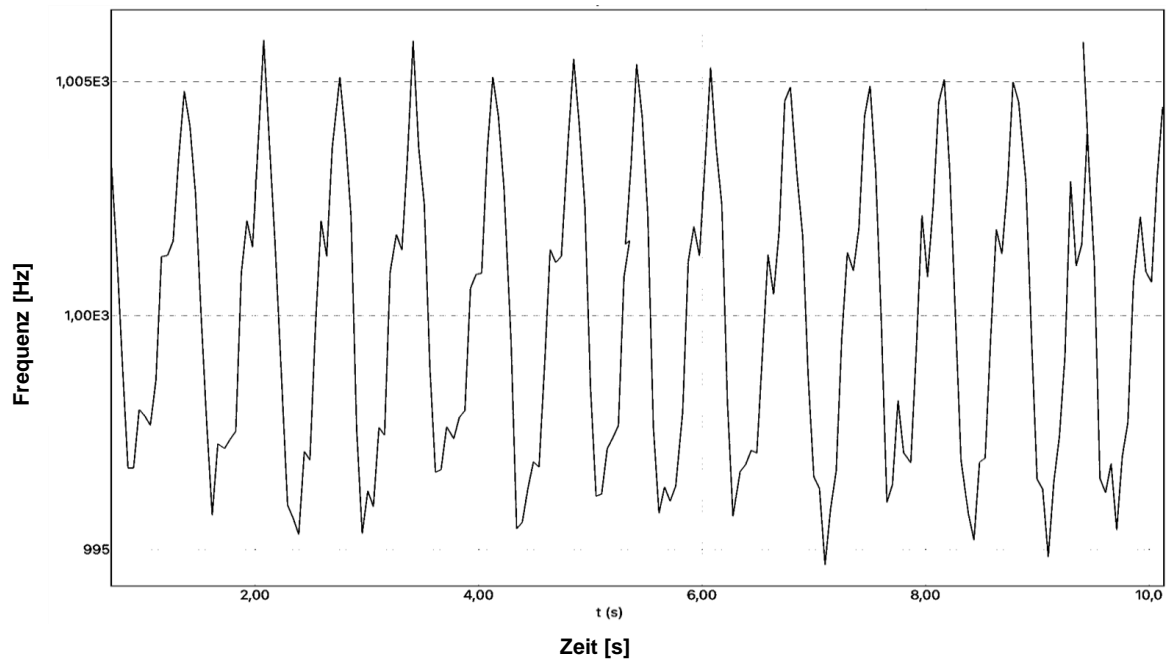


Abbildung 3: Ergebnisse vom Versuch „Akustischer Dopplereffekt“, erstellt in der App ©Phyphox. © Katharina Supp

- d)** Markiere in Abb. 3 die Bereiche, in denen sich die Schallquelle vom Detektor wegbewegt (rot) bzw. auf ihn zubewegt (blau).
- e)** Astronom\*innen erhalten ähnliche Graphen, wenn sie einen Stern mit einem Exoplaneten untersuchen. Überlege dir, wie man aus so einem Graphen die Umlaufzeit des Planeten bestimmen kann.
- f)** Bestimme die Umlaufzeit aus deinem Graphen.
- g)** Welche Schlussfolgerungen darüber, wie erdähnlich bzw. habitabel ein Exoplanet ist, könnten Astronomen aus der Umlaufzeit ableiten?



[zurück zum Anfang](#)

## Quellen

- Borchardt, Matthias: Die Radialgeschwindigkeitsmethode. In: Lindau Nobel Laureate Meetings 2021, <https://www.mediatheque.lindau-nobel.org/files/39492> (zuletzt aufgerufen am 14.08.2023).
- Christian Doppler Fonds: Demonstrationsexperiment zum Doppler-Effekt: Phyphox, <https://www.christian-doppler.net/demonstrationsexperimente-zum-doppler-effekt-phyphox/> (zuletzt aufgerufen am 14.08.2023).
- Joachim Herz Stiftung: LEIFIphysik, Spektralfarben, <https://www.leifiphysik.de/optik/farben/grundwissen/spektralfarben> (zuletzt aufgerufen am 14.08.2023).
- Joachim Herz Stiftung: LEIFIphysik, Joseph von Fraunhofer, <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomarer-energieaustausch/geschichte/joseph-von-fraunhofer-1787-1826> (zuletzt aufgerufen am 14.08.2023).
- Müller, Marina: Handyspektrometer für den Unterrichtseinsatz. Zulassungsarbeit, [https://www.ipp.mpg.de/4071259/ZuLa\\_Mueller.pdf](https://www.ipp.mpg.de/4071259/ZuLa_Mueller.pdf) (zuletzt aufgerufen am 14.08.2023).
- Rapp, Thomas: Rapp Instruments. Physikalische, chemische und elektronische Experimente, Spektralfotografie, <https://www.rapp-instruments.de/foto/spectrum/spectrum.htm> (zuletzt aufgerufen am 14.08.2023).

## Apps

- ©Phyphox:  
<https://phyphox.org/de/home-de/>
- ©LightSpectrumPro:  
<https://apps.apple.com/de/app/lightspectrum-pro/id468368751> (App Store)  
<https://play.google.com/store/apps/details?id=it.ampowersoftware.lightspectrumevo&hl=de&gl=US&pli=1> (Google Play Store)

Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden Sie unter der Adresse [www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de) (Fachgebiet Astronomie). Wir würden uns freuen, wenn Sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise, Kriterien und Bewertungen an die Kontaktadresse der Autorin ([supp@nkg-mosbach.de](mailto:supp@nkg-mosbach.de)) senden könnten.