Bernd Hanisch

Objektivprismenspektroskopie an Planetarischen Nebeln

Artikel erschienen im
Journal für Astronomie Nr. 2,
Vereinszeitschrift der Vereinigung der Sternfreunde e.V. (VdS).

Bereitgestellt durch die VdS-Fachgruppe Spektroskopie.

Referenz:
Bernd Hanisch, VdS-Journal Nr. 2 (1999) 76ff

Diese Datei ist nur für Ihren persönlichen Bedarf bestimmt. Änderungen sowie die Vervielfältigung auf einem anderen physischen oder virtuellen Datenträger sind untersagt!

Objektivprismenspektroskopie an Planetarischen Nebeln

Bernd Hanisch, Frankfurt/Oder

Planetarische Nebel (PN) – da denkt wohl so mancher sofort an den bekannten Ringnebel in der Leier, der bei visuellen, aber auch bei vielen photographischen Beobachtungen oft als Paradestück präsentiert wird. Beiden der genannten Beobachtungsmethoden ist gemein, daß nur die integrale Lichterscheinung beobachtet werden kann. Diese enthüllt zwar manche Einzelheiten der Nebel, dennoch werden dem Beobachter wichtige Informationen vorenthalten, wenn er nicht versucht, die spektrale Lichtzusammensetzung näher zu untersuchen. Um dieses Ziel zu erreichen, sollten die Möglichkeiten der Spektralbeobachtung von PN erkundet werden, die sich dem Amateur unter Verwendung einfacher Hilfsmittel bieten. Dieser im Sommer und Herbst 1995 unternommene Versuch soll im folgenden kurz beschrieben werden.

Allgemeine Bemerkungen zu planetarischen Nebeln

Der etwas irreführende Name entstammt offenbar Herschels visuellen Eindrücken am Fernrohr, der das Aussehen einiger dieser Nebel mit Planetenscheiben verglich. Mit Planeten haben diese Objekte allerdings nicht viel gemein. Bei PN handelt es sich um leuchtende Gasnebel, die im Gegensatz zu den HII-Gebieten sehr regelmäßige Formen besitzen. Ein die sphärische Gashülle ionisierender Zentralstern sehr hoher Temperatur ist dabei das Symmetriezentrum. Die Ringerscheinung ist somit als Projektionseffekt zu verstehen. Mit derzeit etwa 1000 bekannten PN gelten sie als eine eher seltene Erscheinung am Himmel. Während die kleinen Objekte uns nahezu sternförmig erscheinen, haben die größten Exemplare einen Durchmesser von 15 Bogenminuten. Die durchschnittlichen Entfernungen liegen um 2000 Lichtjahre, die wahren Durchmesser zwischen 20 und 40 AE. Da die Hülle mit Geschwindigkeiten zwischen 20 und 50 km/s expandiert, kommt es zur langsamen Vermengung mit interstellarer Materie, wodurch die Nebel mit der Zeit zunehmend diffuser und somit schwerer erkennbar werden. Mit einer geschätzten Lebensdauer von einigen hundert bis zu 10000 Jahren handelt es sich um relativ kurzlebige Objekte.

PN entstehen in einer späten Entwicklungsphase massearmer Sterne (1–4 Sonnenmassen). Sind im Zentralgebiet die Vorräte an Kernenergie erschöpft, kommt es zu Instabilitäten in der He-Brennzone. Während die äußere Hülle abgestoßen wird, kontrahiert das Sterninnere zu einem Zentrum hoher Dichte und Temperatur [1].

Instrumente zur Spektroskopie von PN

Wegen der ohnehin geringen Lichtmengen erfolgte die Aufnahme der Spektren mittels Objektivprismenspektroskopie. Als Spektrograph diente ein Zeiss Meniscas 180/1800 mit einem F2-Objektivprisma von 210 mm Durchmesser und 5° brechendem Winkel auf einer Zeiss Ib-Montierung. Als Strahlungsempfänger wurde die KODAK- Emulsion T MAX 3200 verwendet. Die mittlere Dispersion beträgt etwa 180 A/mm, was einer Spektrumslänge auf dem Negativ von 10 mm entspricht. Die Belichtungszeiten der unverbreiterten Spektren liegen zwischen 20 und 60 min. Die Auswertung (Scannung) erfolgte mit einem Zeiss-Registrierphotometer MD 100 und einem, vom Bonner Sternfreund Helmut Knobloch geschriebenen, PC-Auswerteprogramm.

Die Spektren der PN

Im Vergleich zu den bekannteren Absorptionslinienspektren von Sternen bestehen die Objektivprismen- spektren der PN aus kettenartig aneinandergereihten, monochromatischen Nebelbildern. Dabei wird das Licht nur bei wenigen Wellenlängen emittiert. Die Spektren der Hülle und des Zentralsterns sind stets überlagert. Die intensivsten Emissionen im sichtbaren Bereich liegen den Elementen H, He, O, Ne, aber auch C und N zugrunde. Im Vergleich zur sonstigen kosmischen Elementenhäufigkeit ist bei PN das He überproportional häufig [1].

Neben Linienemissionen sind in den Nebelspektren auch kontinuierliche Lichtanteile sichtbar. Diese resultieren je nach Spektralbereich teilweise vom Zentralstern, aber auch aus frei-freien Übergängen (Bremsstrahlung) bzw. frei-gebundenen Übergängen.

Prinzipiell kann die Anregung wie folgt beschrieben werden: Der sehr heiße Zentralstern sendet aufgrund seiner hohen Temperatur harte UV-Strahlung aus, welche die Hülle zum

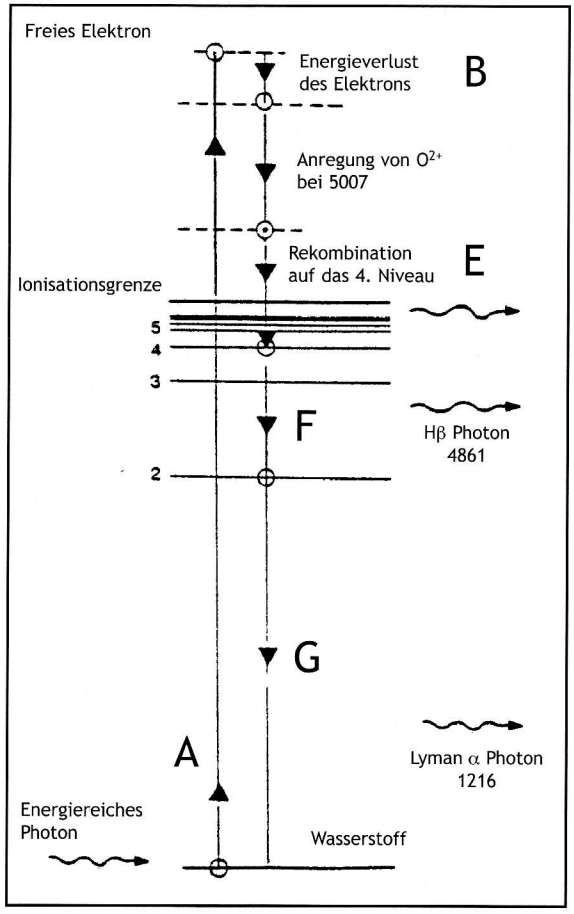
Leuchten anregt. Durch Rekombinations- und Fluoreszenzmechanismen wird diese kurzwellige Strahlung in der Hülle in sichtbares Licht umgewandelt. Die Zuordnung der Emissionen in den PN zu den entsprechenden Elementen gestaltete sich anfangs problematisch, was nicht zuletzt dazu führte, daß für die sehr intensiven grünen Sauerstofflinien bei ca. 5000 Å, deren Licht die Nebel in bestimmten Bereichen grün erscheinen läßt, zunächst ein neues chemisches Element, das »Nebulium«, postulliert wurde. Daher sind diese Linien heute oft noch als N1 und N2 bezeichnet, was jedoch nichts mit dem Element Stickstoff zu tun hat. Die richtige Zuordnung zum Element Sauerstoff wurde deshalb so spät erkannt, weil es sich hier, wie oft bei PN, um verbotene Linien handelt. Diese Linien treten wegen der sehr geringen Übergangswahrscheinlichkeit unter irdischen »Normalbedingungen« nicht auf und gelten deshalb als verboten. Man erkennt sie an der Angabe in eckigen Klammern, z.B. [O III].

Als Anregungsmechanismus für diese Linien wird in der Literatur hauptsächlich Elektronenstoß diskutiert [2]. Die Anregung der verbotenen Linien ist an sehr geringe Materiedichten gebunden, welche dem irdischen Hochvakuum entsprechen. Diese geringe Materiedichte ermöglicht eine lange Verweildauer (1–10 s) von Elektronen auf sogenannten metastabilen Energieniveaus, die sich energetisch knapp über dem Grundzustand befinden. Die Verweildauer der Elektronen bei normalen Übergängen liegt im Bereich von 10–8s.

Die sehr hohe Intensität der verbotenen [O III]-Linien wird zum einen durch die große Ausdehnung der sie erzeugenden Regionen (50–80% der Nebelmasse), zum anderen aber auch durch die gleichzeitig relativ geringe Intensität der erlaubten Linien verursacht [2]. Die Anregung bzw. das Erscheinen der verbotenen Linien in PN und anderen Gasnebeln, wie z.B. den HII-Gebieten, stellt eine bemerkenswerte physikalische und chemische Besonderheit dar.

Der für das Entstehen wichtiger Linien und Kontinua in PN verantwortliche Anregungsmechanismus wird aus einer in [3] dargestellten und hier leicht abgewandelten Darstellung deutlich.

A: Photoionisation von Wasserstoff durch Absorption kurzwelliger Strahlung
B: Energieverlust des freien Elektrons durch nahe Passage eines Protons, frei-freier Übergang, Bremskontinuum
C: Zusammenstoß eines freien Elektrons mit einem O_2^+-Ion
D: Anregung eines O_2^+-Ions vom Grundzustand ^3P auf ^1D
E: Rekombination des freien Elektrons mit einem Proton auf das 4. Energieniveau, Brackett-Kontinuum
F: Übergang vom 4. Energieniveau auf das 2. Energieniveau, H-β-Emission bei 4861 Å
G: Übergang vom 2. Energieniveau auf das 1. Energieniveau, Lyman-α-Emission bei 1216 Å
H: Spontane Emission des O_2^+ von ^1D auf ^3P, sehr intensive Nebellinien im grünen Spektralbereich bei 5007 Å und 4959 Å



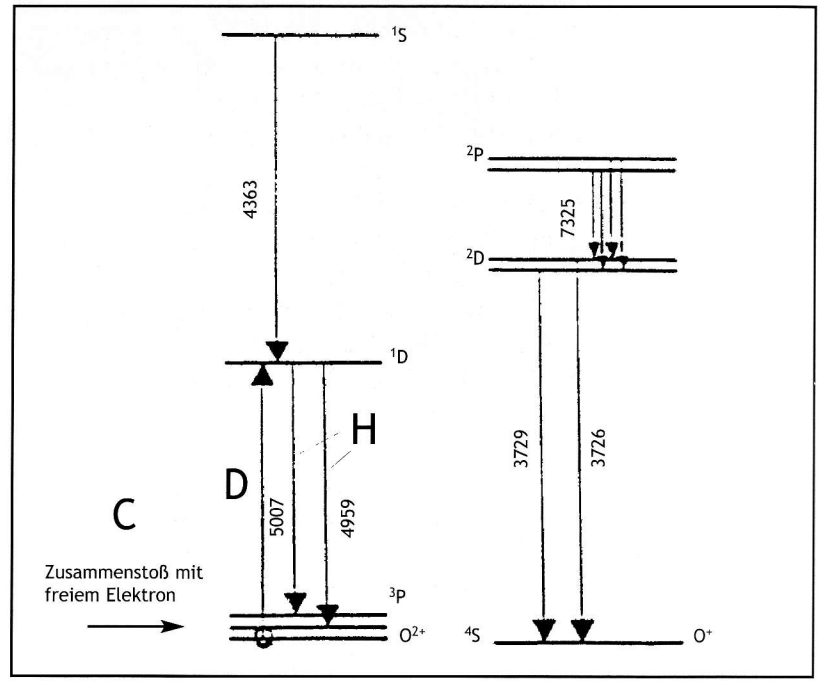


Abb. 1: Entstehung typischer Spektrallinien in Nebeln (aus »Stars an their Spectra«, J. Kaler, Cambridge University Press 1989)

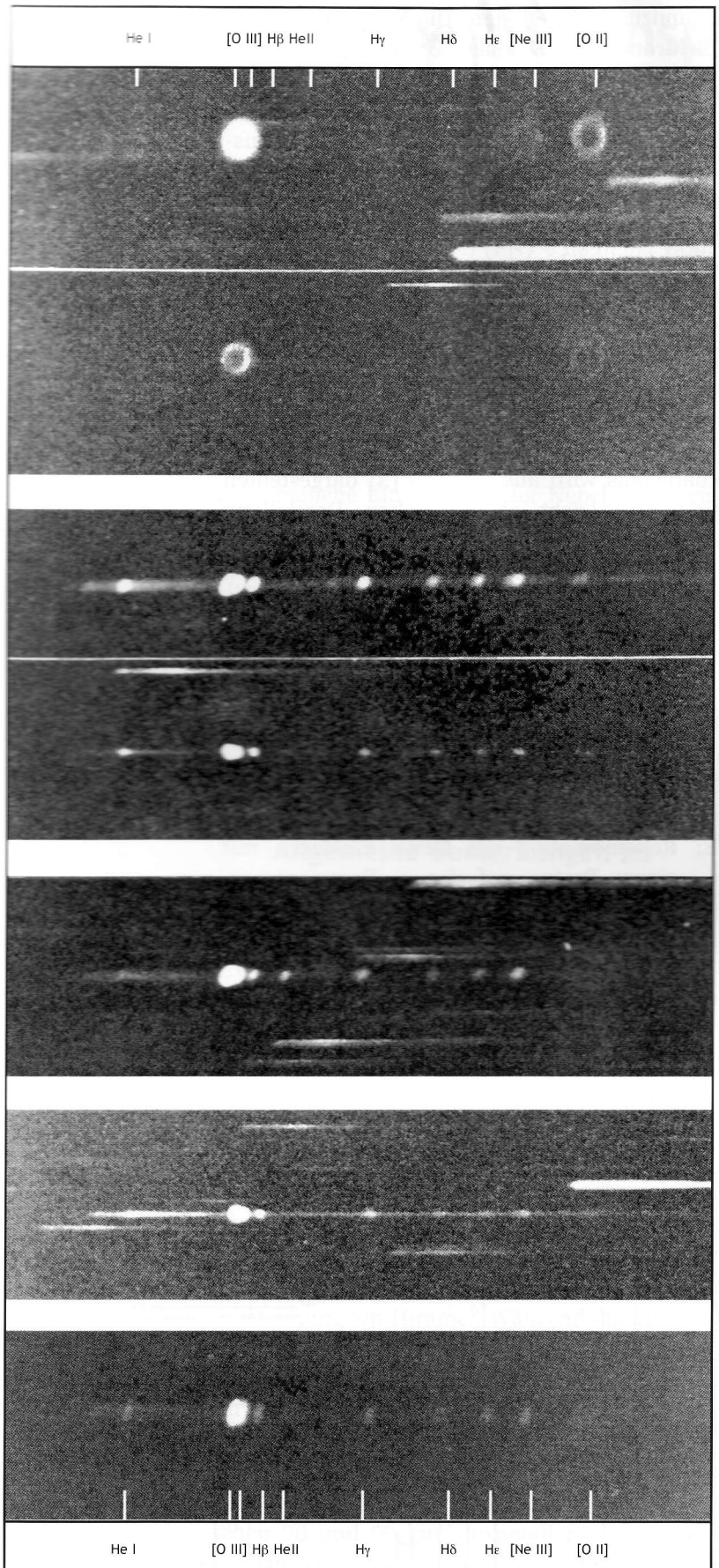


Abb. 2: Spaltlose Spektralaufnahmen planetarischer Nebel.
Von oben nach unten: M 57 (30.7.95) 44 min, M 57 (30.7.95) 12 min, NGC 6543 (24.5.95) 40 min, NGC 6543 (4.8.95) 20 min, NGC 7662 (2.10.95) 60 min, NGC 6826 (22.8.95) 34 min, NGC 7009 (21.10.95) 40 min.

Spektroskopisch betrachtet gibt es durchaus Gemeinsamkeiten zwischen den H II-Gebieten (wie z.B. dem Orionnebel) und den PN, obgleich erstere entwicklungsgeschichtlich der Sternentstehung, die PN jedoch einer späteren Entwicklungsphase des Sterns zugeordnet werden. In beiden Fällen wird Gas durch heiße Sterne zum Leuchten angeregt. Da die Zentralsterntemperaturen der PN die der anregenden Sterne der H II-Gebiete noch übertreffen, kann man bei den PN höhere Anregungs- und Ionisierungszustände als in den H II-Gebieten erwarten.

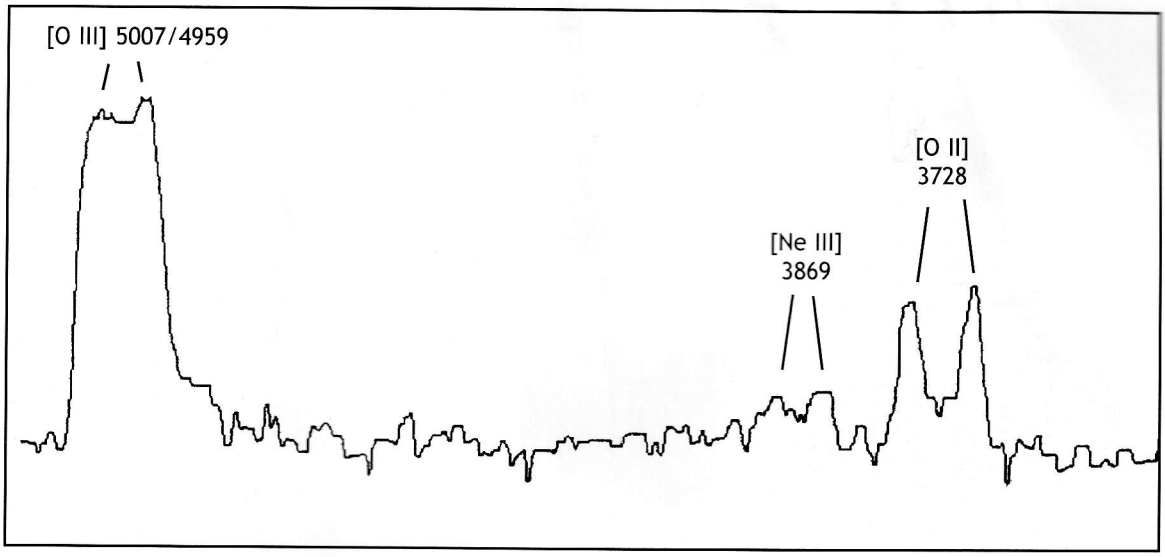
Interpretation der Nebelspektren, erste eigene Ergebnisse

Einige vom Autor aufgenommene Nebelspektren zeigt Bild 2. In Bild 3 sind die Rohscans von M 57 und NGC 6543 dargestellt. Während bei M 57 wegen des großen Durchmessers jedes Nebelbild im Scan durch zwei Schwärzungsmaxima dargestellt wird, reicht bei dem kleineren NGC 6543 die Auflösung nicht aus. Aus den Spektren der PN sind eine Reihe von Informationen ableitbar:

Zunächst muß die Emissionswellenlänge jedes monochromatischen Nebelbildes bestimmt werden. Mit Hilfe von Vergleichsspektren oder Spektraltabellen erfolgt dann die Zuordnung zu den entsprechenden Elementen, die ihrerseits weitere Hinweise auf Anregungs- und Ionisierungszustände und im Falle der verbotenen Linien auch auf die Materiedichte gibt. Die in Bild 2 gezeigten Spektren zeigen monochromatische Nebelbilder der Balmerlinien des Wasserstoffs, des zweifach ionisierten Sauerstoffes (intensivste Linien im abgebildeten Spektralbereich), sowie vom einfach ionisierten Sauerstoff und Helium und vom zweifach ionisierten Neon.

Eine sehr intensive Linie bei den PN ist auch die H-α-Linie, die von der verwendeten Emulsion jedoch nicht abgebildet wurde. Auffällig ist weiterhin das Erscheinen der He II-Linie (4686 Å) bei NGC 7662. Die zur Anregung dieser Linie erforderliche hohe Energie (ca. 54 eV) deutet auf einen besonders hohen Anregungsgrad in diesem Nebel hin.

Ein Vergleich der Durchmesser der einzelnen monochromatischen Nebelbilder weist im Zusammenhang mit den dazugehörigen Ionisationspotentialen auf die Ionisationsschichtung im Nebel hin. Hierbei ist jedoch die Betrachtung der Nebelbilder bei vergleichbaren Schwärzungen erforderlich, da unterschiedliche Durchmesser auch durch unterschiedlich lange Belichtungszeiten vorgetäuscht werden können.



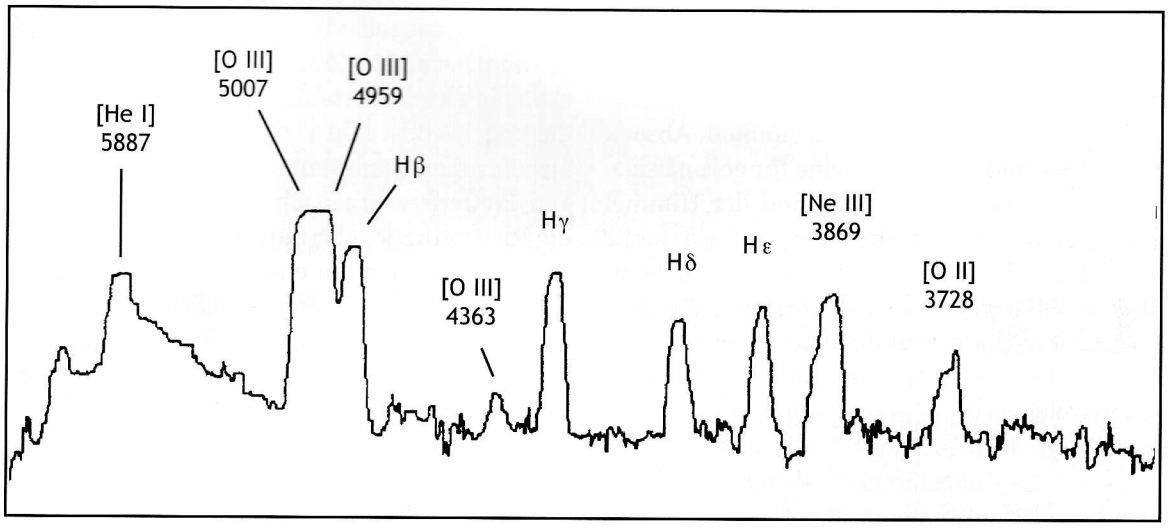


Abb. 3: Rohscans von M57 (oben) und NGC 6543 (unten).

Deutlich sichtbar sind die unterschiedlichen Durchmesser der Nebel. Die beiden [O III]-Linien bei 5007 A und bei 4959 A sind nicht aufgelöst.

Prinzipiell sind die Bilder höherer Anregungszustände kleiner, da ihre Entstehungsorte näher zum Zentralstern liegen. Mit etwas Mühe kann man dies bei einem Vergleich der Bilder [Ne III] und [O II] bei M 57 erkennen. Durchmesser und Gestalt der einzelnen Nebelbilder geben auch Hinweise auf die Materieverteilung in den einzelnen Hüllenbereichen. Allerdings sind für derartige Beobachtungen längerbrennweitige Aufnahmen erforderlich.

Aus den Intensitäten der Nebelbilder kann auf die Lokalisierung der Hauptnebelmasse und qualitativ auch auf die Temperatur des Zentralsternes geschlossen werden. Nach [2] unterteilt man in Abhängigkeit vom Intensitätsverhältnis [O III] : H-β den Anregungsgrad der Nebel wie folgt:

[O III] : H-β 0...1 entspricht einer niedrigen Anregung

[O III] : H-β 1...15 und Abwesenheit von [He II] und [Ne V] entspricht mittlerer Anregung

[O III] : H-β 1...15 und Anwesenheit von [He II] und [Ne V] entspricht hoher Anregung

Im allgemeinen steigt die Anregung mit der Zentralsterntemperatur, auch wenn der Anregungsgrad noch von anderen Faktoren (Abstand Stern-Hülle, Hüllendichte, Nebelmasse etc.) abhängt. Eine große Helligkeitsdifferenz zwischen Zentralstern und Nebel im visuellen Bereich deutet ebenfalls auf eine hohe Zentralsterntemperatur hin.

Aus Liniensaufspaltungen hochdispersiver Spaltaufnahmen monochromatischer Nebelbilder kann man die Expansionsgeschwindigkeit der Hüllenbereiche ableiten.

Die Spektroskopie der PN ist nach Meinung des Autors auch für den Amateur einen Versuch wert.

Literatur

[1] Weigert/Zimmermann, Brockhaus ABC Astronomie, 5. Aufl., Brockhaus Verlag Leipzig, 1977, S. 285 f.

[2] K. Wurm, Die Planetarischen Nebel, Akademie-Verlag Berlin, 1951

[3] J. Kaler, Stars and their spectra, Cambridge University Press, 1989