

Himmliche Spektren im Physikunterricht der Klasse 10

In Bezug zum Artikel „Jupitermond Io in Aktion“ in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ 03/2024, Rubrik „Nachrichten“, *Brennpunkt 2301*, Zielgruppe: Mittelstufe – Oberstufe, WIS-ID: 1571236

Thomas Jahre, ehemals Lehrer am Chemnitzer Schulmodell – www.schulmodell.eu

Als „Aufhänger“ dieses WIS-Beitrags dient eine Nachricht aus SuW (siehe oben), die vom Auffinden von Schwefelmonoxid (SO) in der Atmosphäre des Jupitermonds Io berichtet. Voraussetzung dafür war ein Spektrum, das im IR-Bereich des von Io kommenden Lichts aufgenommen wurde.

Vorgestellt wird eine Abfolge von Experimenten und Veranschaulichungen, die dabei helfen können, innerhalb von kurzer Zeit (zwei Schulstunden) dem Schüler plausibel zu machen, wie die Astronomen allein aus dem Licht, dass diese von Io sammeln, auf die Existenz von SO schließen. Grundlage ist der Physiklehrplan für Oberschulen in Sachsen (siehe Anhang).

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Kleinkörper, Astropraxis, Astronomiegeschichte	Jupitermond Io , Spektrum der Io-Atmosphäre, Spektralanalyse, Fraunhoferlinien , Geschichte der Astrospektroskopie
Physik	Optik, Quantenphysik	Geometrische Optik , Emissionsspektrum, Emissionslinien, Absorptionsspektrum, Absorptionslinien, Spektren, Atomhülle
Fächer- verknüpfung	Astro - Chemie	Chemische Zusammensetzung der Gesterne , Schwefelmonoxid , Schwefeldioxid, Aufbau der Atomhülle , Schalenmodell
Lehre allgemein	Erkenntniskompetenz, Unterrichtsmittel	Experimente zum Thema Spektrenerzeugung, Freihandexperimente , Unterrichtsplanung

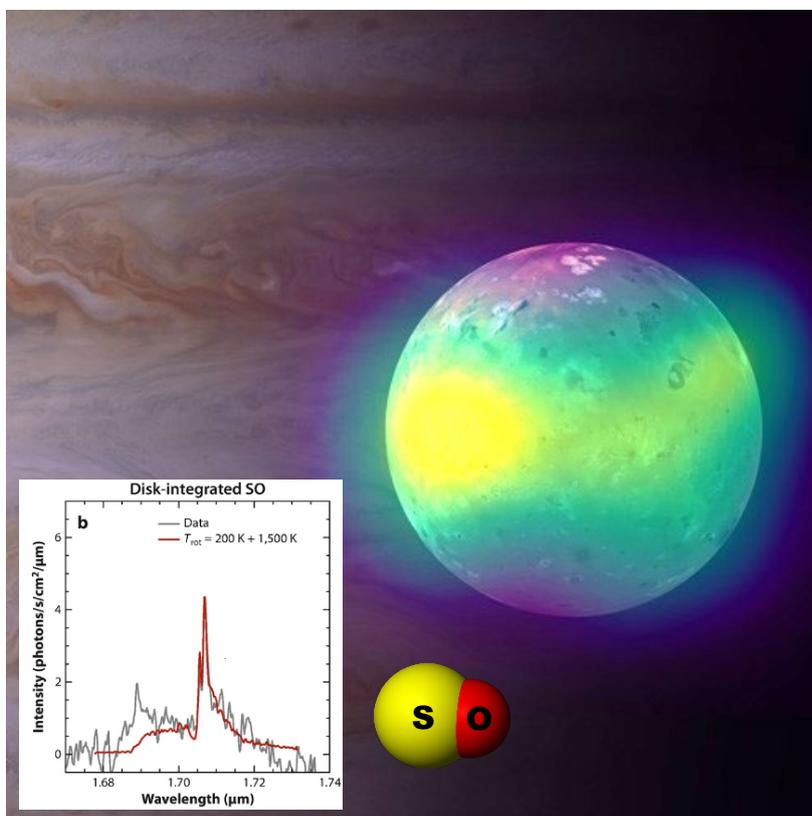


Abbildung 1: Kompositbild von Io vor Jupiter. Die dünne Io-Atmosphäre besteht vor allem aus SO₂. Kurzzeitig sind auch Spuren von SO nachweisbar (siehe Einschubbild links unten).

Das Spektrum links unten zeigt die im SuW-Beitrag erwähnte Emissionslinie bei einer Wellenlänge von 1,707 µm.

Rechts vom Spektrum wird eine in der Chemie übliche Darstellung für das Schwefelmonoxid-Molekül gezeigt.

©: Kompositbild:

ALMA (ESO/ NAOJ/ NRAO)/ I. de Pater et al./ NRAO/ AUI NSF/ S. Dagnello/ NASA/ ESA/ UC Berkeley.

©: Einschubbild Spektrum:

de Pater, I., de Kleer, K., Adámkovic, M.: High spatial and spectral resolution observations of the forbidden 1.707 µm Rovibronic SO emissions on Io: Evidence for widespread stealth volcanism. *Planet. Sci. J.* 1 (2020a).

©: Einschubbild Moldekül: Benjah-bmm27.

Zielstellung

[\[zurück zum Anfang\]](#)

Zu vermitteln ist der Zusammenhang: Licht - Spektrum (Emissionsspektrum, Absorptionsspektrum) - Spektralanalyse - Erkenntnisse zur chemischen Zusammensetzung von Gestirnen (hier der Io-Atmosphäre) und zum physikalischen Zustand (z. B. die Oberflächentemperatur der Sterne, siehe Abb. 2).

Dafür ist eine **Unterrichtseinheit von 90 Minuten** vorgesehen.

Vorbemerkung: Da es sich um ein Angebot für Schüler einer 10. oder auch 9. Klasse handelt, basiert der Inhalt nicht auf den neuesten – quantenphysikalischen – Betrachtungen. Diese sollten natürlich Erwähnung finden, können aber auf Grund der fehlenden mathematischen Grundlagen nicht wirklich umgesetzt werden.

Weg

Anhand einer Abfolge von Versuchen und veranschaulichten Versuchsergebnissen sollen die Schülern ausgehend von Grundideen vom Licht (Ausgangspunkt geometrische Optik) auf plausible Art und Weise bis zur Entstehung von Emissionslinien (Wellenoptik) geführt werden.

Anknüpfungspunkt

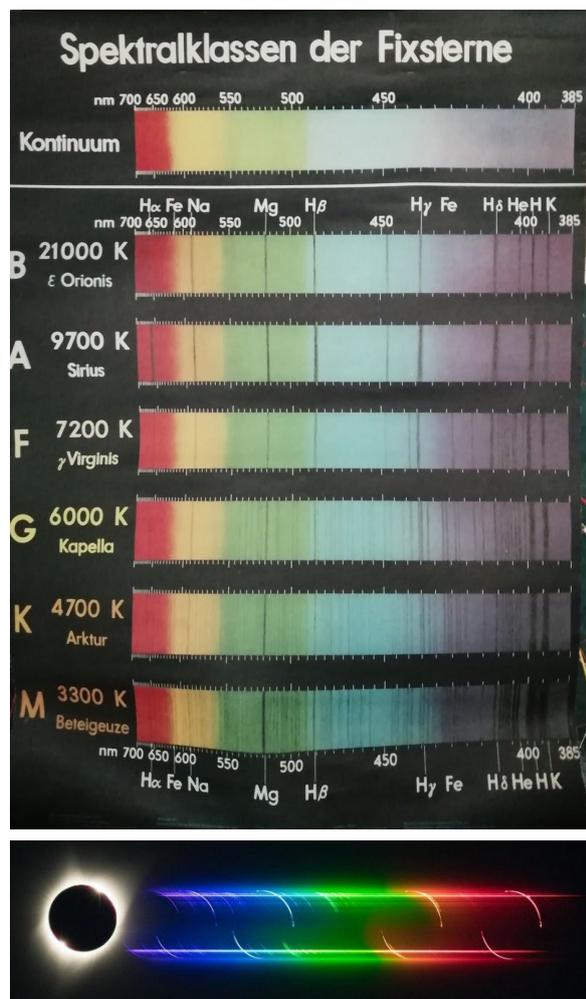


Abbildung 2: Oben: Absorptionsspektren verschiedener Sterntypen auf einem Rollbild für den Unterricht. Unten: Emissionslinienspektrum der Sonne, das bei einer Sonnenfinsternis beobachtbar ist.
©: Yujing Qin, Univ. of Arizona.

Bereits in Klasse 9 oder 10 (in Sachsen) kann den Schülern im Teilgebiet Astronomie des Physikunterrichts (siehe auch Anhang) im Rahmen des Themas ‚Hertzsprung-Russell-Diagramm‘ das in Abb. 2 oben ersichtliche Bild gezeigt werden. Das Bild zeigt die Spektralklassen der Fixsterne anhand ihrer Absorptionsspektren. Das untere Bild in Abb. 2 soll zeigen, dass es auch Spektrallinien gibt, die „positiv herausstechen“, d. h. in Emission sichtbar sind.

Die Entstehung eines Prismen-Spektrums ist den Schülern aus der geometrischen Optik bekannt. Auf die Entstehung eines Gitter-Spektrums selbst wird meist nicht weiter eingegangen. (Bei der Reduzierung von 30 Stunden Astronomie als eigenständiges Fach auf 14 Stunden als Teilgebiet der Physik ist das auch nicht verwunderlich.)

Ebenfalls in Klasse 9 werden den Schülern Kenntnisse zu mechanischen Schwingungen vermittelt, auf denen aufgebaut werden kann. Im Physikunterricht der Klasse 10 gibt es einen Lernbereich zu mechanischen und Hertzschen Wellen.

Die Kenntnisse zu mechanischen Wellen ermöglichen Analogiebetrachtungen, um die Wellennatur des Lichts zu verstehen und die Entstehung von Gitter-Spektren nachzuvollziehen.

1. Versuche zur Wiederholung – geometrische Optik

[\[zurück zum Anfang\]](#)

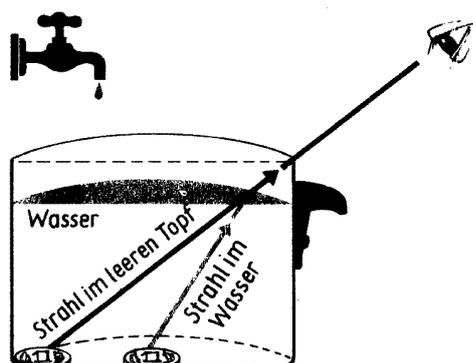


Abbildung 3: Motivation zum Thema Lichtbrechung. ©: aus Backe, H., Backe, R., Giegenack, H.: Erlebte Physik, Urania_Verlag, Leipzig, 1990

Eine Glühlampe gibt ihr Licht nach allen Seiten ab. Geradlinige Begrenzung eines Schattens bzw. Licht eines Lasers dienen als Nachweis der **geradlinigen Ausbreitung**.

Mit einem einfachen Versuchsaufbau (Winkelmesser, ebener Spiegel, Experimentierleuchte) wird ein Versuch aus Klasse 6 zur **Reflexion** des Lichts wiederholt. Die notwendigen Experimentiergeräte gibt es an jeder Schule. Das nebenstehende **Freihandexperiment** (Abb. 3) ist geeignet, um **Brechung** des Lichts zu demonstrieren.

2. Versuche zur Spektrententstehung nach Brechung – noch Strahlenoptik

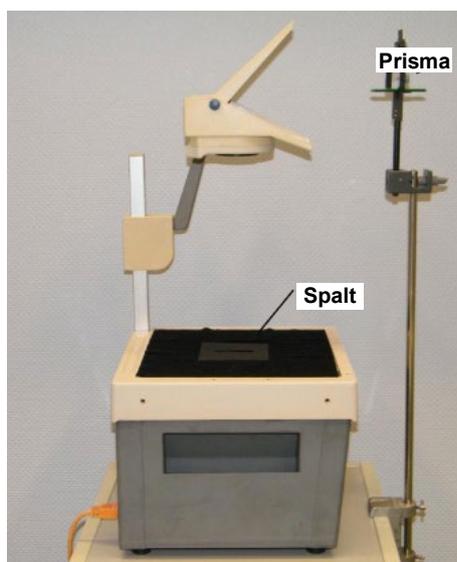


Abbildung 4: Einfacher versuch zur Demonstration eines Spektrums. ©: [9]

Die Untersuchung der Brechung am Prisma zeigt zudem, dass weißes Licht in ein kontinuierliches Spektrum zerlegt werden kann. Dabei wird rotes Licht weniger stark gebrochen als blaues Licht. Ein einfaches Schulexperiment dazu wird in Abb. 4 gezeigt.

Ein schönes **Freihandexperiment** zu den „Regenbogenfarben“ lässt sich einfach realisieren. In eine flache Schale wird etwas Wasser eingefüllt und an deren Rand ein Spiegel gelegt. Nun einfach die Lampe eines Handys auf den Spiegel richten und ein Spektrum erscheint. Es wird hierbei die Brechung des Lichts beim Übergang von Luft ins Wasser und vom Wasser in die Luft genutzt.

3. Versuche zur Akustik zum analogen Übergang zur Wellenvorstellung

Um zum optischen Gitter als Hilfsmittel zur Spektralzerlegung zu kommen, bedarf es den Übergang vom Strahlenmodell zum Wellenmodell für das Licht, den nur dieses erklärt auch die Phänomene Beugung und Interferenz, die beim Gitter eine Rolle spielen.

Zur Einführung von Beugung und Reflexion eignen sich Schallwellen sehr gut, weil die genannten Phänomene dort relativ einfach nachweisbar sind. So kann jemand, der außerhalb eines Raumes neben einer offenen Tür oder einem offenen Fenster steht, das im Raum Gesprochene hören. Das bedeutet, dass der Schall den eigentlich abgeschirmten Bereich erreicht – in diesen hinein gebeugt wird. Für den Nachweis der Interferenz bieten sich zwei leicht zu realisierende Versuche an. Zum einen schlägt man zwei Stimmgabeln an, deren Frequenzen sich geringfügig unterscheiden. Das Ergebnis ist ein auf- und abschwellender Ton (siehe Abb. 5).

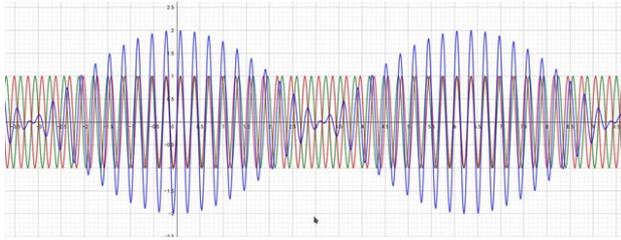
[\[zurück zum Anfang\]](#)


Abbildung 5: Simulation einer Schwebung, die entsteht, wenn sich die Schallwellen zweier Stimmgabeln mit leicht verschiedenen Frequenzen (grüne und rote Sinuskurve) überlagern. ©: Thomas Jahre, erstellt mit GeoGebra.

Eine zweite Möglichkeit des Nachweises der Interferenz besteht darin, dass zwei Stimmgabeln mit gleicher Frequenz angeschlagen werden. Ein Schüler, die vor den Stimmgabeln entlanggeht, kommt dann an Stellen von Verstärkung und Abschwächung vorbei, einem typischen Merkmal der Welleneigenschaft Interferenz.

4. Versuch zur Wellenoptik - Hinführung zum Gitterspektrum

Um nun die Beugung und Interferenz beim Licht nachzuweisen, sind Experimente notwendig, die berücksichtigen, dass die Wellenlänge des Licht sehr klein ist. Mit den an den Schulen vorhandenen Mitteln ist das gut möglich und wird im Folgenden aufgezeigt. Für Formeln und Berechnungen wird auf den WIS-Artikel vom Oktober 2020 verwiesen [1].

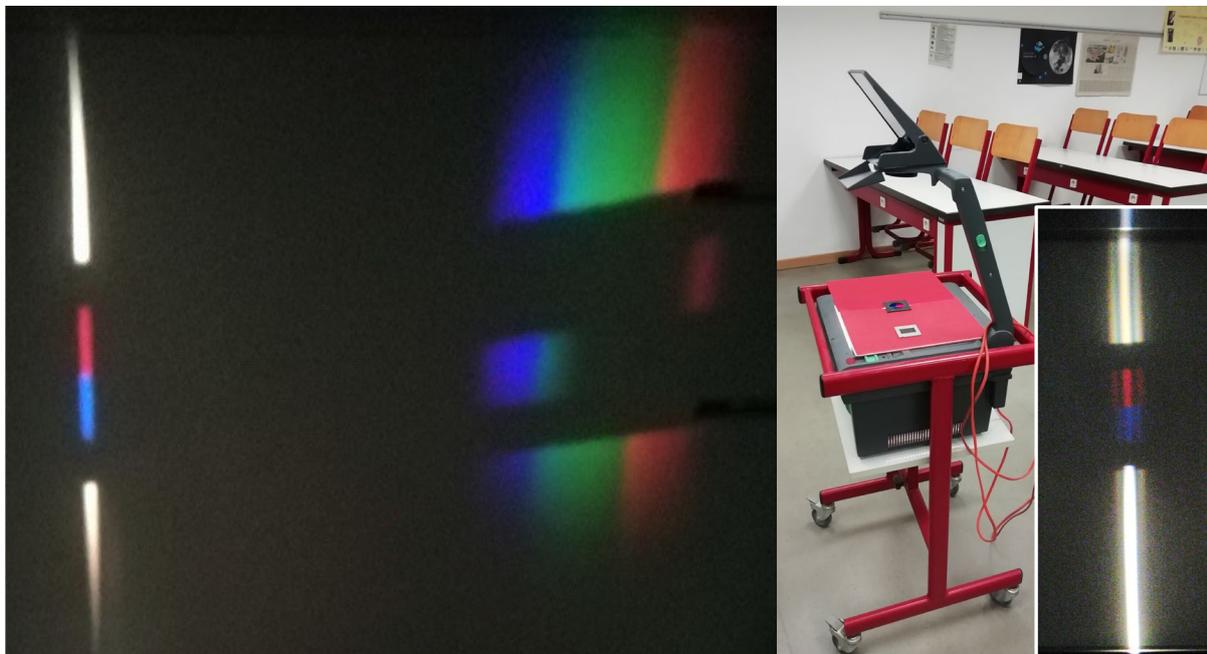


Abbildung 6: Der Lichtbereich des Overheadprojektors wird bis auf einen schmalen Bereich abgeblendet. Auf diesen Bereich wird ein Rot-Blau-Dia gelegt. Das linke Bild zeigt das projizierte Resultat, wenn über das Dia noch das Gitter gelegt wird. Beim Gitter entstehen Spektren verschiedener Ordnungen. Hier zu sehen sind nur die nullte (nicht spektral zerlegte) Ordnung und die erste Ordnung rechts von der nullten Ordnung. ©: Thomas Jahre.

Abb. 6 zeigt einen einfachen Versuch zum Nachweis von Beugung und Interferenz zunächst an einem Einfachspalt in der Pappblende (Einschubbild rechts) und dann links für einen Vielfachspalt (Gitter). Bei Nutzung des Einfachspalts wird deutlich, dass das Licht ein eigentlich abgeschirmtes Gebiet erreicht – Merkmal der Beugung. Die hellen und dunklen Streifen weisen auf die Interferenz hin – Minima und Maxima. Der Abstand für rotes Licht ist größer als der für blaues Licht. Es ist also erkennbar, dass die Beugung von rotem Licht stärker ist als die von blauem Licht. Zudem ist schon beim Einzelspalt erkennbar, dass das weiße Licht durch die Beugung in Farben zerlegt worden ist.

Noch deutlicher werden Beugung und Interferenz bei Verwendung eines Reflexionsgitters. (Abb. 5) Dieses hat 650 Spalten (beim Gitter als Linien bezeichnet) pro mm – es entstehen gut auswertbare Spektren.

4. Versuch: Emissionslinienspektrum

[\[zurück zum Anfang\]](#)

Mit dem folgenden Versuchsaufbau (Abb. 7) wird die Entstehung von Emissionsspektren gezeigt. Benutzt werden ein Tesla-Transformator, verschiedene Geißlersche Röhren und das Reflexionsgitter aus dem vorhergehenden Versuch.

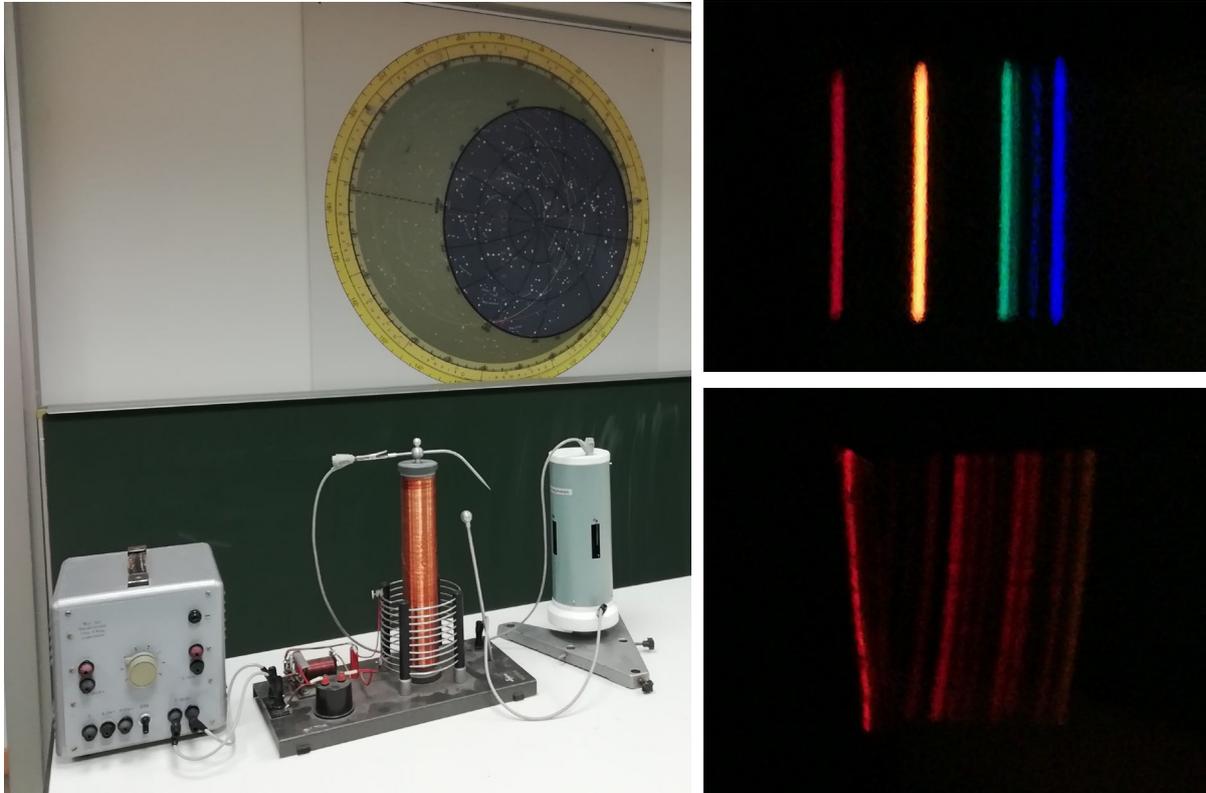


Abbildung 7: Um die für die Röhren notwendige Hochspannung zu erreichen, lässt sich auch ein Funkeninduktor verwenden. Nach der Inbetriebnahme der Geißlerschen Röhren wird das entstehende Licht mit dem Reflexionsgitter angeschaut und auch mit dem Handy fotografiert. Die rechts nebenstehenden Bilder zeigen die Emissionsspektrum von Neon (oben) und Wasserstoffs (unten). ©: Thomas Jahre.

Wenn Zeit ist, könnte man mit den Schülern Spektrometer basteln, mit denen man Spektren mit dem Handy aufnehmen kann (siehe [3]).

Abschließend kann man mit den Schülern die Entstehung eines solchen Linienspektrums besprechen. Die Schüler kennen aus dem Chemieunterricht den Aufbau der **Atomhülle**. Das zugrundeliegende Modell ist das Schalenmodell (siehe [4], auch im Anhang), wobei in der Schule das Modell von Niels Bohr thematisiert wird. Dazu das folgende Zitat [5]:

„Nach dem Rutherford'schen Atommodell von 1911 besteht ein Atom aus einem positiv geladenen, sehr kleinen und schweren Atomkern, der von einer Anzahl Elektronen umgeben ist. An diese Vorstellung knüpfte Bohr an. Er untersuchte die periodische Umlaufbewegung eines einzigen Elektrons, wie sie sich aus den Formeln der klassischen Mechanik ergibt, wenn die Kraft zwischen Kern und Elektronen von der elektrostatischen Anziehung herrührt. Um dieses Modell an die beobachteten Eigenschaften des Wasserstoffatoms anzupassen, erweiterte er es um drei Postulate:

1. Dem Elektron stehen nicht alle klassisch möglichen Bahnen zur Verfügung, sondern nur bestimmte ausgewählte von ihnen. Auf diesen Bahnen erzeugt es keine elektromagnetische Strahlung, sondern behält seine Energie. Dies sind die stationären Zustände des Atoms.
2. Das Elektron kann von einem stationären Zustand in einen anderen springen. Dieser als Quantensprung bezeichnete Vorgang liegt außerhalb des Gültigkeitsbereichs der klassischen Mechanik und der Elektrodynamik. Beim Quantensprung zwischen stationären Zuständen mit verschiedener Energie, den Energieniveaus, wird elektromagnetische Strahlung emittiert oder absorbiert. Dabei wird die Frequenz f der Strahlung nicht durch die Umlauffrequenz des Elektrons bestimmt, sondern ausschließlich durch die Energiedifferenz ΔE der beiden Zustände nach der von Max Planck für die Wärmestrahlung entdeckten Formel $\Delta E = h \cdot f$.
3. Die Frequenz der erzeugten oder absorbierten Strahlung nähert sich der Umlauffrequenz des Elektrons an, wenn sich das Elektron im Anfangszustand nur langsam bewegt und in den energetisch nächstgelegenen Zustand springt.“

[\[zurück zum Anfang\]](#)

Im Wasserstoffatom wird das Hüllen-Elektron in der entsprechenden Geißlerschen Röhre durch Energiezufuhr auf ein höheres Energieniveau gehoben. Nach ultrakurzer Aufenthaltsdauer „fällt“ das Elektron auf ein niederes Energieniveau zurück und gibt die Energie ΔE in Form eines Lichtquants (Lichtwelle) wieder ab. Die Lichtwelle hat gemäß der Formel $\Delta E = h \cdot f$ eine ganz bestimmte Frequenz f (Farbe), die mittels der in der Formel im 2. Postulat erscheinenden Planck-Konstante $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ und der Energieänderung ΔE berechnet werden kann. Nun kann das Hüllenelektron eine ganze Reihe von Anregungszuständen einnehmen, sodass im Ergebnis ein Emissionslinienspektrum des Wasserstoffs entsteht (siehe Abb. 7 rechts unten).

Ein solches Spektrum lässt sich für jeden Stoff realisieren. Voraussetzung dafür ist aber, dass die Stoffe gasförmig sind. Sind die Stoffe fest oder flüssig (oder extrem ionisiert, w. z. B. bei der Sonne) beeinflussen sich die Atome sehr stark, so dass die Übergänge der Elektronen „deformiert“ werden. Damit kommt es zu allen möglichen Übergängen und entsprechend Lichtfarben – ein kontinuierliches Spektrum entsteht.

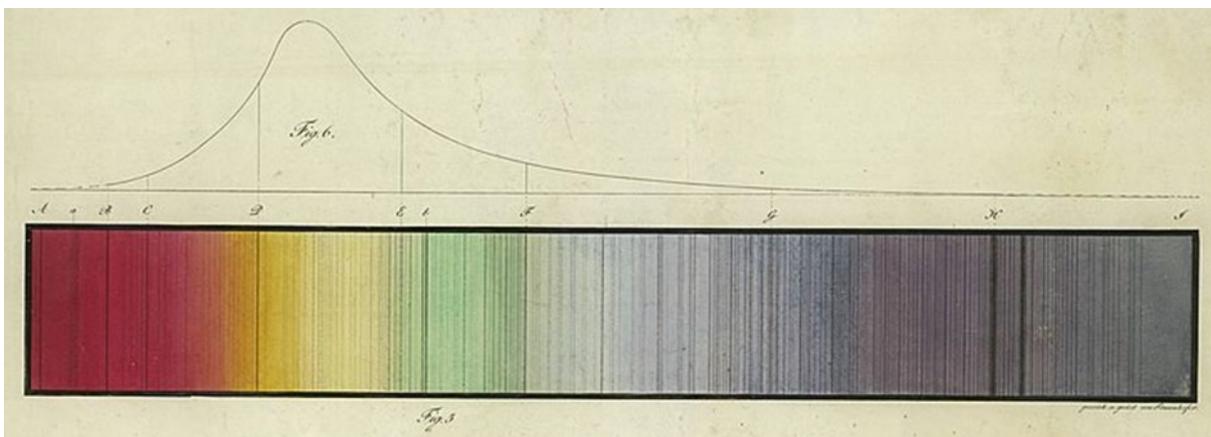


Abbildung 8: Fraunhofers Original-Spektrum zeigt ein von vielen Absorptionslinien (Fraunhoferlinien) durchzogenes Kontinuum. ©: By Joseph Fraunhofer - Deutsches Museum, Archiv, BN 43952, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=119634237>.

Etwas Astronomiegeschichte:

Bereits im Jahr 1802 entdeckte William Hyde Wollaston (1766 – 1828) dunkle Linien im Sonnenspektrum. Unabhängig davon entdeckte Joseph (von) Fraunhofer (1787 - 1826) im Jahr 1814 diese Linien ebenfalls und begann diese systematisch zu untersuchen (siehe Abb. 8).

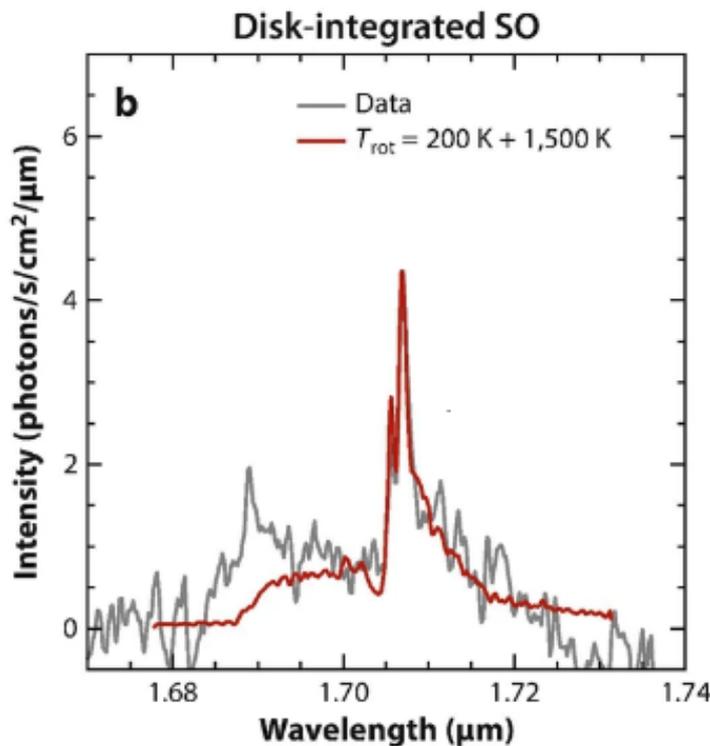
Fraunhofer untersuchte auch die Spektren verschiedener anderer astronomischer Objekte. Die Spektren von Venus und Mond glichen dem des Sonnenlichts. Das verwundert nicht sehr, ist doch deren Licht reflektiertes Sonnenlicht. Die Spektren von Sirius, Castor, Pollux u. a. Sternen hingegen wiesen deutliche Unterschiede im Kontinuum und dem Vorhandensein und der Intensität der Linien auf.

Das von Fraunhofer ebenfalls untersuchte Spektrum des angeregten Wasserstoffs zeigte farbige (Emissions-)Linien, die er als „schwarze“ Linien in seinem (Absorptions-) Spektrum gefunden hatte. Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811 – 1899) untersuchten im Jahr 1859 die Emissionsspektren verschiedenster Elemente. Die gefundenen Emissionslinien fanden sich im Absorptionsspektrum als Absorptionslinien wieder. Eine einfache Erklärung dafür ist folgende: Strahlt weißes Licht durch ein gasförmiges Element, so nehmen dessen Elektronen die für sie typischen Lichtfrequenzen auf (eine Art von Resonanz) und geben diese Lichtanteile nach kurzer Zeit wieder ab (s. o.). Diese Abgabe erfolgt in alle möglichen Richtungen, so dass in der ursprünglichen Richtung des weißen Lichts der betreffende Farbanteil kleiner ist. Zerlegt man nun das weiße Licht mit einem Prisma, so erscheinen die dunklen Linien des Absorptionsspektrums.

Eine sehr spezielle Geschichte ist die Entdeckung des Elements Helium, welches sich zuerst im Spektrum des Sonnenlichts zeigte (siehe [8]).

[\[zurück zum Anfang\]](#)

Die bei der spektroskopischen Untersuchung des Lichts eines Himmelskörpers gefundenen Linien (Absorptionslinien und/oder Emissionslinien) weisen also auch auf die Elemente oder auch chemischen Verbindungen hin, die in der gasförmigen Hülle eines Sternes vorhanden sind.



Entsprechend können wir jetzt mit den Schülern den Kreis mit dem Bezug auf das Io-Spektrum (Abb. 9) schließen.

Es ist klargeworden, dass die Spektrallinien ein großes Fenster zur Erkenntnis sind. In der heutigen Astrophysik werden die meisten Erkenntnisse auf Grundlage von Spektren gewonnen.

Abbildung 9:
Teil des Emissionslinienspektrums von Io. Die stärkste Emissionslinie bei einer Wellenlänge von 1,707 μm weist auf die (zumindest kurzzeitige) Existenz von Schwefelmonoxid (SO) hin.
©: de Pater, I., de Kleer, K., Ádámkóvics, M.: High spatial and spectral resolution observations of the forbidden 1.707 μm Rovibronic SO emissions on Io: Evidence for widespread stealth volcanism. Planet. Sci. J. 1 (2020a).

Zugegebenermaßen stellt die Umsetzung der vorgestellten Idee in 90 min Unterrichtszeit eine Herausforderung dar. Natürlich sind Kürzungen möglich, solange sie den roten Faden intakt lassen. Eine ausführlichere Betrachtung des Themas könnte im Rahmen eines Kurses (Ganztagsangebot) oder auch in einer Arbeitsgemeinschaft erfolgen.

Quellen

- [1] <https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2020-10-OS-Interferometer.pdf>
- [2] 2- Physiklehrplan Sachsen Oberschule Klasse 10
- [3] <https://www.ipp.mpg.de/handyspektrometer>
- [4] Ausschnitt aus dem Chemielehrplan Sachsen Oberschule Klasse 9
- [5] https://de.wikipedia.org/wiki/Bohrsches_Atommodell
- [6] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e8/Fraunhofer_Spektrum_Medium.jpg/726px-Fraunhofer_Spektrum_Medium.jpg
- [7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferlinie>
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Helium>
- [9] https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/unterrichtsentwicklung/aufgabendatenbank/2-NdL_Spektrale_Zerlegung_von_weissem_Licht_Aufgaben.pdf, Experiment B1

ANHANG

Auszug aus dem Lehrplan Physik Klasse 10 für die Oberschule in Sachsen

Lernbereich 3: Licht und Farben **8 Ustd.**

Einblick gewinnen in den Wellencharakter des Lichtes	→ Kl. 6, LB 1
<ul style="list-style-type: none"> - Interferenz durch Beugung - Zerlegung weißen Lichtes durch Brechung - ultraviolettes und infrarotes Licht - Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Farbe - Grenzen des Strahlenmodells 	SE Spektralfarben Nachweis, Anwendungen, Gefahren Infrarotnäherungssensor emotionale Wirkung von Farben
- Spektralanalyse	Emissionsspektrum und Absorptionsspektrum Auswertung der Strahlung von Gestirnen
- Regenbogen	Seifenblasen
- additive und subtraktive Farbmischung	Farbfernsehen, Fensterbilder; SE Farbkreiseln

Lernbereich 4: Praktikum **8 Ustd.**

Beherrschen des Experimentierens	⇒ Methodenkompetenz: Experiment als Methode der Physik
<ul style="list-style-type: none"> - Ziel eines Experiments - experimentelle Bedingungen - Arbeitsschritte beim Experimentieren 	Gewinnung, Sicherung und Anwendung physikalischer Gesetze Beobachtbarkeit, Wiederholbarkeit Protokoll; Fehlerbetrachtung
Gestalten von Schülerexperimenten	Nutzen des Computers oder digitaler Endgeräte, Tabellenkalkulation
<ul style="list-style-type: none"> - Dichtebestimmung - Black-Box-Experiment - Wirkungsgrad 	feste Körper und Flüssigkeiten Kennlinien bekannter Bauelemente elektrisch, thermisch, mechanisch

Wahlbereich 1: Moderne Physik

Einblick gewinnen in das Relativitätsprinzip und die Relativitätstheorie	Abgrenzung zur klassischen Physik Abraham Albert Michelson, Albert Einstein
<ul style="list-style-type: none"> - Relativität der Bewegung - Lichtgeschwindigkeit 	Bezugssysteme konstant, unabhängig von der Lichtquelle, Grenzgeschwindigkeit
<ul style="list-style-type: none"> - Relativität von Zeit und Länge 	Zeitdilatation, Zwillingsparadoxon, Möglichkeit von Zeitreisen; Längenkontraktion
<ul style="list-style-type: none"> - Masse – Energie – Beziehung 	

Auszug aus dem Lehrplan Chemie Klasse 9 für die Oberschule in Sachsen

Übertragen der Kenntnisse zum Atombau auf den Bau von Ionen	→ Kl. 8, LB 1 → PH, Kl. 9, LB 2
- Schalenmodell	Erweiterung der Modellvorstellungen
<ul style="list-style-type: none"> - Außenelektronen, Achterschale - Zusammenhang Atombau – PSE - Vergleich Atom – Ion 	