

Die Bestimmung der Staub- und Gasproduktion von Kometen in der Amateurastronomie

von Uwe Pilz und Matthias Achternbosch

Das von aktiven Kometen ausgesandte Licht setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Zum Einen besteht es aus Sonnenlicht, das vom Staub der Kometenatmosphäre gestreut wird (Kontinuum), zum anderen enthält es Emissionen des angeregten Gases. Im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums sind hauptsächlich die Kohlenstofflinien (C2-Linien) beteiligt, die so genannten Swan-Bänder. Die visuell bestimmten Helligkeiten enthalten somit beide Komponenten. Um aus ihnen die Gasproduktionsrate abzuleiten, ist dieser Sachverhalt zu berücksichtigen.

Laurent Jorda [1] ging diesbezüglich einen empirischen Weg. Ihm standen spektroskopische Messungen von 37 Kometen zur Verfügung, aus denen sich die Wasserproduktion ableiten lässt [1]. Diese Produktionsraten wurde mit visuellen Helligkeiten der internationalen Beobachtungssammlung ICQ verglichen [2]. Durch eine im gewählten Koordina-

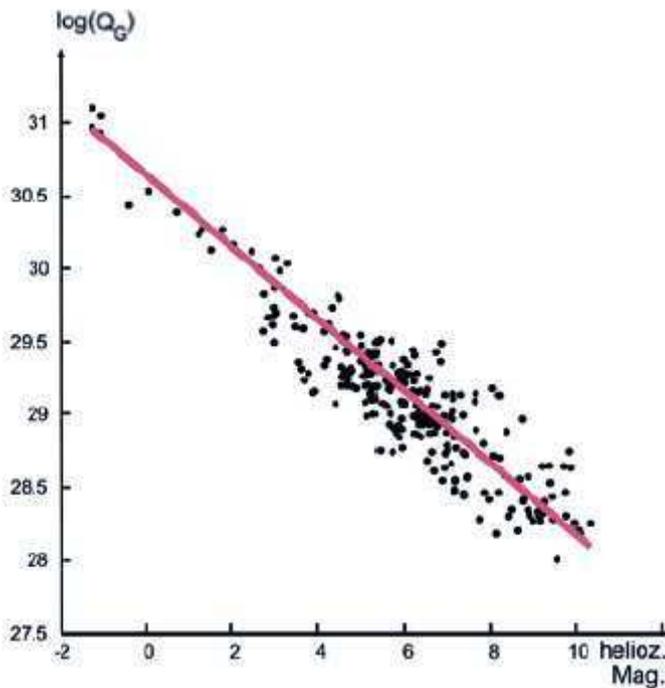
tensystem lineare Korrelation lässt sich eine gute Übereinstimmung der Gasentwicklung mit der heliozentrischen Helligkeit erzielen (Abb. 1). Die heliozentrische Helligkeit ist die Helligkeit eines Kometen, mit welcher er bei einem heliozentrischen Abstand von 1 AE zu sehen wäre. Aus der heliozentrischen Helligkeit des Kometen ist also die Wasserproduktionsrate ermittelbar.

Aber eine solche Berechnung impliziert zwei Annahmen:

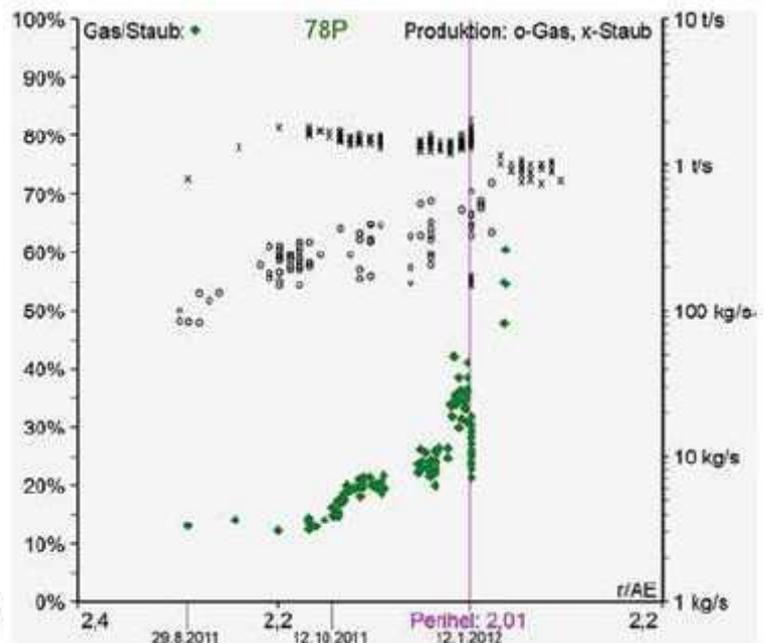
1. Der Zusammenhang zwischen heliozentrischer Helligkeit und Wasserproduktion ist nicht vom Sonnenabstand r abhängig.
2. Die Wasserproduktion korreliert mit der Emission bestimmter Linien. Damit diese Emission genügend gut mit der Gesamthelligkeit korreliert, muss einerseits ein direkter Zusammenhang zwischen der OH-Emission (die auf Wasser hinweist) mit den C2-Linien (die visuell aus dem Kontinuum des

Spektrums hervortreten) gegeben sein. Andererseits, und das ist viel kritischer, muss der Anteil der Emission an der Gesamthelligkeit wenig variabel sein, d. h. alle Kometen werden in erster Näherung als gleich staubreich angenommen.

Der erste Punkt scheint nicht auf den ersten Blick einsichtig zu sein. Gasentwicklung erzeugt eine entsprechend große Koma, und diese wird von der Sonne beleuchtet/angeregt. Eine geringere Sonnenentfernung entspricht einer helleren Lichtquelle, so dass eine gleichgroße Gasentwicklung in Sonnennähe auch zu einer größeren Helligkeit führen müsste. Es gibt aber einen zweiten Effekt – der Einfluss des Strahlungsdrucks und des Sonnenwindes auf den Komadurchmesser. Bei gleicher Produktionsrate entstehen bei sonnennahen Kometen kleinere Komae. Es kann gezeigt werden, dass sich beide Effekte ausgleichen: Im selben Maß, wie die Beleuchtungsstärke wächst,



1 Zusammenhang von heliozentrischer Helligkeit und Gasproduktionsrate in Molekülen je Sekunde nach [2].



2 Gas- und Staubproduktion des Kometen 78P/Gehrels während des Perihels 2011/2012

wird der Komadurchmesser geringer. Aus diesem Grund ist es überhaupt möglich, heliozentrische Helligkeiten direkt mit der Wasserproduktion zu verknüpfen.

Der zweite Punkt hingegen ist eine Annahme, die weniger eng mit realen Verhältnissen verknüpft ist. Sie nimmt eine uniforme Zusammensetzung aller Kometenkerne an.

Ray Newburn hat herausgefunden, dass die C₂-Emission tatsächlich proportional zur Wasserdampferzeugung ist [2]. Bei einem Kometen fester Zusammensetzung lässt sich der Anteil des Staubes in Sonnennähe durch eine quadratische, in Sonnenferne durch eine kubische Funktion über dem Sonnenabstand beschreiben. Damit wird eine Korrektur der Gasproduktion um den im Bahnverlauf wechselnden Staubanteil möglich. Das Problem wechselnder Zusammensetzung bleibt erst einmal bestehen. Es ist jedoch zu bemerken, dass dieser Fehler nicht in voller Höhe eingeht, da Schätzungen über die Staubproduktion an dieser Stelle zur Korrektur der Gasproduktion benötigt werden und nicht für sich selbst stehen.

Elisabeth Roettger [3] hat die Newburnschen Erkenntnisse dazu benutzt, eine verbesserte Formel zur Gasproduktion anzugeben. Diese beruht z. T. auf phy-

sikalischen Modell-Annahmen, enthält allerdings einige empirische Konstanten. Damit ähnelt ihr Ansatz de facto dem von Jorda, jedoch wird die Staubproduktion besser berücksichtigt. Mit diesen Gleichungen im Kasten 1 lässt sich rechnen. Dies wurde des Weiteren an vier Kometen mit gutem Ergebnis erprobt.

Bestimmung der Staubproduktion

An der Oberfläche des Kometenkerns werden Gas und Staub gemeinsam er-

zeugt. Beide Bestandteile bewegen sich nach außen, getrieben durch die Bewegungsenergie (kinetische Energie) der Gasteilchen, die auf die Staubkörner Druck ausüben. Die Geschwindigkeit der Gasmoleküle wird durch die Sublimationstemperatur (Verdampfungstemperatur) bestimmt. Staubteilchen hingegen werden erst durch Zusammenstöße mit Gasteilchen beschleunigt. Dies führt dazu, dass die Kometenatmosphäre in der Nähe des Kerns besonders staubreich ist. Der Staub

Kasten 1

Sonnennähe, $r < 1.25$ AE

$$Q_G = \frac{1,49 \cdot 10^{36} \cdot 10^{-0,2m}}{\sqrt{1+0,416r^2}} \quad (\text{langperiodisch}) \text{ bzw.}$$

$$Q_G = \frac{2,11 \cdot 10^{36} \cdot 10^{-0,7m}}{\sqrt{1+0,410r^2}} \quad (\text{kurzperiodisch})$$

Sonnenferne, $r > 1.25$ AE

$$Q_G = \frac{1,49 \cdot 10^{36} \cdot 10^{-0,2m}}{\sqrt{1+0,333r^3}} \quad (\text{langperiodisch}) \text{ bzw.}$$

$$Q_G = \frac{2,11 \cdot 10^{36} \cdot 10^{-0,2m}}{\sqrt{1+0,333r^3}} \quad (\text{kurzperiodisch})$$

Gasproduktion Q_G in Moleküle pro Sekunde, heliozentrische Helligkeit m in mag, Sonnenabstand r in AE.

bewegt sich langsamer. Der Parameter $Af\rho$ ist deshalb ein gutes Maß für die Staubproduktion [4]. Er beruht auf photoelektronischen Helligkeitsmessungen im inneren, staubreichen Teil der Koma.

Philippe Rousselot [5] hat sich darum bemüht, aus $Af\rho$ eine Obergrenze für die tatsächliche Staubeentwicklung abzuleiten. Dazu musste er Annahmen zu drei unbekanntem Parametern treffen:

- die Größe der Staubkörnerchen
- ihre Albedo
- und die radiale Geschwindigkeit des Staubes

Rousselot sah es als realistisch an, dass die Staubkörner einen Durchmesser vom $1\ \mu\text{m}$ haben. Diese Annahme ist plausibel – das Licht der Kometenatmosphäre wird hauptsächlich von den kleinsten verfügbaren Teilchen erzeugt, weil nur diese eine genügen große Geschwindigkeit erreichen können, um erheblich zur Koma beizutragen. Die Korngrößenverteilung (kleine neben größeren Staubteilchen) wird dabei ignoriert. Die Albedo (das Licht-Reflexionsvermögen) wird auf 5 % geschätzt, was ebenfalls ein realistischer Wert sein dürfte. Die radiale Geschwindigkeit des Staubes weg vom Kern steigt mit der Entfernung zum Kern und erreicht schnell 75 % der Geschwindigkeit des abströmenden Gases. Armand Delsemme [6] hat in seinem Buchbeitrag die Erkenntnisse zur Radialgeschwindigkeit von Gas und Staub zusammengefasst. Die Geschwindigkeit ist gemäß den Simulationen zur Gasdynamik abhängig von der Sublimationsrate, und damit in erster Näherung vom Sonnenabstand (s. Kasten 2).

Kasten 2

Sonnennähe, $r < 3\ \text{AE}$: Es wird hauptsächlich Wasser produziert

$$Q_S = 2.90 \frac{Af\rho}{\sqrt{r}}$$

Sonnenferne, $r > 3\ \text{AE}$: Es wird hauptsächlich Kohlenmonoxid produziert

$$Q_S = 2.32 \frac{Af\rho}{\sqrt{r}}$$

Staubproduktion Q_S in kg/s, Sonnenabstand r in AE,

Berechnung des Gas-Staub-Verhältnisses
Einige Autoren verwenden das Verhältnis zwischen der Produktionsrate von Wasser (in Molekülen pro Sekunde) und dem Parameter $Af\rho$ als ein Maß für das Gas-Staub-Verhältnis. Dies mag berechtigt sein, führt aber zu unanschaulichen Größen. Mit Hilfe der Rousselotschen Formel kann man das Verhältnis der Produktionsraten für Gas und Staub direkt angeben. Dazu wird die Gaserzeugungsrate von Molekülen pro Sekunde mit Hilfe der molaren Masse in Kilogramm pro Sekunde umgerechnet. Sowohl die Bestimmung der Gas- als auch die der Staubproduktion enthalten Unsicherheiten. Diese beziehen sich weitgehend auf die unbekanntem Zusammensetzung des jeweiligen Kometen. Das Gas-Staub-Verhältnis wird durch diese Unsicherheiten zwar beeinflusst, dennoch wird die Änderung des Verhältnisses im Bahnverlauf ziemlich gut wiedergegeben, da sich die Zusammensetzung des verdampfenden Materials nur wenig ändert.

Literaturhinweise

- [1] I. Jorda, J. Crovisier, D.W.E. Green, 2008: "The correlation between visual magnitudes and water production rates", *ACM 2008*, 8046
- [2] R.L. Newburn, 1983: "Modeling the neutral gas environment of comets with special application to P/Halley", *Adv. Space Res.* 4, 185
- [3] E.E. Roettger, P.D. Feldman, M.F. A'Hearn, M.C. Festou, 1990: "Comparison of water production rates from UV spectroscopy and visual magnitudes for some recent comets", *Icarus* 86, 110
- [4] U. Pilz, B. Häusler, 2012: "Der Parameter $Af(\rho)$ ", *VdS-Journal für Astronomie* 42
- [5] P. Rousselot, 2008: "147P/Echeclus: A strange case of outburst", *Astron. Astrophys.* 480, 543
- [6] Delsemme, 1982: in: L.L. Wilkening (Hrsg.), "Comets", University of Arizona Press, 85