

# Die fernsten Objekte eines Amateurfotografen (II)

von Wolfram Fischer

## Die mathematische Entfernungsprojektion realer Galaxien

Der Artikel „Die fernsten Objekte eines Amateurfotografen (I) im Heft 24/1994 gab das theoretische Rüstzeug, um sich der Beantwortung der Frage nach den fernsten erreichbaren Galaxien zu nähern. Bedienen wir uns dazu eines gedanklichen Experimentes und nutzen die Methode der mathematischen Entfernungsprojektion. Diesmal jedoch nicht an einem fiktiven Objekt. Wir rücken einige nahe Galaxien mathematisch in eine Entfernung, in der diese im Bereich der Auflösungsgrenze unserer Kamera erscheinen würden. Diese wollen wir linear mit 0,03 mm annehmen. Uns interessiert die dazu nötige Entfernung und die daraus resultierende Gesamthelligkeit der Nebel. In der Tabelle im Heft 24/1994 (S. 37) wurde dies, bezogen auf die Brennweite der Schmidt-Kamera des Verfassers (356 mm), für drei bekannte Riesengalaxien bestimmt. Galaxien dieser Größe sind aufgrund ihrer enormen Leuchtkraft am weitesten entfernt fotografisch abbildbar. Die zur Rechnung erforderliche scheinbare Flächenausdehnung  $F$  (in  $\square''$ ) der Objekte wurde nach der Formel

$$F = a \cdot b \cdot \frac{\pi}{4}$$

bestimmt, wobei  $a$  und  $b$  die Katalogwerte der Durchmesser (Grenzisophote  $25^m/\square''$ ) der großen bzw. kleinen Achse

### Tabelle

| Galaxie | a     | b        | r                     | $B_1$    |
|---------|-------|----------|-----------------------|----------|
| M 31    | 178'  | 63'      | $2 \cdot 10^6$ Lj.    | $4^m.4$  |
|         | 0,074 | 0,026 mm | $500 \cdot 10^6$ Lj.  | $16^m.4$ |
|         | 0,037 | 0,013 mm | $1000 \cdot 10^6$ Lj. | $17^m.9$ |
| M 101   | 26,9' | 26,3'    | $24 \cdot 10^6$ Lj.   | $8^m.2$  |
|         | 0,042 | 0,041 mm | $1600 \cdot 10^6$ Lj. | $17^m.3$ |
|         | 0,031 | 0,030 mm | $2200 \cdot 10^6$ Lj. | $18^m.0$ |
| M 87    | 7,2'  | 6,8'     | $63 \cdot 10^6$ Lj.   | $9^m.6$  |
|         | 0,039 | 0,037 mm | $1200 \cdot 10^6$ Lj. | $16^m.0$ |
|         | 0,032 | 0,030 mm | $1500 \cdot 10^6$ Lj. | $16^m.5$ |

sind [1]. Die Form der Galaxien wird dabei vereinfacht als elliptisch angesehen. In der Tabelle stehen in der ersten Zeile für drei ausgewählte Galaxien die aus der Literatur entnommenen Ausgangswerte. Die Galaxien wurden dann in jeweils zwei größere Entfernungen versetzt, so daß ihre Durchmesser in der Nähe der Auflösungsgrenze liegen. Die Entfernung von M87, der mit M49 leuchtstärksten Zentralgalaxie des Virgoaufens, wurde aus dem Mittelwert der Radialgeschwindigkeiten (RV) der 151 hellsten Systeme des Haufens ermittelt ( $RV = 1071 \text{ km/s}$ ,  $H = 55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ).  $B$  ist wieder die Gesamthelligkeit der Galaxien in der Entfernung  $r$ .

Die Fixsterngrenzgröße obiger Kamera liegt bei ca.  $B = 16^m$ . Dies gilt für günstige mitteleuropäische Beobachtungsbedingungen und Sternabbildungen bis 0,03 mm Durchmesser. Daraus geht hervor, daß selbst diese hellen Galaxien in einer Entfernung, in der sie nah der Auflösungsgrenze erschienen, in fast allen Fällen zu schwach für die Kamera wären. Nur M87 könnte bei 0,04 mm Abbildungsgröße eventuell noch nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis bedingt einen Konflikt. Einerseits kann keine Kamera Sterne (oder Objekte mit analoger Gesamthelligkeit) abbilden, die schwächer als die Grenzgröße sind. Andererseits bleibt die Flächenhelligkeit eines Nebels, bezogen auf  $1 \square''$ , in jeder Entfernung erhalten. Es fragt sich, kann ein Nebel mit 0,04 mm Ausdehnung gerade noch als flächenhaft aufgelöst gelten und wenn ja, erzeugte selbiger nicht doch eine entsprechende fotografische Schwärzung? Um die Fragen mit ja beantworten zu können und um den Konflikt zu vermeiden, müßten als Untersuchungsgegenstand keine realen Galaxien, sondern vollkommen gleichmäßig leuchtende, kreisförmige Flächen gegeben sein.

## Die Vielfalt der Galaxien und Auswirkungen auf die fotografische Abbildung

Unserer bisherigen Betrachtungsweise der Galaxienwelt lag eine prinzipielle Vereinfachung zugrunde. Den Objekten wurden stillschweigend homogen verteilte Flächenhelligkeiten unterstellt. Diese resultieren aus den geschilderten Rechnungen, in Form mittlerer Flächenhelligkeiten.

Die größten mittleren Flächenhelligkeiten finden sich bei Kompaktgalaxien und elliptischen Systemen. Bei ersteren bis  $19^m/\square''$ . Der elliptische Riese M87 besitzt  $22^m \ 5/\square''$ . In der Typenfolge E, SO, Sa, Sb, Sc bis zu den Zwerggalaxien und Sphäroidals verringern sich die mittleren Flächenhelligkeiten (M31, Sb,  $23^m \ 5/\square''$ , M101, Sc,  $24^m/\square''$ , Sphäroidals bis  $26^m/\square''$ ). Im Bereich der Flächenhelligkeiten gilt es, sich an sehr geringe Werte zu gewöhnen. Der Vergleich der mittleren Flächenhelligkeiten ist ein wichtiger Anhaltspunkt für die Nachweisbarkeit der Objekte. In Wirklichkeit besitzt aber eine Galaxie ganz unterschiedliche Flächenhelligkeiten. Die Abnahme der Helligkeit vom Zentrum nach außen ist die Regel. Es existieren im Detail vielfältige Differenzierungen. Man spricht vom Helligkeitsprofil. In der Kernregion von Kompaktgalaxien finden sich die größten Flächenhelligkeiten in der Galaxienwelt überhaupt (Werte bis nahe  $17^m/\square''$ ). In der Praxis liegen die beobachtbaren Flächenhelligkeiten in einem Intervall von etwa zehn Größenklassen ( $17-27^m/\square''$ ).

Die Flächenhelligkeitsverteilung (Helligkeitsprofil) in den Galaxien ist von großer Bedeutung für deren Identifizierbarkeit und Nachweisbarkeit (fotografisch und visuell). Viele Galaxien sind großräumig in eine helle Kernregion, von Spiralarman umwunden, gegliedert. Aufnahmen naher Objekte, gewonnen mit großen Teleskopen, zeigen einen großen Reichtum an Strukturen. Neben aufgelösten Einzelsternen treten Sternassoziationen, Sternhaufen, H II-Gebiete z. T. leuchtstark als Flächenhelligkeiten hervor. Zum Strukturereichtum gehören auch die dunklen Zwischenräume zwischen den Spiralarman und Dunkelwolken. Betrachtet man Negative von Galaxien, wird deutlich, daß der weitaus überwiegende Teil der Leuchtkraft von einer wesentlich kleineren Fläche stammt, als die Durchmesserangaben in Katalogen vermuten lassen. Dank empfindlicher photometrischer Meßtechnik können noch winzige Schwärzungen weit außen nachgewiesen werden. Auf normalen fotografischen Kopien ist davon nichts zu sehen. Der äußerst lichtschwache Randbereich steuert, infolge seiner großen Flächenausdehnung, einen nicht unbeachtlichen Teil zur Gesamthelligkeit bei, jedoch kaum etwas

zur Identifizierbarkeit eines Objektes! Beim Andromedanebel M31 ist die visuell erkennbare Region um den Kern oft nur ca. 20' x 8' groß. Die weit ausholenden Spiralarme, das was meist auf Abbildungen sichtbar ist, hat etwa 120' x 30' Abmessung. Sein Durchmesser wird aber bis zu 200' x 90' angegeben!

Leuchtstarke Gebiete, die wesentlich die Identifizierbarkeit einer Galaxie bestimmen, sind insgesamt kleiner als die Katalogwerte und oft fein strukturiert. Was geschieht aber mit Zonen hoher Flächenhelligkeit, die, aufgrund zu großer Entfernung oder zu kurzer Brennweite, in ihrem Abbildungsmaßstab unter der fotografischen Auflösungsgrenze liegen?

Unaufgelöste Flächendetails (z. B. Galaxienkerne) müssen, um zur Abbildung zu kommen, eine Fläche schwärzen, die größer ist als ihre scheinbare Winkelausdehnung. (Gleiches gilt kraß auch bei der Abbildung von Sternen. Deren Oberflächen sind genaugenommen ebenfalls unaufgelöste Flächenhelligkeiten.) Diese Fläche entspricht dem Durchmesser schwächster Sternabbildungen. Beträgt dieser  $\varnothing = 10''$  und hat das Flächendetail nur 2'' Ausdehnung, so müßte es doch  $10'' =$  die 25fache Fläche schwärzen, da das Bild keine größere Schärfe aufweist. Die Folge wäre, daß dieses Flächendetail eine 25 mal geringere Schwärzung, also nur als Punktobjekt mit einer um 3,5 Größenklassen niedrigeren Helligkeit abgebildet werden könnte! Damit sinken unaufgelöste Flächenhelligkeiten schnell unter die Kameragrenzgröße. Das Gesetz des Erhaltes der Flächenhelligkeit (in jeder Objektentfernung bzw. bei jeder Brennweite) gilt nur für aufgelöste Flächen! Unaufgelöst verschmieren die Details und die Schwärzung gleicht, je kleiner das Objekt ist, zunehmend der mittleren Flächenhelligkeit. Damit werden ferne Objekte mit kurzen Kamerabrennweiten, trotz flächenhafter Gesamtabbildung doch oft nur schwächer geschwärzt. Dies gilt besonders für langgestreckte Objekte, da deren Querausdehnung schnell unter die Auflösungsgrenze sinkt. Entsprechend gering ist die Reichweite. An Großteleskopen können diese Objekte, dank flächenhaft aufgelöster heller Einzelstrukturen, prächtig hervortreten. Kurze Brennweiten wirken hingegen integrierend. Die Galaxie M101, bei 0,04 mm Abbildungsgröße und einer mittleren Flächenhelligkeit von  $24^m/\square''$ , würde in den schwachen, örtlich begrenzten Dichteschwankungen der Hintergrundschwärzung, die aus der chaotischen Verteilung der Silberhalogenid-Kristalle in der Emulsion herrühren, untergehen. Derart geringe Schwärzungsdichteunterschiede, die der mindestens  $24^m/\square''$  hellen Hintergrundschwärzung aufgeprägt sind, können nur als größere Flächengebilde, quasi als Abweichung vom statistischen Mittel, von zufälligen Kornballungen, sicher unterschieden werden.

*Bild 1: „Zentralgebiet des Coma-Galaxien-Superhaufens“. Die 16fach vergrößerte Aufnahme zeigt eine große Zahl von Galaxien im Bereich der Nachweisgrenze. Die gekennzeichneten Objekte sind:*

*1 = NGC 4889,  $B_i = 12^m 45,2$  = NGC 4898,  $B_i = 14^m 5$ , 3 = NGC 4894,  $B_i = 15^m 5$ , 4 = NGC 4921,  $B_i = 13^m 0$ , 5 = NGC 4923,  $B_i = 14^m 55$ , 6 = NGC 4919,  $B_i = 14^m 9$ , 7 = NGC 4911,  $B_i = 13^m 6$ .  
Aufgenommen mit Schmidt-Kamera 200/240/356, Lumicon Deep-Sky-Filter, hypers. Kodak TP 2415-Film, belichtet am 24. 2. 1990 von 0.59–1.24 Uhr MEZ bei sehr gutem Himmel.*

*Foto: Wolfram Fischer, Sternwarte Sohland*

## Die Identifikations- und Nachweisgrenze von Galaxien

Galaxien, die beim Anblick des Negativs sternförmig erscheinen, besitzen bei genauer Messung meist doch eine flächenhafte Ausdehnung (wegen des nicht ohne weiteres sichtbaren Randbereichs). Objekte mit einer tatsächlichen Abbildungsgröße nahe

der Auflösungsgrenze sind in der Regel nicht mehr zu erkennen. Dies hängt letztlich mit dem grundsätzlich verschiedenen Charakter von Punkt- und Flächenhelligkeiten zusammen. Galaxien weisen im allgemeinen, im Vergleich zu einem gleichhellen Stern, ein niedrigeres Helligkeitsprofil auf. In Fällen hoher mittlerer Flächenhelligkeit ist eine Abbildung nahe der Auflösungsgrenze unter Umständen gerade noch möglich. Derartige Abbildungen (im Bereich der

Nachweisgrenze) sind jedoch überhaupt nicht von schwächsten Sternen zu unterscheiden. Man benötigt zur Identifizierung eine weiterreichende Vergleichsaufnahme. Obwohl kompakte und elliptische Systeme bei sehr geringen Abbildungsgrößen noch nachweisbar sind, kann man gerade diese (wegen ihres Aussehens) schlecht von Sternen unterscheiden. Die Identifikationsgrenze liegt besonders niedrig (bei  $f=356$  mm im Bereich  $B_i=12\text{--}13^m$ ). Nach der praktischen Erfahrung an der Schmidt-Kamera 200/240/356 können mit dem Gerät, je nach emulsionsbedingter Auflösung von 0,03 oder 0,02 mm, Spiralnebel gerade noch bis in den Bereich  $B_i=14\text{--}15 - 15^m 0$  von Sternen unterschieden werden. Es läßt sich verallgemeinernd feststellen, daß die Galaxiengrenzgröße (Identifikationsgrenze) mindestens 1,5 Größenklassen niedriger als die Fixsterngrenzgröße angesetzt werden muß. Nur Kompaktgalaxien sind in ihrem Helligkeitsprofil Punktlichtquellen schon sehr ähnlich. Bei Objekten mit geringer Flächenhelligkeit liegt die Grenze weit darunter.

Gehen wir von einer Identifikationsgrenzgröße bei  $f = 356$  mm von  $B_i=14\text{--}15$  aus, so würde die Galaxie M101 diese in  $440 \cdot 10^6$  Lj. Entfernung aufweisen ( $\sigma = 87''$ , Abbildungsgröße = 0,151 mm). M31 erreichte  $B_i=14\text{--}15$  in  $230 \cdot 10^6$  Lj. Entfernung ( $\sigma = 101'' \times 35''$ , Abbildungsgröße =  $0,175 \times 0,06$  mm). Die Galaxie M87 wäre in  $630 \cdot 10^6$  Lj. Entfernung  $B_i=14\text{--}15$  schwach, könnte aber als fast kreisförmiges elliptisches System nur bis etwa zur halben Entfernung identifiziert werden ( $B = 13^m$ ,  $\sigma = 88'' \times 81,2''$ , Abbildungsgröße =  $0,152 \times 0,14$  mm).

Daß die errechneten Werte dieser in die Ferne projizierten Riesengalaxien in etwa die Identifikationsreichweite der Schmidt-Kamera 200/240/356 in der Realität widerspiegeln, zeigt ein Nachschlagen in Katalogen. Tatsächlich weisen eine große Zahl der Galaxien mit Helligkeiten zwischen

$B_i=14\text{--}15 - 14\text{--}18$  Radialgeschwindigkeiten zwischen 4000 und 8000 km/s auf. Dies entspricht, unter Annahme einer Hubble-Konstante von  $H = 55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ , Entfernungen zwischen etwa  $(230 - 460) \cdot 10^6$  Lj. Der Coma-Galaxienhaufen, mit etwa 10000 Sternsystemen, ca.  $390 \cdot 10^6$  Lj. entfernt, enthält 37 leuchtstarke Mitglieder der Helligkeiten zwischen  $B_i=12\text{--}15 - 14\text{--}18$ .

## Quasare – die fernsten Objekte überhaupt

Daß für die Nachweisbarkeit von Objekten in unvorstellbaren Entfernungen viel weniger die Größe des Instrumentes ausschlaggebend ist als die gewaltigen Strahlungsenergien der Quellen, beweist sich besonders bei den Quasaren. Es handelt sich um aktive Galaxien in einem frühen Stadium der Galaxienentwicklung. Im optischen Bereich sind sie auch mit den größten Teleskopen nur durch ihr Spektrum von Sternen zu unterscheiden. Ihre spektralen Rotverschiebungen  $z$  weisen so große Beträge auf, daß die Berechnung ihrer Radialgeschwindigkeiten  $RV$  unter Berücksichtigung der speziellen Relativitätstheorie erfolgen muß. Sie nähern sich bereits relativ stark der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Da in Veröffentlichungen über Quasare meist nur der Wert ihrer Rotverschiebung  $z$  genannt wird, sei hier die Formel zur Berechnung der Radialgeschwindigkeit  $RV$  aus  $z$  und  $c$  angeführt.

$$RV = c \cdot [(1+z)^2 - 1] : [(1+z)^2 + 1]$$

*Bild 2: „Der Quasar 1225+317 im Sternbild Jagdhunde“  
Der Quasar ist mit  $B_i=16\text{--}15$  und  $z = 2,23$  eines der fernsten Objekte der Schmidt-Kamera in Sohland.  $RV$  beträgt 247500 km/s. Die Entfernung ist  $> 10 \cdot 10^9$  Lj. Umliiegend zwei Galaxien: NGC 4414,  $B_i=10\text{--}95$  und UGC 07604 ( $\sigma = 1' \times 0,25'$ ). Aufgenommen mit Schmidt-Kamera 200/240/356, Lumicon Deep-Sky-Filter, hypers. Kodak TP 2415-Film, belichtet am 24. 2. 1990 von 0.10–0.34 Uhr MEZ. Das Original wurde über eine harte vergrößerte Zwischenkopie auf FU15, 40fach vergrößert. Foto: Wolfram Fischer, Sternwarte Sohland*

Mit der riesigen Strahlungsleistung der Quasare eng verknüpft ist auch ihre Nachweisbarkeit mit Amateurmitteln. Der Quasar 1225 + 317 in den Jagdhunden, mit der Helligkeit  $B_i=16\text{--}15$ , dürfte eines der fernsten Objekte sein, das mit der Schmidt-Kamera des Verfassers noch erreichbar ist. Für ihn beträgt  $RV = 0,825 c = 247500$  km/s. Die Entfernung wird damit  $> 10 \cdot 10^9$  Lj. sein. Das Objekt konnte tatsächlich auf einer Aufnahme (siehe Bild 2), durch die dankenswerte Hilfe von Dr. Fröhlich (Babelsberg), identifiziert werden.

## Literatur