

Uwe Pilz, Bernhard Häusler.

Visuelle und CCD-Photometrie von Kometen: Angleich der Messwerte durch die Multiapertur-Methode.

Problem

Es ist seit langem bekannt, dass elektronisch gemessene Kometenhelligkeiten erheblich von visuellen Schätzungen abweichen. Meist sind CCD-Werte deutlich bis erheblich schwächer. Insgesamt liefern visuelle Messungen eine homogenere Kurve. Allerdings liegt die Grenze für solche Bestimmungen bei etwa 14 mag, dann sind die Schweifsterne zu schwach, um in üblichen Amateurinstrumenten gesehen zu werden. Die Reichweite der elektronischen Messungen ist viel größer, so dass die Lichtkurven erweitert werden könnten, wenn es gelänge, die Messungen zu harmonisieren.

Eine nähere Betrachtung der CCD-Photometrie zeigte, dass Abweichungen zu visuellen Werten durch eine lange Aufnahmebrennweite begünstigt werden [1]. Dadurch wird das Abbild der Koma sehr groß und diese kann durch die etablierten Auswerteprogramme nicht angemessen berücksichtigt wird. Zur Auswertung der Helligkeit muss der zu berücksichtigende Himmelsausschnitt gewählt werden. Je größer dieser ist, desto mehr wachsen die Probleme mit dem Himmelshintergrund. Insbesondere in das Messfeld eingebettete Sterne bereiten Schwierigkeiten. Aus diesem Grund wählen viele Beobachter ein Messfeld ("Apertur") von nur 10 Bogensekunden. Mit dieser Festlegung wurde erst einmal eine Vergleichbarkeit der CCD-Messungen untereinander erreicht. Die Koma hellerer Kometen hat jedoch eine visuelle wahrnehmbare Größe im Bogenminutenbereich, so dass das CCD-Messfeld eine große Diskrepanz zu visuellen Bestimmungen begründet. Zur CCD-Auswertung wird meist das Programm „Focas“ der spanischen Amateure benutzt [2]. Es gestattet ohne großen Aufwand Multi-Apertur-Messungen: Es werden jeweils 6 Messungen zwischen 10 und 60 Bogensekunden Apertur ausgeführt. Wir haben versucht, mit Hilfe solcher Messungen Helligkeiten zu erhalten, die den visuellen nahekommen: Sogenannte visuell-äquivalente Helligkeiten.

Theoretischer Ansatz

Ausgangspunkt meiner Betrachtungen war die Frage: Wie ändert sich die gemessene Kometenhelligkeit bei wachsender Apertur? Wir betrachten den stationären Fall, also einen Kometen, dessen Sonnenentfernung sich für eine gewisse Zeit nicht wesentlich ändert. Dann stellt sich auf der Oberfläche des Kometenkerns ein thermisches Gleichgewicht ein, die aufgenommene Energie wird in Verdampfungswärme umgesetzt und führt zu einer konstanten Oberflächentemperatur. Diese Temperatur legt die mittlere kinetische Energie der Gasteilchen fest, welche den Kern verlassen. In Bild 1 ist dies schematisch dargestellt. In Wirklichkeit haben nicht alle Teilchen dieselbe Geschwindigkeit, sondern sie bilden ein Geschwindigkeitsspektrum. Aber auch in diesem Fall bewegen sich die Teilchen in einem Zeitschritt um einen bestimmten Betrag nach außen. Im Modell wurden hierzu Schalen in die Kometenatmosphäre gelegt. Jede Schale enthält dieselbe Menge Teilchen, und dies setzt sich gemäß dem gewählten Modell unbegrenzt fort. Wenn solch ein Komet existierte, dann würden wir feststellen, dass sich die rückgestrahlte Energie linear mit der Apertur bzw. dem im Modell benutzten Radius erhöht. In Wirklichkeit wird die Kometenatmosphäre durch den Strahlungsdruck und den Sonnenwind zerstreut. Wir halten aber fest: Im Inneren der des Koma ist der Zusammenhang zwischen Apertur und bestimmter Helligkeit linear.

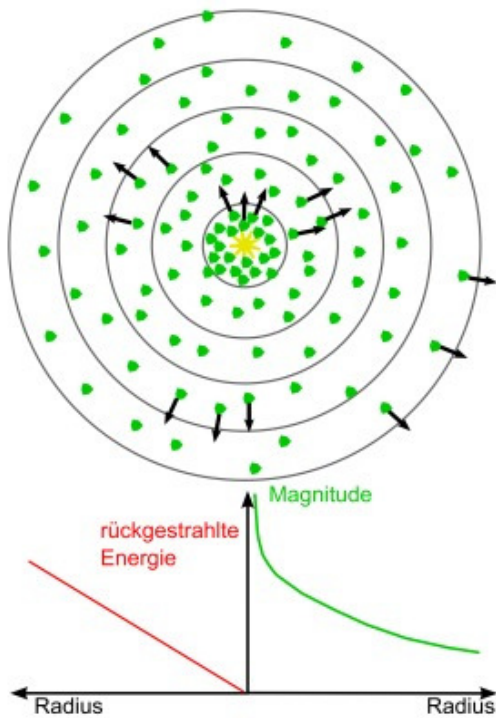


Bild 1: Helligkeitsverhalten eines stationär gedachten Kometen bei ungestörter Komaentwicklung.

Bild 2 zeigt eine eher realistische Situation: Die Kometenatmosphäre wird zerstreut. Dieser Effekt ist nach außen hin stärker, da die äußeren Komabereiche dem Sonnenwind eine größere Angriffsfläche bieten. Je weiter wir vom Kern wegkommen, desto dünner wird die Atmosphäre. Diese äußeren Teile tragen immer weniger zum Gesamtleuchten des Schweifsterns bei, bis schließlich in einiger Entfernung kein messbarer Beitrag mehr geliefert wird. Dadurch strebt die Helligkeit einem Grenzwert zu.

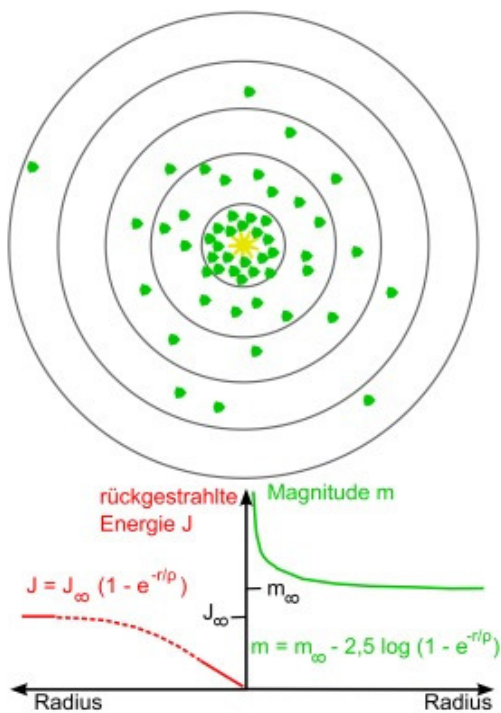


Bild 2: Helligkeitsverteilung eines stationär gedachten Kometen unter Einfluss des Strahlungsdruckes und des Sonnenwindes.

Auch aus CCD-Beobachtungen kann man diesen Grenzwert bestimmen, wenn man ein plausibles Modell für den Zusammenhang Radius r bzw. der Apertur A und rückgestrahlter Energie J findet. Das Modell arbeitet mit dem Komaradius. Die Apertur entspricht dem doppelten Komaradius.

Ein einsetzbares Modell muss zwei Bedingungen genügen:

- Bei kleinem r ist J proportional r
- Für große r strebt J dem Grenzwert J_∞ an

Derartige Angleichungsvorgänge sind in der Natur häufig. Sie werden üblicherweise mittels einer Exponentialfunktion beschrieben, die im Bild angegeben ist. Neben dem Grenzwert J_∞ kommt ein weiterer Parameter hinzu, nämlich der sogenannte charakteristische Radius ρ . Dieser Wert gibt den Punkt an, bei dem gilt $J(r) = 0,63 J_\infty$. Mit der Apertur $A = 2 \rho$ werden also 63% der Gesamtstrahlung erfasst. Das Modell lässt sich auch in Magnituden umrechnen, der Zusammenhang sieht dann etwas komplizierter aus. An die Stelle des Grenzwertes J_∞ tritt die Grenzmagnitude m_∞ . Diese erfasst die Strahlung der gesamten Koma und befindet sich damit in guter Übereinstimmung mit der visuellen Photometrie. Somit kann m_∞ als Äquivalenzmagnitude benutzt werden.

Auswertung von Messungen

Ausgangspunkt für die Bestimmung der visuell-ähnlichen Helligkeit ist die Berechnung der Magnituden für verschiedene Aperturen. Dieses Vorgehen wird als "Multi-Apertur-Methode" bezeichnet. Wenn dann mehrere Messwertpaare (J,r) bzw. (m,r) vorliegen, dann kann man mathematisch eine Kurve bestimmen, welche möglichst gut durch die vorhandenen Messwerte läuft. Die Grenzhelligkeit m_∞ und der charakteristische Radius ρ müssen so gewählt werden, dass eine "bestmögliche Passform" erreicht wird (Bild 3). Das mathematische Verfahren hierzu ist die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, die von Gauß entwickelt wurde. Dieser Rechenansatz kann in vielen Lehrbüchern nachgelesen werden, z.B. in [3].

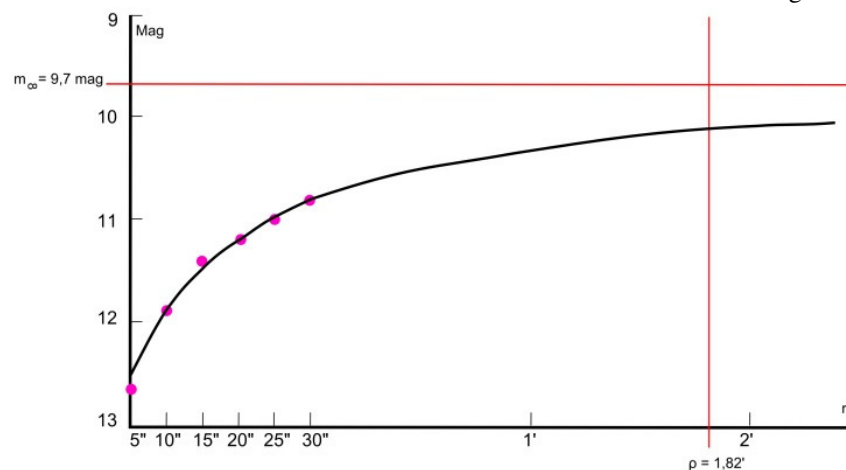


Bild 3: Ausgleichsrechnung zur Bestimmung der Äquivalenzhelligkeit m_∞ und des charakteristischen Radius ρ am Beispiel des Kometen 81P/Wild, Beobachtungsdatum: 7. März 2010

Ich habe das Programm „Kphot“ geschrieben, welches auf unser Problem zugeschnitten ist. Es prüft nebenbei die Güte der "Passform" und verhindert die Ausgabe von unplausiblen Werten. Diese entstehen, wenn die Messungen nur den inneren, weitgehend linearen Teil der Koma überdecken und eine Krümmung zum Grenzwert nicht zu entnehmen ist. Es müssen dann Messungen mit größerer Apertur hinzugefügt werden. Das Programm „Focas“ unterstützt die Ausgabe von sechs Wertepaaren mit Aperturen zwischen 10 und 60 Bogensekunden. Das Programm „Kphot“ verarbeitet diese Liste automatisch und erstellt eine Ergebniszeile, die den ICQ-Anforderungen an visuelle Einsendungen [4] genügt. Die Methode zur Bestimmung der Magnitude ist natürlich beim Internationalen Kometenzentrum nicht vorgesehen. Deshalb wählte ich den nicht belegten Buchstaben "Z". Die Fachgruppe Kometen publiziert visuell-ähnliche Helligkeiten auf ihrer Beobachtungsseite [5] und im Beobachtungsarchiv [6].

Ergebnisse und Nutzen

Auf unserem Fachgruppentreffen im November 2009 habe ich angeregt, dass wir Kometenfreunde uns damit beschäftigen, visuelle und elektronisch bestimmte Helligkeiten anzugleichen. In Anlehnung an die frühere Tradition der Projektkometen wurden zwei Schweifsterne in das Zentrum der Untersuchungen gerückt: C/2007

Q3 (Siding Spring) und 81P/Wild. Zwei Fachgruppenmitglieder, Bernhard Häusler und Thorsten Zilch, beschäftigten sich intensiv mit der Multi-Apertur-Methode, so dass jetzt erste Ergebnisse vorliegen. Die Bilder 4 und 5 zeigt die visuellen Helligkeiten der Projektkometen im Vergleich mit den Äquivalenzhelligkeiten. Die Übereinstimmung ist bei 81P sehr gut. Bei C/2007 Q3 befinden sich alle Äquivalenzhelligkeiten am unteren Rand des durch visuelle Werte abgedeckten Bereiches. Insgesamt stimmen diese Ergebnisse zuversichtlich: Das herkömmliche verfahren ergibt Abweichungen von bis zu 3 Magnituden für ausgedehnte Kometen.

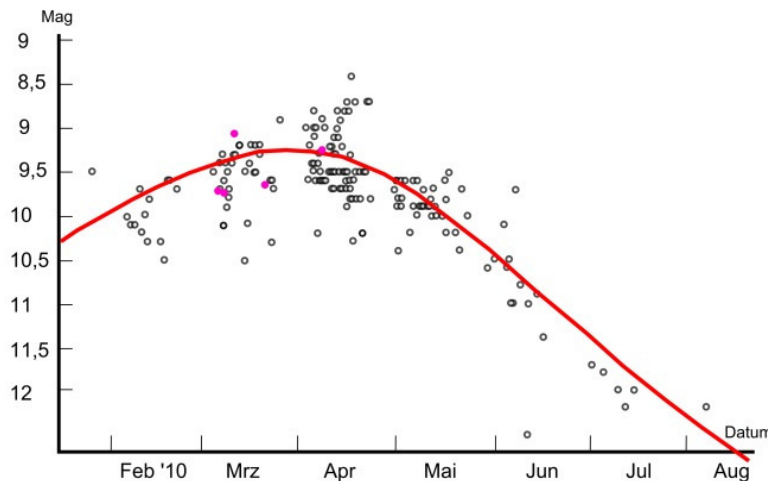


Bild 4: Komet 81P/Wild: Visuelle Photometrie (198 Messungen) und Äquivalenzhelligkeiten (5 Messungen). Die Helligkeitsentwicklung lässt sich durch die Formel $m = 8,5^m + 5 \times \log D + 7,5 \times \log R$ beschreiben (rote Linie).

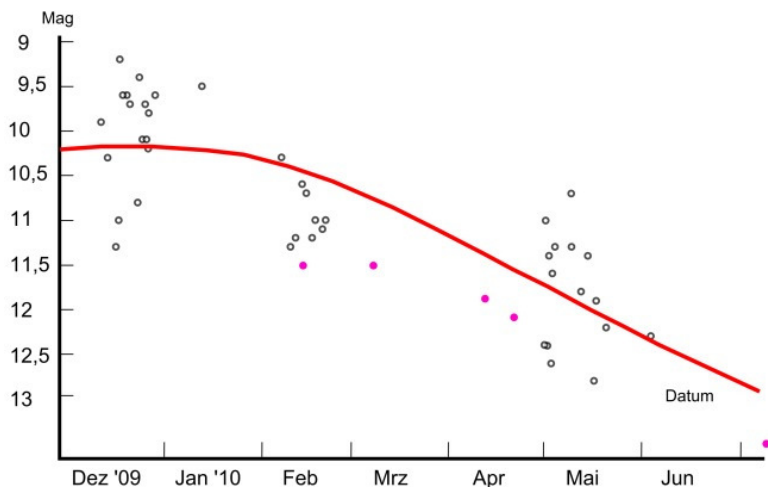


Bild 5: Komet C/2007 Q3: Visuelle Photometrie (43 Messungen) und Äquivalenzhelligkeiten (5 Messungen). Die Helligkeitsentwicklung lässt sich durch die Formel $m = 4,7^m + 5 \times \log D + 9,4 \times \log R$ beschreiben (rote Linie).

Der Nutzen liegt einerseits darin, dass "dünne" Lichtkurven durch elektronische Messungen ergänzt werden (Bild 6). Ebenso wichtig ist die Möglichkeit einer homogenen Fortsetzung der visuellen Photometrie in die Helligkeitsbereiche jenseits von 12-14 mag. Dort werden visuelle Bestimmungen schwierig, wogegen die Probleme der elektronische Messungen abnehmen, da die Kometen nicht mehr so ausgedehnt sind. Die gesamte auswertbare Lichtkurve eines Kometen verläuft über einen viel größeren Bahnabschnitt, was die daraus ableitbaren Werte zur Aktivität und ggf. zur Zusammensetzung sicherer machen kann.

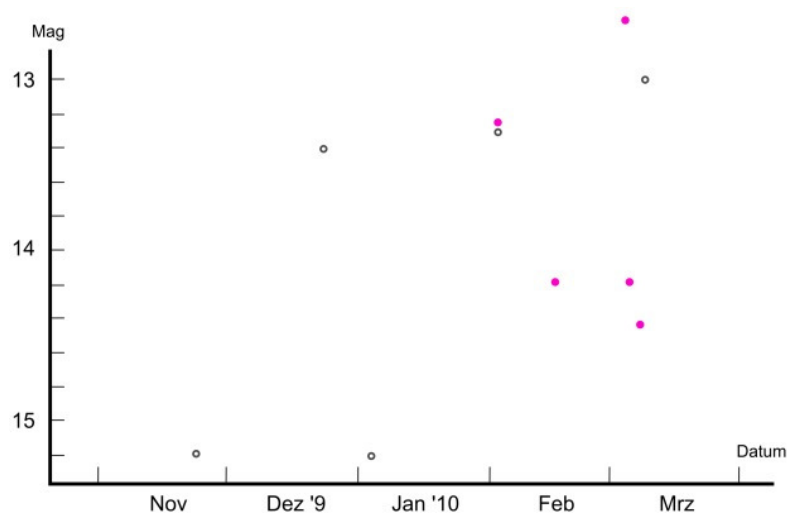


Bild 6: Komet 30P/Reinmuth: Visuelle Photometrie (4 Messungen) und Äquivalenzhelligkeiten (5 Messungen).

Ausblick

Unsere ersten Ergebnisse zur visuell-ähnlichen Photometrie mit CCD-Kameras scheinen aussichtsreich. Es ist jedoch notwendig, das Verfahren besser kennenzulernen und ggf. zu modifizieren. Um die Äquivalenzhelligkeiten "in eine Reihe" mit visueller Photometrie stellen zu können, müssen wir besser als heute wissen, unter welchen Umständen wir diesen Rechenergebnissen auch vertrauen können. Wichtig hierfür ist es, dass Multiaperturmessungen für hellere Kometen (heller 12 mag visuell) in größerer Zahl zur Verfügung stehen. Wir rufen alle Kometenfreunde und Veränderlichenbeobachter auf, sich an dieser Datensammlung zu beteiligen. Bernhard Häusler ist gern bereit, eine Hilfestellung bei der Arbeit mit den Auswerteprogrammen zu geben.

Literatur

- [1] Mikuz, H., Dintinjana, B., 2001. CCD Photometry of Comet C/1995 O1 Hale-Bopp, ICQ 23, 6-16.
- [2] http://astrosurf.com/cometas-obs/_Articulos/Focas/Focas.htm (Stand: 17.9.2010)
- [3] Ludwig, R., Methoden der Fehler- und Ausgleichsrechnung, 1982, Vieweg-Verlag.
- [4] <http://www.cfa.harvard.edu/icq/ICQFormat.html> (Stand: 22.9.2001)
- [5] <http://kometen.fg-vds.de/obsaktinh.htm>
- [6] <http://kometen.fg-vds.de/archiv.htm>