

## Emissionslinien der Planetarischen Nebel im sichtbaren Spektralbereich

von Peter Riepe

Sterne leuchten selbstständig, d.h. sie erzeugen Licht und senden es aus. Auch der Mond sendet Licht aus. Er erzeugt es aber nicht und leuchtet nicht selbst, sondern reflektiert lediglich das Licht der Sonne. Aussendung von Licht (Emission) und Lichtreflexion beobachten wir auch bei Gasnebeln. Selbstleuchtende Gasnebel wie H II-Regionen, Planetarische Nebel (PN), Wolf-Rayet-Nebel und Supernovaüberreste erzeugen ihr Licht selbst. Sie werden daher *Emissionsnebel* genannt. Nebel, die nur das Licht benachbarter Sterne reflektieren, heißen *Reflexionsnebel*.

Als massive Leuchtkörper strahlen die Sterne im sichtbaren Spektralbereich kontinuierliches Licht ab, also Licht aller Wellenlängen zwischen etwa 400 und 700 nm. Je nach Oberflächentemperatur erscheinen uns heiße Sterne blauer, kühle Sterne rötler. Ihr kontinuierliches Licht empfinden wir als gleichmäßig ineinander übergehende Farben von Violett über Blau, Grün, Gelb und Orange bis hin zu Rot (Abb. 1, oben).

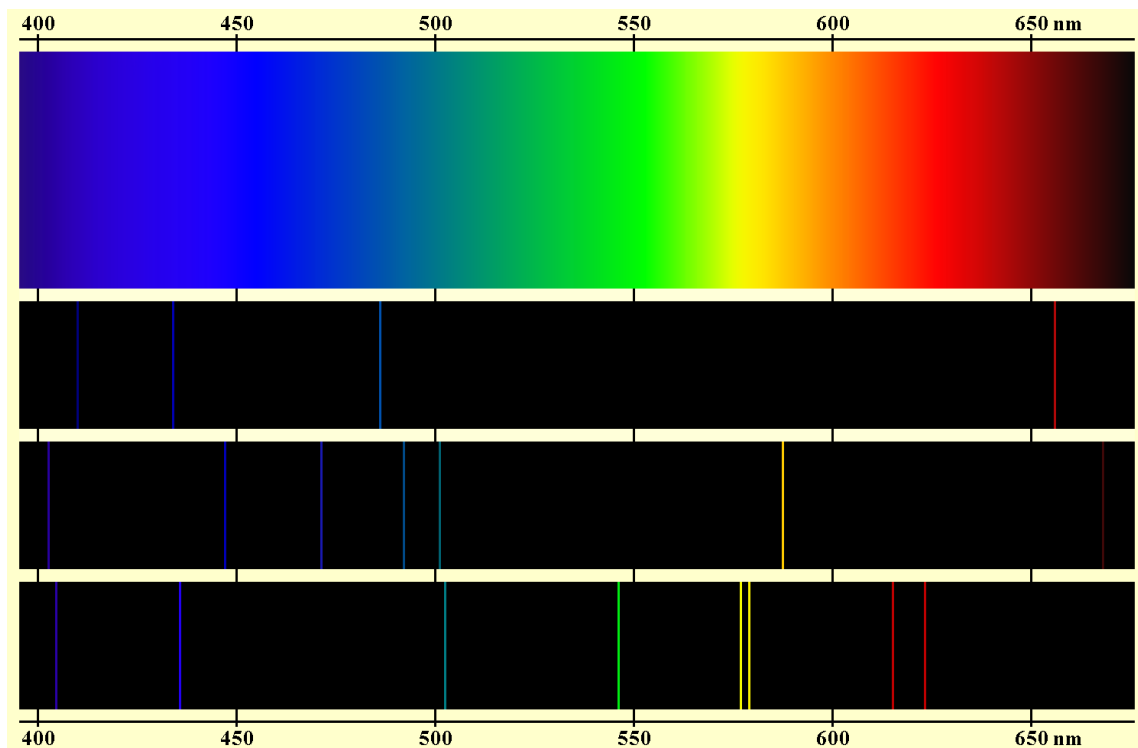


Abb. 1: Oben: kontinuierliches Spektrum eines selbstleuchtenden Körpers. Darunter: Spektren der drei chemischen Elemente Wasserstoff H, Helium He, Quecksilber Hg.

Ganz anders ein PN. Er umgibt als Gashölle einen Zentralstern, der das Gas mit seiner starken ultravioletten Strahlungsenergie zur Emission bringt. Aber ein PN emittiert als selbstleuchtendes Gas geringer Dichte kein kontinuierliches Licht, sondern sendet nur Licht ganz bestimmter Wellenlängen aus, die man „Emissionslinien“ nennt. William Huggins stellte dies bei seiner ersten PN-Spektroskopie 1864 mit Erstaunen fest. Jedes chemische Element hat seine ihm eigenen, typischen Wellenlängen (Abb. 1, unten).

Kriminalisten können anhand von Fingerabdrücken Verbrecher identifizieren, Astrophysiker identifizieren mit Hilfe der Emissionslinien die chemischen Elemente eines PN. Auch im infraroten und ultravioletten Spektralbereich besitzen die PN Emissionslinien. Im IR-Bereich gibt es z.B. gut zugänglich die Doppellinie des [S III] bei 906,9 und 953,2 nm sowie die starke Linie des He I bei 1083 nm.

### Was steckt hinter der Emission?

Heiße Sterne, die eine genügend starke UV-Strahlung aussenden, können ein umgebendes Gas mit dieser Strahlungsenergie „anregen“. Die Gasatome (z.B. Wasserstoff oder Sauerstoff) nehmen diese Anregungsenergie als zusätzliche Energie auf. Physikalisch ausgedrückt werden die angeregten Atome in einen energetisch höheren Zustand versetzt. Dies kann man sich bildlich so vorstellen, dass die Elektronen der Atome auf „energetisch höhere Bahnen“ angehoben werden (Abb. 2a). Sie können sogar aus dem Atom herauskatapultiert werden, dann ist das Atom ionisiert. Nach einer gewissen Zeit springen die Elektronen wieder zurück, z.B. von einer höheren auf eine tiefere Bahn oder von außen auf eine innere Bahn, und von da an dann weiter. Man nennt das „Rekombination“ (Abb. 2b).

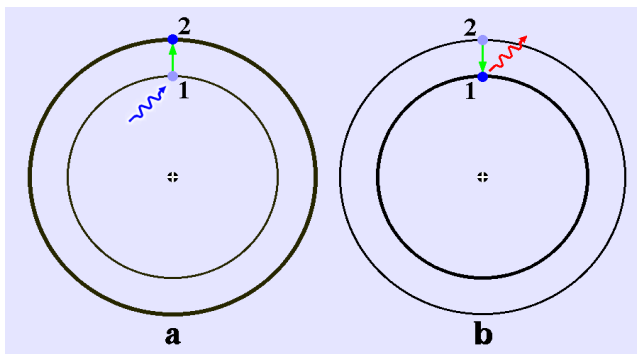


Abb. 2: Bei der Anregung (a) nimmt ein Elektron die Energie eines UV-Lichtquants (blau) auf und wird so von seinem Grundzustand (Position 1) in einen energetisch höheren Zustand gehoben (Position 2). Bildlich wird eine „höhere Bahn“ um den positiv geladenen Atomkern eingenommen. Bei der Rekombination (b) springt das Elektron von 2 nach 1

zurück in den Grundzustand und gibt seine Überschussenergie spontan in Form eines Lichtquants (rot) ab. Dies ist die Lichtemission.

Bei der Rekombination wird die aufgenommene Anregungsenergie in Form eines spontan emittierten Lichtquants wieder nach außen abgegeben. Das ist die Lichtemission! Die Summe aller abgestrahlten Lichtquants pro Sekunde empfinden wir als Lichtstrom. Und die Lichtfarben? Die lichtempfindlichen Zellen unseres Auges empfinden Lichtquants hoher Energie als blaues oder gar violettes Licht, Lichtquants geringer Energie erscheinen uns rot. Farbe und Wellenlänge des emittierten Lichts sind eindeutig definiert: Rotes Licht ist langwellig, violettes Licht ist kurzellig. Die bei den Rekombinationen erzeugten Emissionslinien stellen also Licht verschiedener, aber ganz bestimmter Wellenlängen dar (Sprünge von außen ins Atom zurück lassen wir hier einmal weg). Das bedeutet: Jeder Sprung zurück von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau entspricht einer exakt definierten („diskreten“) Wellenlänge. Ein Beispiel: Jeder kennt das Licht der typischen Natriumdampflampen an Fußgängerkreuzungen. Die gelbe Natrium-Emissionslinie hat eine Wellenlänge von 589,3 nm.

## Die „verbotenen Linien“ im Nebelspektrum

Nun gibt es aber höhere Energiezustände, in denen angeregte Elektronen längere Zeit verharren können. Der Physiker spricht von „metastabilen“ Zuständen. So ein metastabiler Anregungszustand kann lange anhalten, ehe die angeregten Elektronen in den Grundzustand zurückspringen. Während dieser langen Zeit stoßen die Gasatome in dichten Gasen aber bereits sehr häufig zusammen. Durch diese Stöße wird der metastabile Zustand in geringere Energiezustände zurückversetzt, ohne dass dabei spontan ein Lichtquant emittiert wird. In dichtem Gas wird also eine mit Lichtemission verbundene reguläre Rekombination aus metastabilen Zuständen durch Stöße verhindert. Ein solcher Übergang kann sich quasi nicht ereignen und wird deshalb als „verbotener Übergang“ bezeichnet.

Bei den galaktischen Gasnebeln oder bei den Planetarischen Nebeln ist die Gasdichte aber so gering, dass Stöße zwischen den Gasatomen nur ganz selten passieren. Von daher bleibt genügend Zeit, dass metastabile Zustände zwischen den Stößen durch die übliche Rekombination beendet werden können. In dem Fall wird dann doch eine Emission beobachtet! Die so erzeugten Emissionslinien werden „verbotene Linien“ genannt. Und jetzt etwas, was viele Amateure und Astro-Händler einfach nicht wissen und dann auf ihren Webseiten und in ihren Werbeanzeigen unterlassen: Alle verbotenen Linien werden durch eckige Klammern um das ionisierte Element gekennzeichnet, z.B. [S II], [N II] oder [O III]. Allerdings bleibe ich skeptisch, ob dieser Hinweis etwas nützt ...

Eine der bekanntesten verbotenen Linien ist die doppelte türkise Emissionslinie des zweifach ionisierten Sauerstoffs [O III] bei 500,7 und 495,9 nm Wellenlänge. Sie wurde noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Unkenntnis der Physik dem chemischen Element „Nebulium“ zugeordnet. Ira Sprague Bowen konnte den Unsinn beenden und 1927 den wirklichen Emissionsablauf erklären. Sie führte diese verbotene Doppellinie auf den zweifach ionisierten Sauerstoff zurück.

## Welche Emissionslinien sendet ein PN aus?

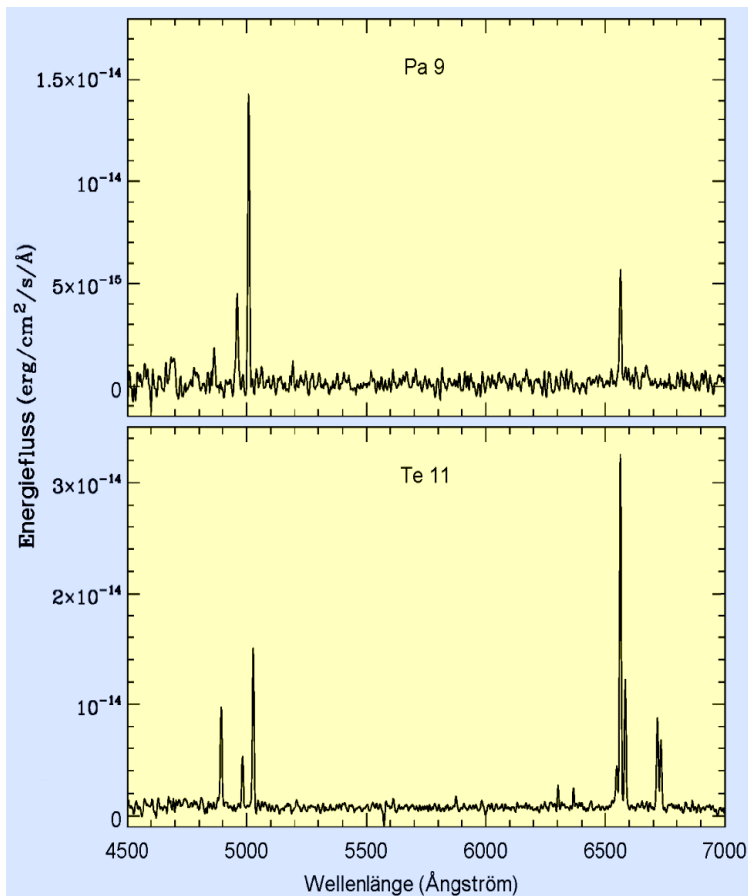
Zunächst einmal ist Wasserstoff das häufigste Element im Weltall. Daher senden PN und andere Emissionsnebel primär die Emissionslinien des ionisierten Wasserstoffs aus. Deren hellste ist die bekannte rote  $H\alpha$ -Linie. Aber Wasserstoff emittiert auch die blaue  $H\beta$ -Linie, sie trägt zur visuellen Sichtbarkeit der Emissionsnebel bei. Ferner gibt es die violette  $H\gamma$ -Linie und weitere, die in ihrer Intensität immer schwächer werden.  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$  ... zusammen heißen *Balmer-Linien* (Abb. 1, zweites Spektrum).

Planetarische Nebel emittieren auch Emissionslinien der Edelgase (z.B. Helium, Neon oder Argon). Sie sind jedoch aufgrund ihrer geringeren Häufigkeit durchweg schwächer als die Wasserstofflinien. Wichtig ist folgende Tatsache: Da der Zentralstern seine Außenschichten als umgebende, expandierende Gaswolke abgestoßen hat, sind im PN auch schwerere freigesetzte Elemente vorhanden. Neben den bereits genannten hellen verbotenen Emissionslinien des Sauerstoffs [O III] findet man auch die verbotenen Linien des Stickstoffs [N II] und des Schwefels [S II]. Die Tabelle gibt einen Überblick

über die wichtigsten und hellsten Emissionslinien in Planetarischen Nebeln. Und noch einmal: Alle verbotenen Linien stehen in eckigen Klammern. Abb. 3 zeigt ein typisches PN-Linienspektrum.

Linie	Wellenlänge (nm)	Farbe
H $\gamma$	434,0	violett
[O III]	436,3	violett
He II	468,6	blau
H $\beta$	486,1	blau
[O III]	495,9	türkis
[O III]	500,7	türkis
He I	587,6	gelb
[O I]	630,0	rot
[N II]	654,8	rot
H $\alpha$	656,3	rot
[N II]	658,4	rot
[S II]	671,6	dunkelrot
[S II]	673,1	dunkelrot

*Tabelle: Die wichtigsten Emissionslinien eines PNs im sichtbaren Spektralbereich. Alle sog. „verbotenen“ Linien (siehe Text) stehen grundsätzlich in eckigen Klammern!*



*Abb. 3: Spektren der PN Pa 9 und Te 11 (hier als Profildarstellung aus Jacoby, Kronberger et al. 2009). Bei Pa 9 dominiert die [O III]-Linie und [S II] fehlt. Bei Te 11 dagegen kommen H $\alpha$ , [N II] und [S II] viel stärker heraus.*

## Welche Farbe hat ein PN?

Für Astrofotografen von Bedeutung: Die PN-Farbe wird dadurch bestimmt, welche Linien emittiert werden und wie die relative Stärke dieser Linien zueinander aussieht. Blaugüne oder grünliche PN leuchten überwiegend in [O III]. Ein Paradebeispiel ist NGC 7662, der „blaue Schneeball“. Er leuchtet in [O III] sechs- bis siebenmal stärker als in  $H\alpha$ . Rote PN zeigen weniger oder sogar kaum [O III], dafür emittieren sie aber stark in  $H\alpha$ , [N II] oder [S II]. Ist ein PN rot, so heißt das noch lange nicht, dass grundsätzlich  $H\alpha$  dominiert! Der lichtschwache Sh2-78 z.B. ist knallrot, seine verbotenen [N II]-Linien sind jedoch insgesamt etwa 3,2-mal so stark wie die  $H\alpha$ -Linie. Ähnliches gilt für K<sub>j</sub>Pn 8 (siehe Artikel von Hartmut Bornemann). Abgesehen davon ist die Farbe der PN auch immer ein Bild der Elementverteilung über die sichtbare Fläche des Nebels. Bestimmte Strukturen treten im Licht verschiedener Emissionslinien auch unterschiedlich in Erscheinung. Nahe am Zentralstern ist – wie bei M 57 als Musterbeispiel – die blaue Farbe am intensivsten, weiter außen macht sich dann das  $H\alpha$ -Leuchten stärker bemerkbar. Hier wird der Anregungsgrad erkennbar: hoch angeregte PN sind blau, gering angeregte Nebel rot.

## Empfehlenswerte Quellen (Stand 2014)

- M. Scholz (2009): Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik, Band 15, Grundlagen der Sternspektroskopie; siehe auch:  
[http://www.astronomie.de/uploads/media/Kleines\\_Lehrbuch\\_der\\_Astronomie\\_und\\_Astrophysik\\_Band\\_15.pdf](http://www.astronomie.de/uploads/media/Kleines_Lehrbuch_der_Astronomie_und_Astrophysik_Band_15.pdf)
- <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1454009>
- G.H. Jacoby, M. Kronberger et al. (2009). Searching for Faint Planetary Nebulae using the Digital Sky Survey; arXiv:0910.0465v1 [astro-ph.SR]