

1 Spektroskopie an galaktischen Gasnebeln

In einem schulischen Spektroskopie-Projekt wurde die chemische Zusammensetzung der HII-Region M 42 (Großer Orionnebel) und der drei planetarischen Nebel NGC 6543 (Katzenaugennebel), NGC 2392 (Eskimonebel) und M 57 (Ringnebel) experimentell ermittelt. Das zu Grunde liegende Verfahren betrachtet die klassischen Themen Wellenoptik und Atommodelle des Oberstufenlehrplans Physik unter astro-physikalischem Aspekt und verknüpft sie mit modernen Methoden rechnergestützter Datenverarbeitung und Auswertung.

Skizzieren des Projekts

Joseph von Fraunhofer entdeckte in den Jahren 1812 bis 1814 die nach ihm benannten Absorptionslinien im Sonnenspektrum. In der Folge entwickelte sich die Spektroskopie zu einer tragenden Säule der Astrophysik. Spektroskopische Verfahren erlaubten die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der Sterne und des interstellaren Mediums. Die Expansion des Universums wurde und wird spektroskopisch nachgewiesen und vermessen. In jüngster Zeit konnten zahlreiche extrasolare Planeten mit der spektroskopischen Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt werden.

Der seit 2008 von der Firma Baader-Planetarium angebotene DADOS-Spaltspektrograph erlaubt es, spektroskopische Methoden und Verfahren auf vergleichsweise hohem Niveau auch im schulischen Bereich aktiv zu betreiben. Der Astronomie-Arbeitsgemeinschaft am Kopernikus-Gymnasium in Wissen gelang die Aufnahme der Spektren von drei planetarischen Nebeln und einer HII-Region als digitale Bilddateien. Mittels kostenlos zugänglicher bzw. üblicherweise vorhandener Software wurden aus den Bilddateien Spektren extrahiert. Daraus konnten dann die chemische Zusammensetzung der betrachteten Himmelsobjekte und teilweise auch die räumliche Verteilung der vorkommenden Elemente abgeleitet werden.

Unser Spektroskopie-Projekt wurde von Beginn an so geplant, dass es von interessierten Lehrerinnen und Lehrern mit astronomischen Lerngruppen nachvollzogen werden kann. Im Internetportal „Lehrer-Online“ steht eine didaktisch-methodisch aufbereitete Darstellung als Unterrichtseinheit zur Verfügung [1].

Wasserstoffnebel und planetarische Nebel

Etwa 70% des interstellaren Gases bestehen aus atomarem Wasserstoff. Man unterscheidet Wolken aus neutralem Wasserstoff HI (lies: „H-eins“) und aus ionisiertem Wasserstoff HII (lies: „H-zwei“). Erstere sind im sichtbaren Bereich nicht beobachtbar, denn nahezu alle Atome befinden sich im Grundzustand, aus dem sie durch Absorption von sichtbarem Licht nicht angeregt werden können.

Wasserstoffwolken liegen als HII-Regionen vor, wenn die Strahlung von nahen, leuchtkräftigen, heißen Sternen (Oberflächentemperatur $T > 20000\text{K}$) die Wasserstoffatome ionisiert. Bei deren Rekombination entsteht u.a. sichtbares Licht der Balmer-Serie. HII-Regionen enthalten neben Wasserstoff auch Sauerstoff, Helium und Stickstoff. Sie sind Sternentstehungsgebiete.

Dagegen stellen Planetarische Nebel (PN) Endstadien von Sternen dar. Bei PN handelt es sich um von einem Stern abgestoßene gasförmige Materie, die durch diesen, den so genannten Zentralstern, zum Leuchten angeregt wird.

PN entstehen dann, wenn ein Stern von einer bis fünf Sonnenmassen seinen Wasserstoffvorrat weitgehend aufgebraucht hat. Das hydrostatische Gleichgewicht wird gestört, sodass der Stern unter seiner eigenen Gravitation kontrahiert. Die Verdichtung führt zu einem Temperaturanstieg und damit zur Fusion von Helium zu schwereren Elementen wie zum Beispiel Kohlenstoff und Sauerstoff.

Die Reaktionsgeschwindigkeit der Heliumfusion wächst dramatisch mit der Temperatur. Deshalb dehnt sich die äußere Schicht des Sterns zunächst aus. Somit kühlt sie ab und kontrahiert in der Folge wieder, es entsteht eine Pulsation. Dabei verliert der Stern im Laufe der Zeit einen großen Teil seiner Materie, die sich als Sternwind mit ca. 25 km/s in den Weltraum bewegt. Der Materieverlust bewirkt, dass der heiße Kern immer weiter freigelegt wird und auch schwerere Elemente abgestoßen werden. Letzere sind ein wichtiger Baustein für die Entstehung von Sternen der nachfolgenden Generationen und von Planeten. PN stellen deshalb einen wichtigen Schritt in der chemischen Entwicklung des Universums dar.

Mit der Freilegung des heißen Kerns steigt die Oberflächentemperatur des Zentralsterns, sein Strahlungsmaximum verschiebt sich in den ultravioletten Bereich. Folglich werden überwiegend hochenergetische Photonen emittiert, welche das abgestoßene Gas zum Leuchten anregen.

PN sind in vielerlei Hinsicht sehr interessant. Beispielsweise macht Helium dort mit ca. 28% einen größeren Teil der Gesamtmasse aus, als bei anderen Himmelsobjekten. Außerdem sind sie aktuelles Forschungsgebiet, denn die gestaltformenden Mechanismen sind noch nicht endgültig geklärt. Vermutlich führen Magnetfelder oder Wechselwirkungen mit massereichen Objekten zu den häufigen Abweichungen von der Kugelsymmetrie. Darüber hinaus dienen PN der Astrophysik als „Weltraumlaboratorien“, weil deren Materie-Dichte von weniger als 10000 Teilchen pro cm^3 auf der Erde selbst im besten Hochvakuum nicht erreicht wird [2; 3].

In den Spektren von PN und galaktischen Gasnebeln stieß man schon früh auf starke Emissionslinien bei 495,9nm und bei 500,7nm. Lange Zeit misslangen alle Versuche, diese Linien in Verbindung mit Spektrallinien bekannter Elemente zu setzen. Man ging daher von einem neuen Element aus, das man naheliegenderweise „Nebulium“ nannte. Erst 1927 konnte gezeigt werden, dass es sich bei den fraglichen Spektrallinien um „verbotene Linien“ des zweifach ionisierten Sauerstoffs O^{++} handelt, der als OIII bezeichnet wird. Hier spielen so genannte metastabile Energiezustände der O^{++} -Ionen die entscheidende Rolle. Ihre Lebensdauer reicht von Sekunden bis zu einigen Tagen. Gehen Elektronen durch Emission von elektromagnetischer Strahlung von diesen metastabilen Zuständen in einen tieferen Zustand über, entstehen die „verbotenen Linien“. Auf der Erde würde ein O^{++} -Ion in einem metastabilen Zustand auch beim bestmöglichen Vakuum seine Energie durch einen Stoß mit einem anderen Atom bzw. Ion strahlungslos verlieren, bevor es sie als elektromagnetische Strahlung abgeben könnte. Als Konsequenz sind die OIII -Linien bei 495,9nm und bei 500,7nm auf der Erde prinzipiell nicht beobachtbar. Wegen der sehr geringen Teilchendichte in galaktischen Gaswolken kann dort keine strahlungslose Energieabgabe erfolgen. Da die Wahrscheinlichkeit für die „verbotenen Übergänge“ zwar klein, aber größer als Null ist, zerfallen die metastabilen Zustände dann irgendwann durch Photonenemission [4].

Gewinnung der Spektren

Die Spektren der untersuchten Gasnebel wurden mit einem DADOS-Spaltspektrographen aufgenommen. Dieser ist so konstruiert, dass er okularseitig an ein

Teleskop angebaut werden kann. Die Teleskopoptik fokussiert das Licht des zu spektroskopierenden Objekts auf einen der drei Spalte des Spektrographen. Die zur Verfügung stehenden Spaltbreiten sind $50\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$ und $25\mu\text{m}$. Das dispergierende Element ist ein Reflexionsgitter. Weil es dazu für den schulischen Bereich kaum Literatur gibt, wird zunächst auf das Funktionsprinzip solcher Gitter eingegangen.

Reflexionsgitter erzeugt man im einfachsten Fall durch äquidistante Ritzung spiegelnder Flächen. Derartige Gitter haben den Nachteil, dass ein Großteil der Lichtintensität ins Hauptmaximum geht, wobei sich die Restintensität auf sehr viele Beugungsordnungen verteilt. Um möglichst viel Intensität in eine bestimmte Ordnung zu konzentrieren, stellt man „Blaze-Gitter“ her. Dabei sind die reflektierenden Flächen um den „Blaze-Winkel“ θ gegen die Gitterebene schräg gestellt (**Abbildung 1**).

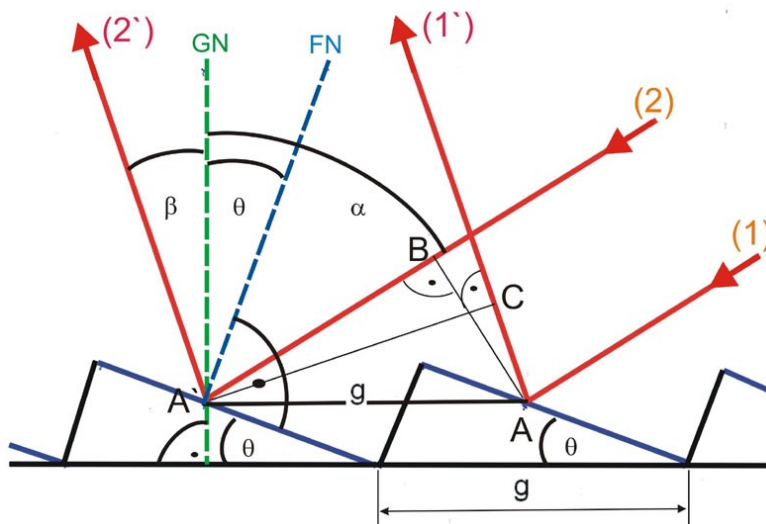


Abbildung 1: Zum Funktionsprinzip eines Blaze-Reflexionsgitters. GN ist die Gitter-normale, FN die Furchennormale.

Betrachtet man zwei parallele, in den Punkten A und A` auf benachbarte reflektierende Stufen treffende Strahlen (1) und (2), die den Winkel α mit der Gitternormalen (GN) bilden, und die unter dem Winkel β zur Gitternormalen gebeugten Strahlen (1`) und (2`), so erhält man als Gangunterschied:

$$\delta = |BA' - CA| = g \cdot |\sin\alpha - \sin\beta|$$

Dabei ist $g = AA'$ die Gitterkonstante. Beugungsmaxima treten dann bei $\delta = k\lambda$ ($k=0; 1; 2; 3; \dots$) auf. Wenn man nun den Blaze-Winkel θ so wählt, dass die erste Beugungsordnung in Richtung der normalen Reflexion liegt, geht der größte Teil der Lichtintensität in diese Ordnung [5]. Die DADOS-Gitter sind solche „geblazten“ Reflexionsgitter mit Gitterkonstanten $5\mu\text{m}$ (bei 200 Linien pro mm) bzw. $1,11\mu\text{m}$ (bei 900 Linien pro mm). In Verbindung mit einer Canon EOS 350D führt das auf Dispersionen von $0,25\text{nm/Pixel}$ und $0,056\text{nm/Pixel}$.

In der Schulsternwarte der Geschwister-Scholl-Realschule in Betzdorf konnten die Spektren der planetarischen Nebel NGC 6543, NGC 2392 und M 57 aufgenommen werden. Mit der größten DADOS-Spaltbreite von $50\mu\text{m}$ und bei ISO 1600 waren Belichtungszeiten von jeweils 45min erforderlich, um quantitativ auswertbare Spektren zu erhalten.

Der Orionnebel M 42 wurde mit dem DADOS-Spektrographen am 60cm-RC-Teleskop des Observatoriums Hoher List der Universität Bonn spektroskopiert. Die große Ausdehnung von M 42 ermöglichte es in Verbindung mit der Teleskopbrennweite von $4,80\text{m}$, alle drei DADOS-Spalte gleichzeitig auszuleuchten und so bei einer Belichtung drei Spektren unterschiedlicher Auflösung zu produzieren. **Abbildung 2** zeigt zwei solcher fotografischer Spektren.

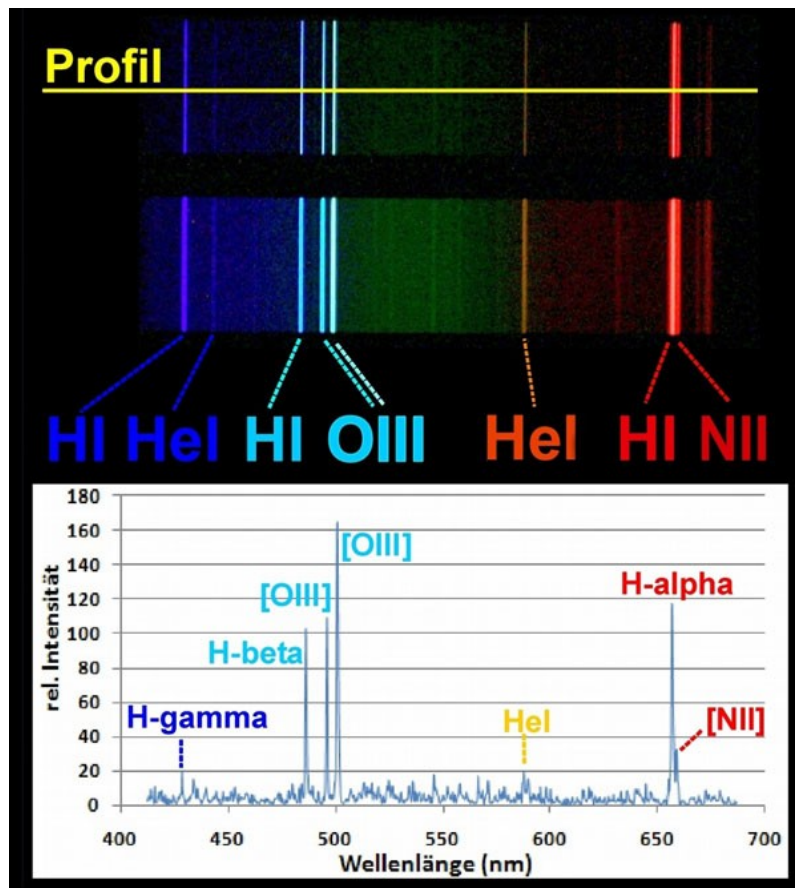


Abbildung 2: Spektren des Orionnebel M 42 bei den Spaltbreiten 25µm (oben) und 50µm (Mitte). Die Intensitätsverteilung im fotografischen Spektrum längs des dargestellten Profils ist unten als Funktion mit der Wellenlänge als Variabler dargestellt.

Kalibrierung der Spektren

Zu jedem Spektrum stellt sich nun die Frage, welche Lichtwellenlänge von welchem Ort im Bild des Spektrums repräsentiert wird. Der Spektrograph muss *kalibriert* (geeicht) werden.

Dazu kommt eine externe Lichtquelle zum Einsatz, die über das ganze sichtbare Spektrum verteilt Licht von hinreichend vielen, möglichst genau bekannten Wellenlängen emittiert. Diese Anforderungen an eine Kalibrierlichtquelle erfüllen handelsübliche, preiswerte Energiesparlampen (ES-Lampen). Das Spektrum einer solchen ES-Lampe wurde im Rahmen einer Facharbeit vermessen.

Für die Kalibrierung des Spektrographen nimmt man unmittelbar nach der Aufnahme jedes auszuwertenden Spektrums mit derselben Apparatur ein Spektrum der ES-Lampe auf. Die Technik des Kalibriervorgangs ist bei [1] ausführlich beschrieben. Mittels der kostenlosen Software Astroart (Demoversion) und einer Tabellenkalkulation (bevorzugt MS-Excel) werden aus den ursprünglich als digitale Bilddateien vorliegenden Spektren Funktionen extrahiert, die jeder Wellenlänge im sichtbaren Bereich eine Intensität zuordnen.

Abbildung 2 zeigt Ausgangs- und Endprodukt dieses Vorgehens: Entlang einer Profil-Linie durch das Spektrum im digitalen Bild ermittelt Astroart eine Intensitätsverteilung. Eine solche Linie besteht aus ca. 1000 Pixeln. Auf der Basis des Kalibrierlampenspektrums können mehreren dieser Pixel eindeutig exakte Wellenlängen zugeordnet werden. An die so gewonnenen Wertepaare (Pixel-Nummer; Wellenlänge) wird nun eine Funktion angefügt. Mit dieser Kalibrierfunktion

errechnet der Computer zu jedem Pixel auf der Profillinie eine Wellenlänge und konstruiert schließlich das Spektrum als Funktion Wellenlänge → Intensität.

Auswertung der Spektren

Die Intensitäts-Maxima in den Spektren legen die Wellenlängen der beobachteten Emissionslinien fest. Die Zuordnungen dieser Wellenlängen zu den entsprechenden

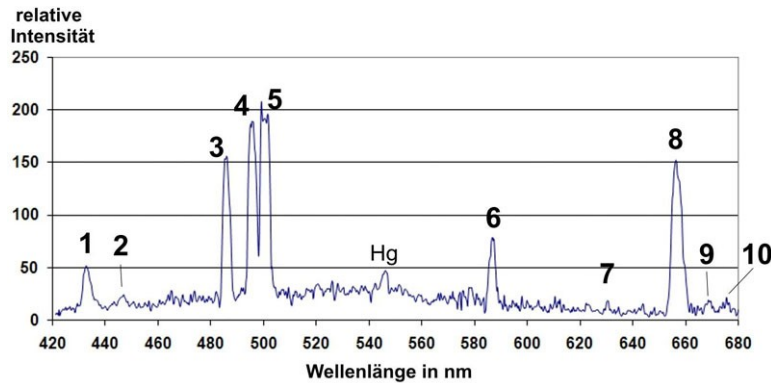


Abbildung 3: DADOS-Spektrum des Katzenaugennebels NGC 6543. Die Nummern an den Emissionslinien beziehen sich auf die Angaben in Tabelle 1.

Elementen erfolgten mit Hilfe von [6]. Im Orionnebel konnten so neben dem erwarteten Wasserstoff auch die Elemente Sauerstoff, Helium und Stickstoff nachgewiesen werden. Die Linien des zweifach ionisierten Sauerstoffs (OIII) und des einfach ionisierten Stickstoffs (NII) sind „verboten“.

Abbildung 3 zeigt unser Spektrum des Katzenaugennebels NGC 6543. Zehn Emissionslinien der genannten Elemente sind eindeutig erkennbar. Das Auftreten der Quecksilberlinie ist eine Folge der Himmelsaufhellung durch die künstliche Beleuchtung. Weitere Einzelheiten entnimmt man der Tabelle 1.

Nummer in Abb. 3	Gemessene Wellenlänge (in nm)	Literaturwert (in nm)	Differenz (in nm)	Element	Verboten?
1	432,85	434,04	-1,19	HI (H γ)	nein
2	446,66	447,15	-0,49	HeI	nein
3	485,99	486,13	-0,14	HI (H β)	nein
4	495,68	495,89	-0,21	[OIII]	ja
5	500,52	500,68	-0,16	[OIII]	ja
6	586,98	587,56	-0,58	HeI	nein
7	630,97	631,20	-0,23	[SIII]	ja
8	656,44	656,28	0,16	HI (H α)	nein
9	668,67	667,81	0,86	HeI	nein
10	674,19	673,08	1,11	[SII]	ja

Tabelle 1: Übersicht über die Emissionslinien von NGC 6543. Verbotene Linien sind durch eckige Klammern gekennzeichnet.

Abbildung 4 stellt die Spektren des Katzenaugennebels (NGC 6543) und des Ringnebels (M 57) einander gegenüber. Die Linien des neutralen Wasserstoffs und des zweifach ionisierten Sauerstoffes dominieren beide Spektren. In NGC 6543 ist das Helium neutral, in M57 hingegen einfach ionisiert. Das spricht für eine höhere Oberflächentemperatur des Zentralsterns von M 57 verglichen mit demjenigen von NGC 6543. Das Linienspektrum des Katzenaugennebels ist dem kontinuierlichen Spektrum seines Zentralsterns überlagert. Weil es sich um einen weißen Zwerg mit sehr hoher Oberflächentemperatur handelt, ist der kurzwellige Anteil intensiver als der langwellige.

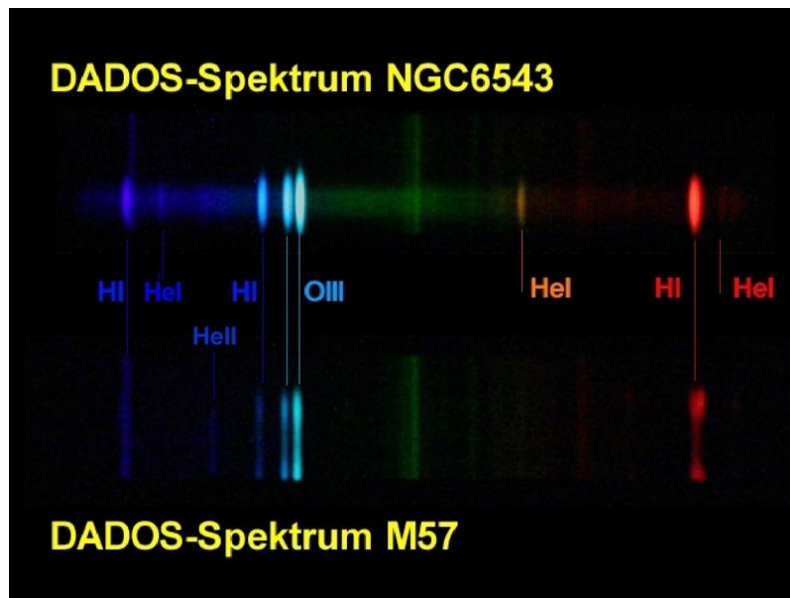


Abbildung 4: Die Spektren des Katzenaugennebels (NGC 6543) und des Ringnebels (M 57). Die auffälligsten Emissionslinien sind gekennzeichnet. Bei NGC 6543 erkennt man das kontinuierliche Spektrum des Zentralsterns.

Neben den Emissionslinien und dem kontinuierlichen Anteil hinterlässt die Lichtverschmutzung des Nachthimmels in beiden Spektren ihre Spuren. Die zugehörigen Linien erkennt man an ihrer Form: Die Ausdehnung der Bilder der Emissionsnebel in der Fokalebene des Aufnahmeteleskops, d.h. in der Spaltebene des Spektrographen, ist geringer als die Spalllänge. Da somit nicht der komplette Spalt ausgeleuchtet wird, erscheinen die Emissionslinien der Nebel in den fotografischen Spektren kürzer als die Linien der künstlichen Himmelsaufhellung. Bei letzteren fallen vor allem die bekannten Quecksilberlinien auf, wobei die violette Linie bei 436nm nahezu mit der $H\gamma$ -Linie zusammenfällt.

Gemäß **Abbildung 4** erscheinen die Spektrallinien des Ringnebels M 57 an deren oberen und unteren Rändern deutlich stärker als in den Mitten. Daraus kann man auf die räumliche Verteilung der Elemente Wasserstoff und Sauerstoff im Nebel schließen. Während der Aufnahme des Spektrums war das Bild des Ringnebels auf den Spektrographenspalt fokussiert, wobei dieser wegen der Geometrie des Nebels inhomogen ausgeleuchtet wurde. Die beiden Intensitätsprofile in **Abbildung 5** wurden längs der hellsten Spektrallinien von Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen. Man erkennt am rechten Intensitätsdiagramm, dass die Wasserstoffdichte im Nebelzentrum deutlich geringer ist als in den Außenbereichen. Beim Sauerstoff ist dieser Effekt nur ansatzweise vorhanden. Die Ausbreitung des vom Zentralstern abgestoßenen Wasserstoffes ist demnach weiter fortgeschritten als die des Sauer-

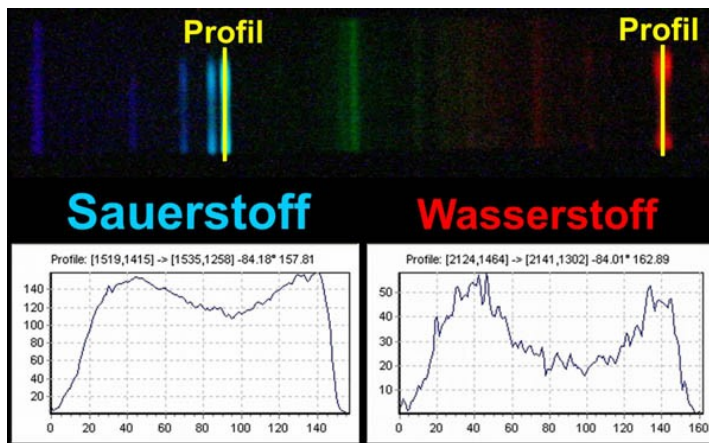


Abbildung 5: Zur räumlichen Verteilung von Sauerstoff und Wasserstoff im Ringnebel M 57

stoffes. Diese Ausdünnung des Zentrums von M 57 dürfte an seinem vergleichsweise hohen Alter von ca. 7000 Jahren liegen. NGC 6543 ist dagegen mit ca. 1000 Jahren viel jünger.

Anmerkungen zum Nachvollziehen des Projekts

Im Internetportal „Lehrer-Online“ sind bei [1] alle Materialien und Medien verfügbar, die für ein Nachvollziehen des oben beschriebenen Spektroskopie-Projekts benötigt werden. Alle Nebel-Spektren und Kalibrierspektren liegen als JPG-Dateien vor. Eine ausführliche Anleitung führt interessierte Lerngruppen vom Einlesen der JPG-Dateien mittels PC über das Kalibrieren der Spektren zu physikalisch auswertbaren Intensitätsfunktionen wie in den Abbildungen 2 und 3.

Darüber hinaus bietet die Unterrichtseinheit eine relativ umfassende Darstellung und Erläuterung der astrophysikalischen Hintergründe betreffend HII-Regionen und planetarische Nebel. Sie ist für eine selbständige Einarbeitung von Schülerinnen und Schülern in die Thematik konzipiert. Themen aus dem Oberstufenlehrplan Physik wie Lichtemission und Lichtabsorption, Bohr'sches Atommodell, Wellenoptik (Gitterbeugung) und Thermodynamik werden von einer neuen Seite zugänglich. Die durchgehend rechnergestützte Konstruktion und Auswertung der Spektren bietet ein nicht zu unterschätzendes Motivationspotential.

Literatur

- [1] Gerhardus, A.; Küsters, D.; Stinner, P.: Spektroskopie an galaktischen Gasnebeln, www.lehrer-online.de/spektroskopie-gasnebel.php
- [2] Giesecking, F.: Planetarische Nebel, Sterne und Weltraum, 1983/2, S. 68 – 74
- [3] Unsöld, A.; Bascheck, B.: Der neue Kosmos. Einführung in die Astronomie und Astrophysik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1999
- [4] Giesecking, F.: Planetarische Nebel Teil 3, Sterne und Weltraum, 1983/7, S. 336 – 341
- [5] Demtröder, W: Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1999
- [6] www.laserstars.org/data/nebula/identification.html

Autoren:

Peter Stinner (peter.stinner@gymnasium-wissen.de)

Andreas Gerhardus (angerhardus@web.de)

Kopernikus-Gymnasium

Pirzenthalerstr. 43

57537 Wissen

Der Artikel wird hier präsentiert mit freundlicher Erlaubnis des Friedrich-Verlag GmbH,
Im Brande 17, D-30926 Seelze

Informationen zu weiteren pädagogischen und didaktischen Zeitschriften im
Friedrich-Verlag findet man bei:

<http://www.friedrich-verlag.de/go/Schule+%26+Unterricht/Sekundarstufe/Naturw>