

Arbeiten mit TOPCAT und Aladin, Teil 1

von Arndt Latußeck

„Big Data“ hat auch in der Astronomie längst Einzug gehalten. Gewaltige Mengen topaktueller, professioneller astronomischer Daten lagern im Internet, bereit, auch im schulischen Umfeld genutzt zu werden. Inzwischen sind diese Daten so leicht verfügbar, dass viele Aspekte der Astronomie als Wissenschaft, insbesondere die Aufbereitung und Interpretation von Messungen und Beobachtungen, nun leicht in den Unterricht integriert werden können. Reines Faktenwissen kann somit abgelöst werden durch die eigene Erarbeitung von Kenntnissen, die wissenschaftliche Methode kann wie selbstverständlich als Kernkompetenz eingeübt werden, fast, als ob man die Daten selbst am Teleskop aufgenommen hätte. Doch auch hier gilt es, die Schülerinnen und Schüler nicht zu überfordern, will man die Methoden des „Data Mining“ im Unterricht gewinnbringend einsetzen.

Um die im Folgenden beschriebenen Methoden einsetzen zu können, müssen sinnvollerweise einige Konzepte als bekannt vorausgesetzt werden – sie sollten möglichst vorher im Unterricht erarbeitet werden. Für die in diesem Artikel vorrangig beschriebene Arbeit mit Sternaten bedeutet das die Kenntnis über leicht (weil direkt) beobachtbare Zustandsgrößen der Sterne (bzw. ihre Hilfsgrößen) und ihre Bestimmung. Dies sind insbesondere:

- die scheinbaren Helligkeiten der Sterne: das Magnitudensystem,
- absolute Helligkeiten und das Entfernungsmodul,
- das äquatoriale Koordinatensystem: Rektaszension und Deklination,
- die trigonometrische Parallaxe als Entfernungsindikator,
- der Farbindex als Maß für die Farbe und den Spektraltyp der Sterne.

Abgeleitete Zustandsgrößen (Masse, Radius, chemische Zusammensetzung) müssen nicht notwendigerweise

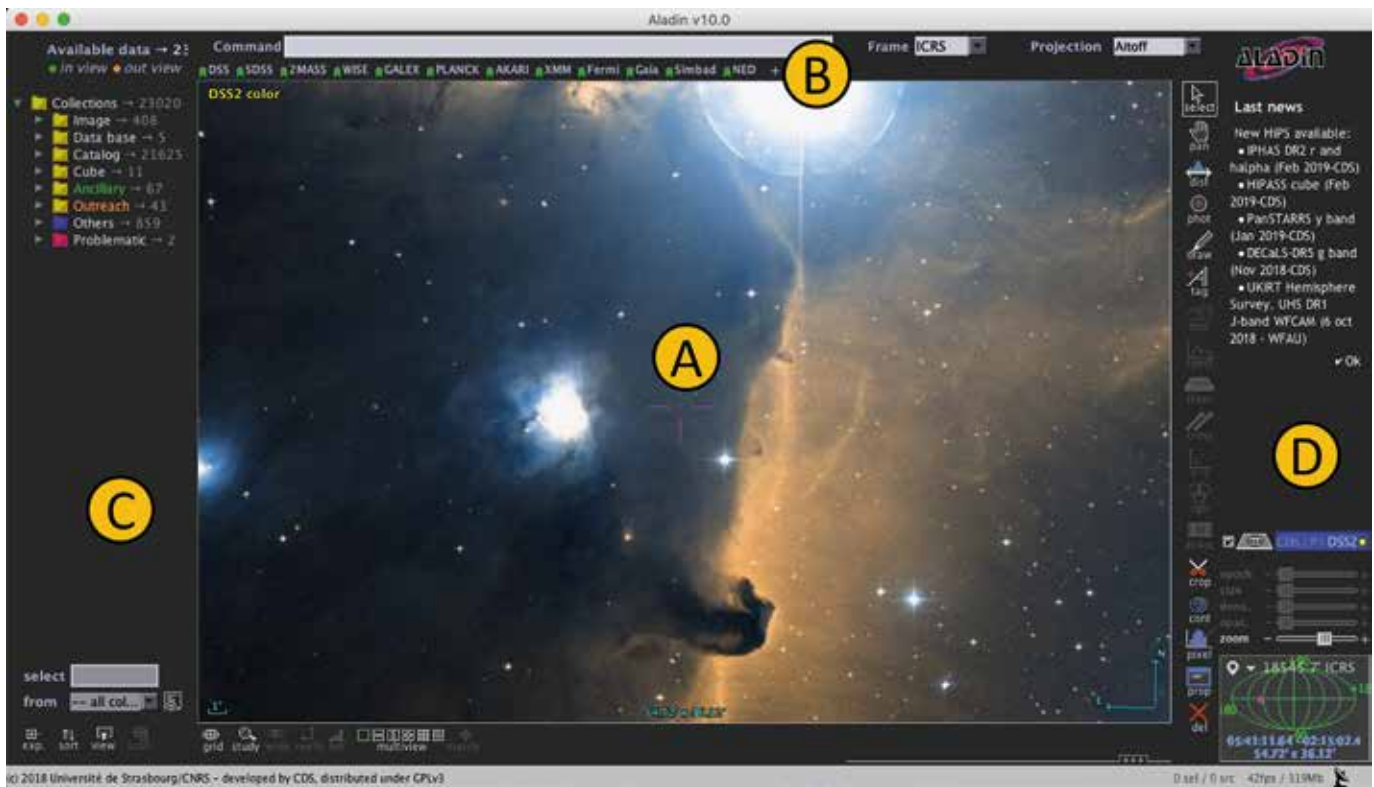
bekannt sein. Die Arbeit mit Galaxienkatalogen oder anderen nichtstellaren Daten erfordert unter Umständen noch andere Konzepte wie Morphologie, Rotverschiebung usw.

Eine Warnung: Wir werden es im Folgenden mit recht großen Datenmengen zu tun haben! Deshalb sollte vor einer Verwendung im Unterricht sichergestellt werden, dass eine ausreichend schnelle Internetverbindung zur Verfügung steht! Wenn die 20 Teilnehmer einer Lerngruppe jeweils 200.000 Stern-Datensätze herunterladen müssen, sollte zur Vermeidung böser (Zeit-)Überraschungen vorher geprüft werden, inwieweit die technischen Voraussetzungen ausreichen. Eine Alternative wäre es, die für ein Projekt benötigten Daten vorab herunterzuladen und der Lerngruppe auf einem Dateiserver zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise ginge aber der „beobachterische“ Aspekt teilweise verloren, der durch die gleichzeitige Benutzung des Programms *Aladin* bewusst Teil der Arbeit sein soll.

Aladin, das virtuelle Observatorium

Das *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* liefert mit dem Katalog-Service *vizieR*, der Objektdatenbank *Simbad* und vor allem mit dem virtuellen Observatorium *Aladin* die Werkzeuge, die den Schülerinnen und Schülern überhaupt erst die Welt der professionellen astronomischen Datenbanken erschließbar machen.¹ Schon ein erster Überblick zeigt aber, dass die Informationsvielfalt von *vizieR* und *Simbad* die Schüler wohl eher überfordern dürfte, statt einen Mehrwert darzustellen. Ganz anders dagegen *Aladin*. Sein Untertitel „*Interactive Sky Atlas*“ bringt es auf den Punkt: Dieses Programm ermöglicht einen interaktiven, vor allem aber intuitiven Blick an jede Stelle des Sternenhimmels und der Objekte, die dort sichtbar sind: Sterne, Sternhaufen, Galaxien usw. Dabei verknüpft *Aladin* die Informationen aus den erwähnten Datenbanken in hervorragender Weise mit Bildern der großen fotografischen Himmelsdurchmusterungen – vor allem des Digitized Sky Survey (DSS), der die umfangreichen Durchmusterungen des Mount-Palomar-Observatoriums (für den Nordhimmel) und der ESO (für den Südhimmel) zu einem hochauflösenden fotografischen Gesamtbild des Himmels vereint.

Die Benutzung ist denkbar einfach: Um Daten des DSS anzeigen zu lassen, wählt man nach dem Programmstart in der Datenleiste unter dem Command-Feld einfach **DSS** an (Punkt (B) in **Bild 1**), worauf ein Bild der Region um den Pferdekopfnebel angezeigt wird. Nun kann man sehr leicht zu einer beliebigen Himmelsregion navigieren, sei es mit der Maus, mit der der angezeigte Himmelsausschnitt verschoben oder ge-



- 1 Eingabemaske von Aladin, Version 10.0, nach dem Programmstart und unmittelbar nach Anwahl der Option *DSS* in der Datenleiste (B) unterhalb des *Command*-Feldes. Es erscheint zunächst ein Bild der Region um den Pferdekopfnebel. Folgende Bereiche werden unterschieden:
 - A. „Himmelsfenster“. Hier erscheint ein Ausschnitt des Himmels, unterlegt mit Fotografien oder Datenmarkierungen.
 - B. Datenleiste. Hier kann eine einfache Auswahl der im Himmelsfenster anzuzeigenden Daten per Mausklick erfolgen.
 - C. Katalogbereich. Der Verzeichnisbaum oben ermöglicht die Navigation durch alle Kataloge des *vizieR*-Service. Im *select*-Feld unten kann gezielt nach Katalogen gesucht werden.
 - D. Ebenensymbol. Wichtig ist vor allem der Bereich unterhalb der Mitte: Hier erscheinen die verschiedenen Daten- und Bildebenen für den aktuellen Himmelsausschnitt. Sie werden übereinanderliegend angezeigt und können per Mausklick ein- und ausgeschaltet werden (per Klick auf das jeweilige Ebenensymbol).

zoomt werden kann, sei es über die Eingabe eines Objektnamens oder einer Katalogbezeichnung im **Command**-Feld.

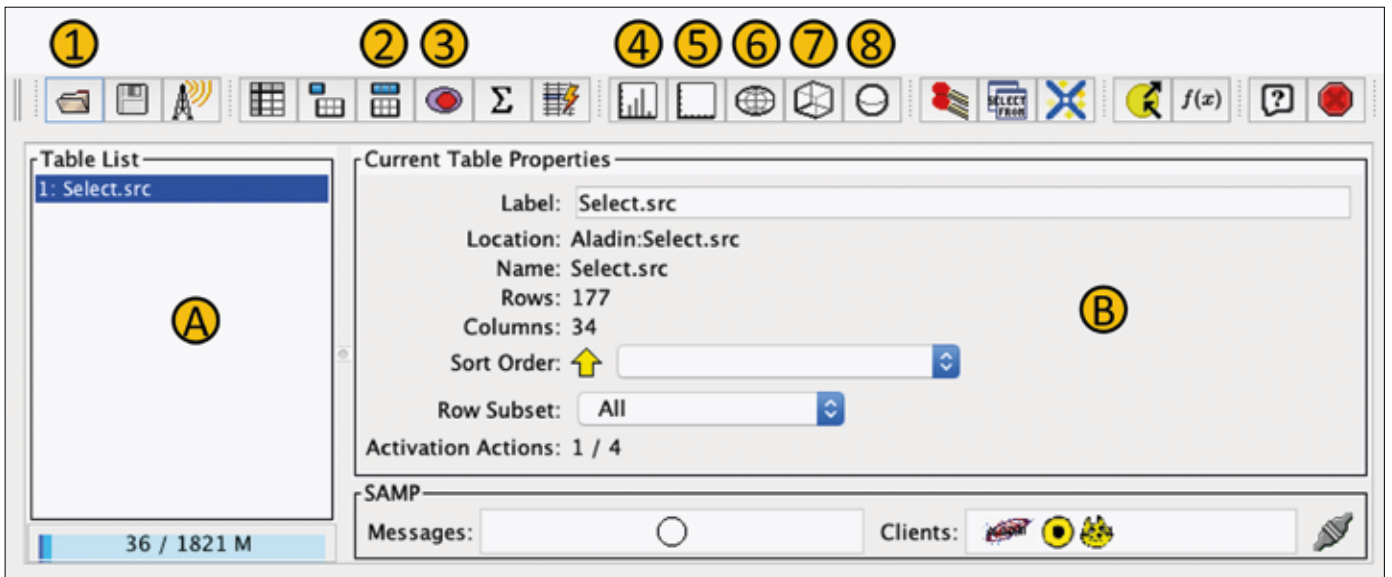
Nun wäre *Aladin* anderen Planetariumsprogrammen nicht sonderlich überlegen, wenn es sich auf die Anzeige des Sternenhimmels beschränkte. Seinen größten Mehrwert entwickelt das Programm durch die geniale und vollkommen intuitive Verknüpfung der Bildinformationen mit den *vizieR*- und *Simbad*-Diensten, indem es in der Lage ist, im aktuellen Bildausschnitt die entsprechenden Katalogdaten den Fotografien überlagert anzuzeigen. Auf diese Weise lässt sich *Aladin* regelrecht als **Observatorium im Klassenraum** nutzen; denn die Schülerinnen und Schüler können an den Objekten, die ja



- 2 Aladin-Maske nach Eingabe des Frühlingspunktes als Mittelpunkt des Himmelsausschnitts und einer Bildbreite von ca. 1° . Die Gaia-Daten sind dem eigentlichen Bild im „Himmelsfenster“ als Quadrate überlagert, ganz rechts erkennt man sowohl die Bildebene als auch darüber eine Datenebene, die hinzugefügt wird, sobald man einen Katalog-Datensatz auswählt (im Beispiel: Gaia DR2-Daten).

source_id	ra	ra_error	dec	dec_error	parallax	parallax...	para	para_error	pmdec
26421124...	359.8422...	0.0326	-0.00568...	0.0180	1.9201	0.0382	-18.142	0.082	-38.20

- 3 Ausschnitt des Datensatzes eines typischen Einzelsterns aus dem Gaia-Katalog, wie man ihn durch Anklicken eines Sterns im in Aladin dargestellten Himmelsausschnitt erhält.



4 Eingabemaske von TOPCAT. Alle wichtigen Funktionen lassen sich über die Symbolleiste aufrufen.

A. Auflistung aller geladenen Tabellen

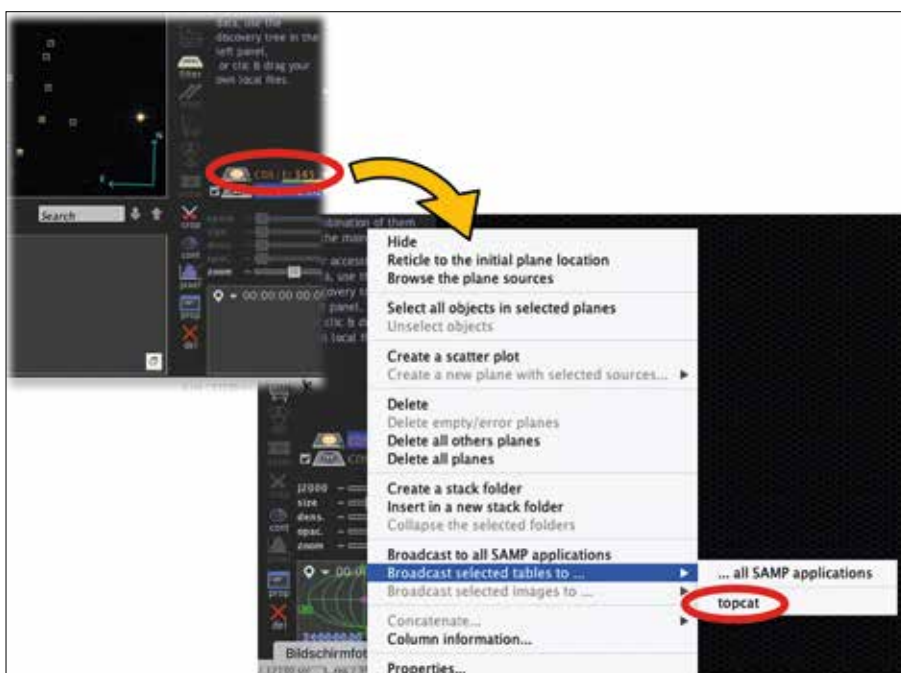
B. Eigenschaften der ausgewählten Tabelle

1. Tabelle laden (lokal, vizier und andere Datenbankdienste);
2. Tabelleneigenschaften ändern, insbesondere neues Merkmal (Datenspalte) einfügen und Formelberechnungen auf diesem Merkmal;
3. Untermenge des Datensatzes aus der aktuellen Tabelle auf Basis von Auswahlparametern erstellen;
4. Histogramm erzeugen;
5. 2D-Plot erzeugen (Diagramm aus Gegenüberstellung von zwei Größen);
6. Karte erzeugen: Plot entsprechend Objektkoordinaten aus aktueller Tabelle;
7. 3D-Plot erzeugen (Diagramm aus Gegenüberstellung von drei Größen; kartesisch);
8. 3D-Plot erzeugen (Diagramm aus Gegenüberstellung von drei Größen; polar).

quasi bereits wie durch ein Teleskop betrachtet werden, regelrecht Messungen vornehmen bzw. die gespeicherten

Messungen unmittelbar nutzen. Sehr vorteilhaft: Es entfällt in vielen Fällen eine (abstrakte) Datenbankrecherche,

stattdessen kann die Datenauswahl aufgrund des visuellen Erscheinungsbildes direkt am Bildschirm erfolgen.



5 Dialog zur Übernahme der in der *Aladin*-Datenebene angezeigten Objektdaten in TOPCAT. Das mittlere Menü wird durch Klick mit der rechten Maustaste auf eine bereits existierende *Aladin*-Datenebene aufgerufen.

Virtuell beobachten mit Gaia

Wir wollen die virtuelle Datenaufnahme und die spätere Analyse am Beispiel des Katalogs des Gaia-Satelliten durchführen. Dieser Katalog enthält in seinem Data Release 2 (im Folgenden: „DR2“) wesentliche Daten zu knapp 1,3 Milliarden Sternen (Position und Positionsänderungen, Parallaxe, Radialgeschwindigkeit, Helligkeit, Farbe sowie für einen Teil des Datensatzes abgeleitete Parameter wie Effektivtemperatur, Sternradius und Leuchtkraft).² Dazu wählen wir bewusst eine Stelle am Himmel, die keinerlei auffällige Objekte enthält: den Frühlingspunkt (**Bild 2**). Ihn erreichen wir durch Eingabe seiner äquatorialen Koordinaten in das Command-Feld in Aladin: „00:00:00 00:00:00“.

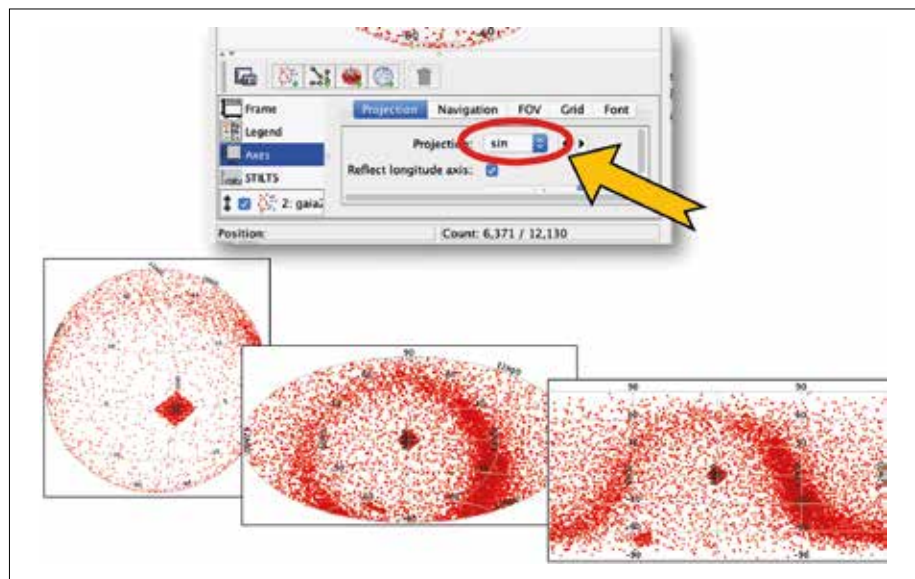
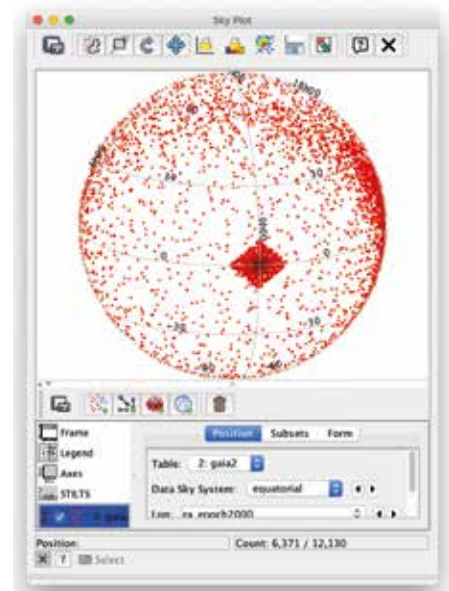
Falls noch nicht geschehen, klicken wir in der Katalog-Leiste unterhalb des *Command*-Fensters die Option **DSS** zur bildlichen Anzeige des entsprechenden Himmelsausschnitts. Per Maus können

wir ihn auf eine akzeptable Größe von etwa einem Grad Breite zoomen. Um nun zusätzlich die Gaia-Daten anzuzeigen, klicken wir auf die entsprechende Option *Gaia*, rechts neben *DSS*. Sofort wird eine neue Anzeigeebene erstellt (ganz rechts, „CDS/I/345/gaia2“, zusätzlich zur Ebene namens „CDS/P/DSS2/color“). Nach kurzer Ladezeit erscheint dem DSS-Bild überlagert die neue Datenebene, in der ein Teil der Sterne des Gaia-Katalogs in diesem Himmelsareal dargestellt ist (markiert durch kleine Quadrate), und zwar alle Gaia-Sterne bis zu einer gewissen scheinbaren Grenzhelligkeit, die allerdings noch abhängig von der Größe des Bildausschnitts ist – also Achtung! Dieser Datensatz ist noch nicht vollständig! Wir arbeiten aber zunächst trotzdem mit den aktuell angezeigten Daten, eine vollständige Gaia-Abfrage wird später vorgestellt. In jedem Fall ist diese Art der Datenauswahl sehr einfach und gerade zu Beginn für Schüler problemlos zu bewältigen.

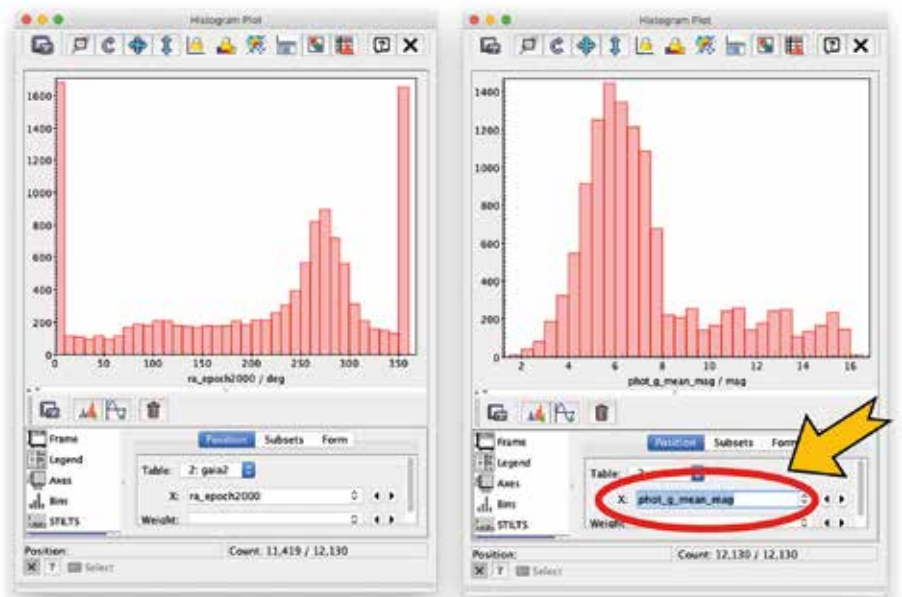
Für jedes markierte Objekt können nun dessen Katalogdaten direkt durch Mausklick angezeigt werden; der jeweilige Datensatz erscheint dann unterhalb des Himmelsausschnitts in dem dunkelgrauen Bereich. Zieht man die Maus mit gedrückter Maustaste über den Himmelsausschnitt, so kann man weiterhin einen rechteckigen Bereich definieren, dessen überdeckte Objekte dann gleichzeitig im Datenbereich angezeigt werden. Auf diese Weise übernimmt Aladin bereits jetzt die Funktion einer richtigen Sternwarte, indem (virtuell natürlich!) Positionen, Helligkeiten, Farben usw. von Sternen „gemessen“ werden können – einfach durch Mausklick. Bei Verwendung des Gaia DR2-Katalogs erhält man so insbesondere den Zugriff auf folgende Informationen der Sterne³ (Bild 3):

- ▶ Äquatoriale Koordinaten (Spalten *ra_epoch2000*, *dec_epoch2000*). Die Angabe erfolgt jeweils in Dezimalgrad,
- ▶ trigonometrische Parallaxe in tausendstel Bogensekunden (*parallax*),
- ▶ Eigenbewegung in tausendstel Bogensekunden pro Jahr (*pmra*, *pmdec*)
- ▶ Scheinbare Helligkeit in Gaias G-Band (*phot_g_mean_mag*),
- ▶ Sternfarbe (Farbindex) als Farbdifferenz zwischen Gaias B- und R-Band (*bp_rp*).

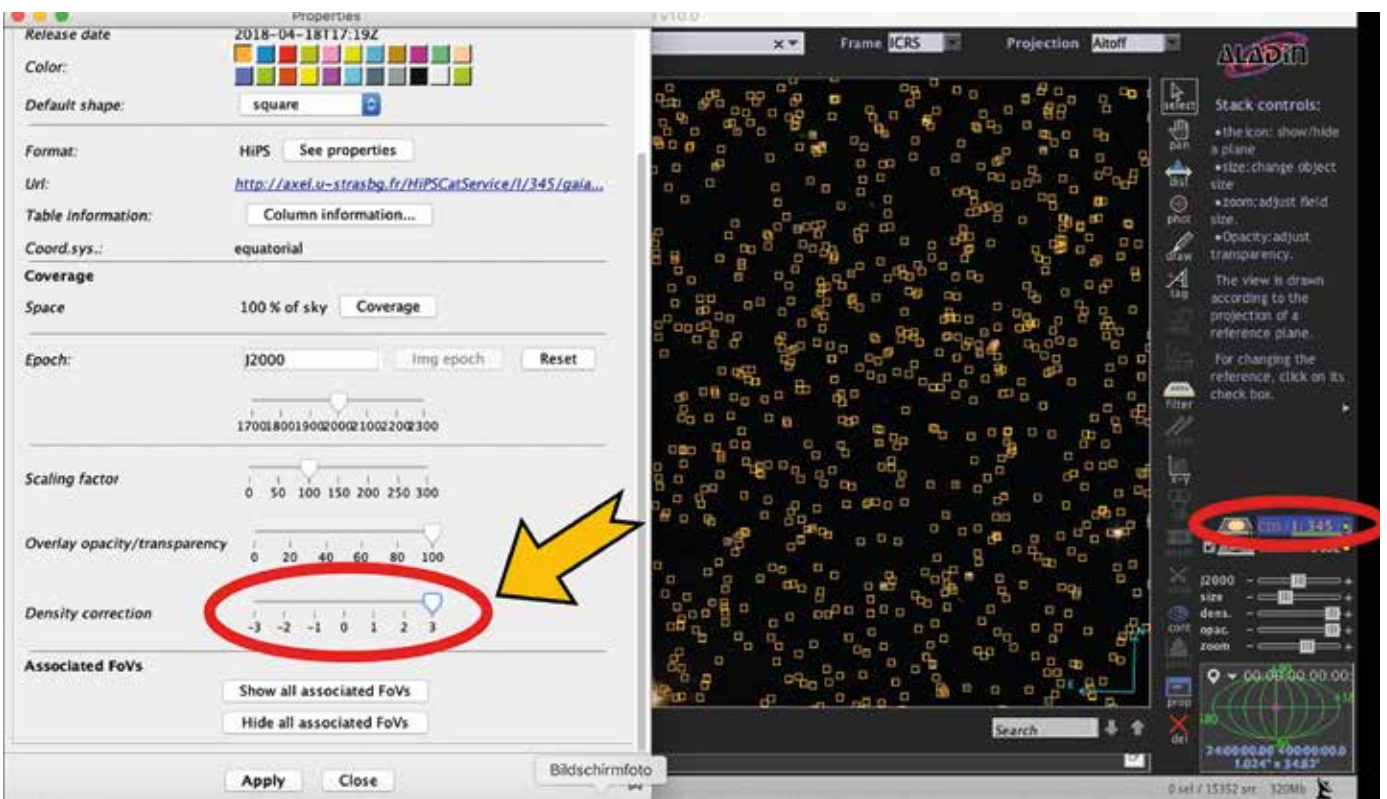
6 Kartenansicht in TOPCAT nach Anwahl des Symbols „Karte erzeugen“ (Punkt 7) in Bild 4) mit den aus *Aladin* übertragenen Beispieldaten entsprechend dem im Text beschriebenen Vorgehen. TOPCAT plottet die Koordinaten aller Sterne des Datensatzes standardmäßig in orthographischer Projektion auf der Oberfläche einer Kugel. Sie lässt sich bei gedrückter Maustaste drehen bzw. verschieben und mit dem Mousrad zoomen. Offensichtlich ist der von *Aladin* übertragene Datensatz deutlich größer als der des angezeigten Himmelsausschnitts (den man am rechteckigen Bereich mit erhöhter Sterndichte erkennt). Auch die Milchstraße zeichnet sich durch die erhöhte Sterndichte bereits ab.



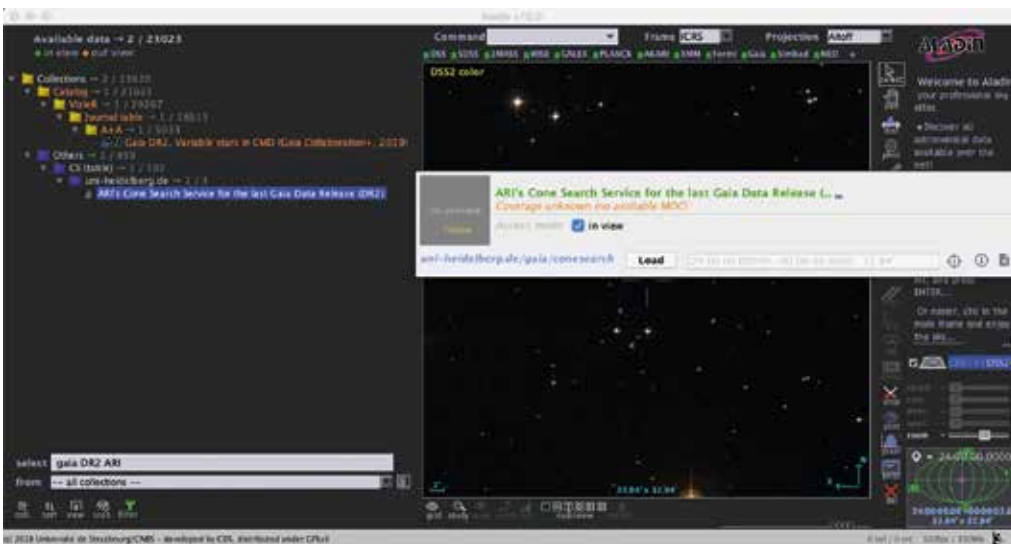
7 TOPCATs drei Projektionsarten der Objekte des Beispieldatensatzes, anwählbar nach Klick auf den Menüpunkt *Axis* im Kartenfenster: Orthografische (links), Aitoff- (Mitte) und Lambert-Projektion. Man erkennt wiederum, dass die Datensätze der aus *Aladin* exportierten Objekte sich nicht auf den dort angezeigten Himmelsausschnitt beschränken, sondern den gesamten Himmel umfassen.



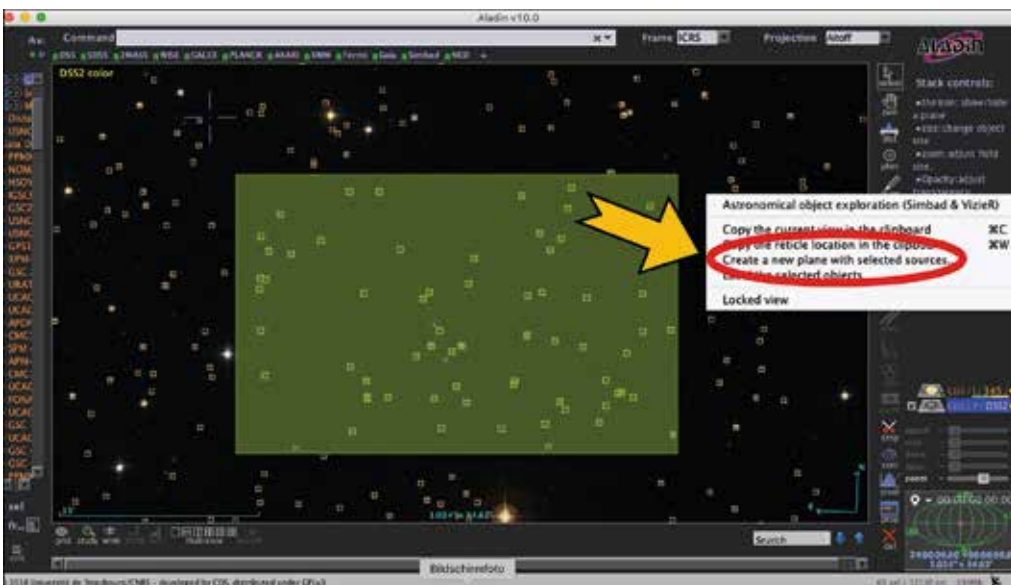
8 Histogramme in TOPCAT. Links der Anblick direkt nach Klick auf das Histogrammsymbol (4). Rechts die Darstellung nach Auswahl der scheinbaren Helligkeit aus dem Gaia DR2-Katalog (*phot_g_mean_mag*).



9 Einstellung in Aladin zur Erhöhung der Zahl der angezeigten Gaia-Sterne im Bildfeld: Im Menü *Properties* (per Rechtsklick auf aktuelle Datenebene (Bereich (C) in Bild 1 bzw. Klick auf die Option „prop“ unten rechts) muss „Density correction“ erhöht werden.



10 Direkter Aufruf der Gaia-Datenbankabfrage im Datenbankbereich (C) laut Bild 1. Nach Eingabe der Schlüsselwörter gaia DR2 ARI im *select*-Feld erscheint im Datenbankbereich die entsprechende Datenbank (blau unterlegt). Ein Mausklick darauf öffnet das graue Fenster, bei dem man nur noch den „Load“-Button drücken muss. Daraufhin lädt Aladin den zum aktuellen Himmelsausschnitt passenden Datenbanksauszug vollständig. Zur besseren Erkennbarkeit wurde der Datenbankbereich durch Ziehen mit der Maus vergrößert.



11 Auswahl eines exklusiven Datenbereichs in Aladin zur Übertragung nach TOPCAT. Nur für die innerhalb des grünen Bereichs markierten Objekte wird eine neue Datenebene erstellt, die dann per SAMP-Protokoll übertragen werden kann. Auf diese Weise vermeidet man den Download von Daten außerhalb des angezeigten Bildfeldes.

Datenauswertung und Aufbereitung größerer Datenmengen: TOPCAT

Der Datensatz eines Einzelsterns ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern bereits, unter der Voraussetzung einer einigermaßen genau bekannten trigonometrischen Parallaxe⁴ dessen wesentliche Zustandsgrößen zu bestimmen: Entfernung, Leuchtkraft bzw. absolute Helligkeit und Radius sowie Masse. Dies soll allerdings nicht Inhalt dieses Artikels sein. Stattdessen gehen wir einen anderen Weg, indem wir lediglich Vorwissen über die zu Beginn beschriebenen, „direkt beobachtbaren“ stellaren Zustandsgrößen voraussetzen, nämlich über die Position des Sterns (astrometrische Daten) und dessen Helligkeit und Farbe (photometrische Daten), also durchweg Daten, die prinzipiell am Teleskop auch selbst bestimmt werden könnten. Entsprechend stecken wir die Ziele anders mit der Fragestellung: Was können wir aus der Analyse dieser „direkten“ Zustandsgrößen an astronomischen Fakten ableiten? Wir begeben uns hier auf das Feld der Stellarstatistik, indem wir statt einzelner Sterne einen ganzen Datensatz einer großen Anzahl von Sternen gleichzeitig untersuchen. Das geeignete Hilfsprogramm dazu ist TOPCAT,⁵ das „*Tool for Operations on Catalogues and Tables*“, das in der professionellen Astronomie mittlerweile zu einem Quasistandard zur Analyse größerer Datenmengen geworden ist. Vor allem ist TOPCAT als Teil des *Virtual Observatory*⁶ eng angebunden an dessen Software- und Datenressourcen – insbesondere *Aladin*. Diese beiden Tools lassen sich hervorragend für den Unterricht miteinander verbinden, mit vergleichsweise extrem einfachen Mitteln lassen sich anspruchsvolle Analysen erstellen und wichtige astrophysikalische Grundparameter und sogar Aussagen über die Struktur der Milchstraße gewinnen. Einige Verwendungsbeispiele sollen die Möglichkeiten von TOPCAT aufzeigen.

Benutzung von TOPCAT mit *Aladin* – ein erster Versuch

Bild 4 zeigt die Hauptansicht von TOPCAT; dort sind die wesentlichen, für die Benutzung in der Schule wichtigen Menüpunkte beschrieben.

Tabellendaten können über das Dateimenü (1) aus verschiedenen Katalogquellen geladen werden, insbesondere *vizieR*. Doch der entsprechende Dialog ist relativ umständlich zu bedienen (man benötigt Information über den Objektnamen bzw. über dessen Position, muss einen Kartenausschnitt definieren und nach einer vorläufigen Datenbankabfrage noch einen geeigneten Katalog auswählen) – nichts, was Schülern Spaß machen würde, weil man sich schnell vom eigentlichen Sternenhimmel und seinen Objekten entfernt. Doch als Teil des *Virtual Observatory* hat TOPCAT einen großen Vorteil: Über das standardisierte *Simple Applications Message Protocol* (SAMP) kann TOPCAT nämlich mit *Aladin* kommunizieren, so dass dort angezeigte Objekte mit ihren Daten direkt in TOPCAT übernommen werden können. Auf diese Weise kann der astronomische Datenverarbeitungsprozess für die Schüler auch im Unterricht gut nachgebildet werden: Man beobachtet eine Himmelsregion, macht dort Messungen und wertet diese anschließend aus. Kein Suchen in Datenbanken, kein Abgleich abstrakter Koordinaten belastet die Arbeit an astronomischen Fragestellungen. Man bleibt immer relativ „dicht“ am Objekt bzw. Himmelsausschnitt.

Das Laden von Daten aus *Aladin* in TOPCAT ist denkbar einfach: Voraussetzung ist lediglich eine schon existierende Datenebene, die dem als Bild angezeigten Himmelsausschnitt überlagert ist (zu sehen ganz rechts im *Aladin*-Hauptfenster, vgl. Bild 1). Wir hatten im obigen Beispiel bereits für die Himmelsregion um den Frühlingspunkt die Daten des Gaia DR2-Katalogs anzeigen lassen; damit wollen wir zunächst weiter arbeiten.

Die Datensätze aller angezeigten Sterne können sehr leicht unmittelbar in TOPCAT übertragen werden; als Voraussetzung muss lediglich TOPCAT bereits gestartet sein. Man ruft nun das Kontextmenü zur Datenebene per Rechtsklick auf die Ebene auf und wählt beim „*Broadcast*“ die Weiterleitung an TOPCAT aus. Sofort erfolgt die Datenübertragung nach TOPCAT. In **Bild 5** ist dieser grundlegend wichtige Vorgang gezeigt.

Wir wechseln nun in TOPCAT und erkennen in der Auflistung aller Tabellen (Bereich (A) in Bild 4) eine neue Ta-

belle namens „*gaia2*“. Ein Doppelklick zeigt deren Inhalt, ganz entsprechend der Auflistungen in Bild 3 finden wir dort alle von Gaia gemessenen Parameter, nur in diesem Fall für sehr viele statt, wie in *Aladin*, für einen einzelnen Stern. Diesen Datensatz können wir nun auf verschiedene Arten auswerten und bearbeiten. Zunächst plotten wir alle Sterne mit ihren Koordinaten; dazu klicken wir in der Symbolleiste auf das Koordinatenfeld (7). Wir erhalten ein Bild gemäß **Bild 6**.

Zweierlei fällt auf: Die Projektion ist ungewöhnlich (alle Sterne wurden in orthographischer Projektion auf der Oberfläche eine Kugel geplottet), und der Datensatz enthält offenbar Sterne der gesamten Himmelskugel und nicht nur vom gewählten Ausschnitt in *Aladin*. Wir können die Projektion durch Klick auf die Option *Axes* verändern, von der standardmäßig eingestellten orthografischen Projektion auf eine Aitoff-Projektion und auch eine flächentreue Lambert-Projektion (**Bild 7**). Der Anblick lässt sich durch Zoomen mit dem Mausrad und Verschieben (mit gedrückter linker Maustaste) anpassen.

Probieren wir eine andere Darstellungsmöglichkeit unserer Beispieldaten aus: Histogramme. Wir klicken das Histogrammsymbol (4) und erhalten ein Diagramm der Häufigkeitsverteilung der Sterne in Abhängigkeit von der Rektaszension (**Bild 8**, links).⁷ Im Auswahlfeld „*X*“ können wir nun andere Parameter des Datensatzes auswählen, beispielsweise die scheinbare Helligkeit aus dem Gaia DR2-Katalog: *phot_g_mean_mag*. Die rechte Seite von Bild 8 zeigt das Ergebnis.⁸

Ganz ähnlich arbeiten die anderen TOPCAT-Darstellungsdialoge. Entsprechend ihrer Darstellungsmöglichkeiten kann man Merkmale aus dem jeweils aktuellen Katalog grafisch gegenüberstellen. Beispiele werden im folgenden Abschnitt gegeben.

Tipps zur Arbeit mit *Aladin*

Zum Umgang mit Datenebenen

Zu Beginn einige Tipps:

- ▶ Alle Datenebenen befinden sich im Bereich (D) des *Aladin*-Programmfensters entsprechend Bild 1.
- ▶ Geladene Ebenen können durch einfachen Mausklick auf das jeweilige



12 Auswahl des *ConeSearch*-Modus zur Eingrenzung der Datenbankabfrage für Gaia-Daten im angezeigten Himmelsausschnitt (vgl. Bild 11). Nach Auswahl der Option kann man mit der Maus im Himmelsfenster einen kreisförmigen Ausschnitt aufziehen, innerhalb dessen *Aladin* alle Sterne des Gaia DR2-Katalogs als neue Datenebene lädt.

Ebenensymbol angezeigt oder verborgen werden.

- ▶ Man kann mehrere Datenebenen gleichzeitig markieren, indem man sie bei gedrückter SHIFT-Taste mit der Maus anklickt.
- ▶ Will man eine Datenebene in *Aladin* löschen, so ruft man per Rechtsklick das Kontextmenü der entsprechenden Ebene auf und wählt die Option „Delete“.
- ▶ Wie bereits erwähnt, kann die Übertragung des Inhaltes einer Datenebene nach TOPCAT ebenfalls über das Kontextmenü erfolgen (Menüpunkt „Broadcast selected Tables to...“, siehe Bild 5).

Erhöhung der Objektanzahl

Beim Zoomen in *Aladins* Himmelsfenster bei angewähltem Gaia-Katalog (Menüleiste ganz oben; Bereich (B) in Bild 1) fällt schnell auf, dass die Anzahl der dargestellten Sterne abhängig von der aktuellen Größe des Himmelsausschnitts ist. Für viele Anwendungen reichen die dann sichtbaren Objektzahlen zwar bereits aus, aber manche Untersuchungen verlangen nach noch schwächeren Sternen oder sogar nach Vollständigkeit des Gaia-Katalogs. *Aladin* bietet mehrere Möglichkeiten, die Anzahl angezeigter Sterne zu erhöhen (was vor allem im Fall des Gaia DR2-Katalogs zu einer ganz erheblichen Steigerung der Objektzahlen führen kann – also Achtung! Es kann sogar zu Speicherproblemen kommen!). **Bild 9** zeigt das Vorgehen zur Erhöhung der Sternzahlen: Im Kontextmenü „*Properties*“ zur Datenebene erhöht man den Parameter „*Density correction*“.

Die Heraufsetzung dieses Parameters führt übrigens nicht notwendigerweise dazu, dass der Datensatz im aktuellen Himmelsausschnitt vollständig ist! Für die meisten Anwendungen im Unterricht dürfte die über die „*Density*

correction“ heraufgesetzte Sterndichte aber absolut ausreichen. Und für Winkelgrößen unterhalb etwa 1° sollte der Gaia-Datensatz dann auch tatsächlich bereits vollständig sein.

Laden eines vollständigen Gaia-Datensatzes

Will man auf jeden Fall sicherstellen, dass unabhängig von der Winkelgröße des Himmelsausschnitts ganz bestimmt auch *alle* Gaia-Sterne des DR2-Katalogs im aktuellen Himmelsausschnitt von *Aladin* geladen werden, so sollte man den Datenimport auf einem anderen Weg vornehmen: Und zwar über den Katalogbereich (Bereich (C) in Bild 1) von *Aladin*. Dazu gibt man in das *select*-Feld die folgenden Suchbegriffe ein: **Gaia DR2 ARI**, woraufhin die passende Datenbank gefunden und im Datenbankbereich angezeigt wird. **Bild 10** beschreibt die weiteren Schritte.

Örtliche Begrenzung der Daten beim Export

Für eine wirklich gezielte Nutzung für Unterrichtsprojekte fehlt zunächst noch die Umgehung der beiden aus unseren ersten Experimenten bekannten *Aladin*-Eigenarten: Das heißt vor allem, nicht mehr Daten des gesamten Himmels in die zu übertragende Datenauswahl aufzunehmen, sondern nur diejenigen des gerade gewählten Himmelsausschnitts. Das ist in *Aladin* schnell erledigt (siehe auch **Bild 11**):

- ▶ Im „Himmelsfenster“ zieht man mit der Maus (bei gedrückter linker Maustaste) einen rechteckigen Bereich auf, innerhalb dessen alle Objektmarkierungen der aktiven Datenebene grün eingefärbt werden.
- ▶ Anschließend Rechtsklick in *Aladins* „Himmelsfenster“ und Auswahl der Option „*Create a new plane with selected sources*“.

- ▶ *Aladin* fügt daraufhin eine neue Datenebene ein (zu finden wiederum rechts im Ebenenbereich).
- ▶ Diese Datenebene kann mit der bekannten Methode nach TOPCAT übertragen werden (siehe Bild 5).

Nutzt man den eben beschriebenen, direkten und vollständigen Datenbankzugriff auf die Gaia-Daten, so hat man weiterhin die Möglichkeit, einen kreisförmigen Himmelsausschnitt auszuwählen (**Bild 12**).

Anmerkungen

- (1) <http://cdsweb.u-strasbg.fr>. Während der *vizieR*- und der *Simbad*-Service online nutzbar sind, sollte *Aladin* auf jedem Computer lokal installiert werden; nur diese Offline-Version bietet den vollen Funktionsumfang.
- (2) Zu Details siehe <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>.
- (3) Eine vollständige Beschreibung aller Parameter des Gaia-Katalogs ist unter <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2> zu finden.
- (4) Die Parallaxenmessung von Gaia funktioniert innerhalb tolerierbarer, zur unmittelbaren Ableitung stellarer Zustandsgrößen geeigneter Genauigkeitsgrenzen nur für Sterne, die näher als einige hundert Parsec stehen.
- (5) Download und weitere Informationen unter <http://www.star.bristol.ac.uk/~mbt/topcat/>
- (6) <http://www.euro-vo.org>
- (7) Über die genaue Form des Histogramms sollten wir uns keine großen Gedanken machen, jedoch zeigt sich bei ca. 280° ein Maximum der Sternhäufigkeit. (Bei dieser Rektaszension liegt das Zentrum der Milchstraße, was zu der erhöhten Sternzahl führt.) Das Maximum bei 0° ist dagegen nicht real und ausschließlich dadurch bedingt, dass der Beispieldatensatz vor allem Sterne aus dem Bereich um den Frühlingspunkt bei 0° Rektaszension enthält.
- (8) Auch die Interpretation dieses Histogramms sollte nicht zu streng erfolgen. Die Verteilung der scheinbaren Helligkeiten ist bis zu $\text{phot_g_mean_mag}=8$ mag im Wesentlichen ein Auswahlereffekt des Algorithmus von *Aladin*, die schwächeren Sterne entstammen nur dem in *Aladin* gewählten Himmelsausschnitt um 0° Rektaszension.

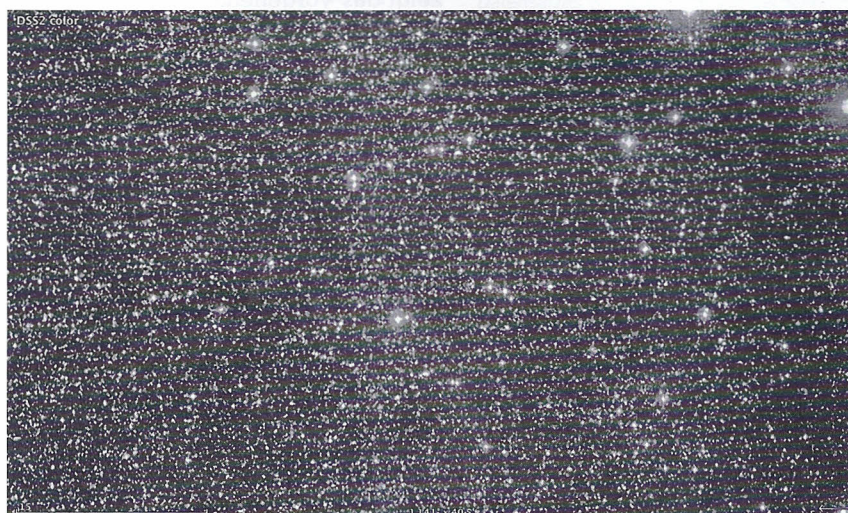
Dr. rer. nat. Arndt Latubeck

Bischöfliches Gymnasium Josephinum
Domhof 7
31134 Hildesheim
E-Mail: arndt.latussek@josephinum.net

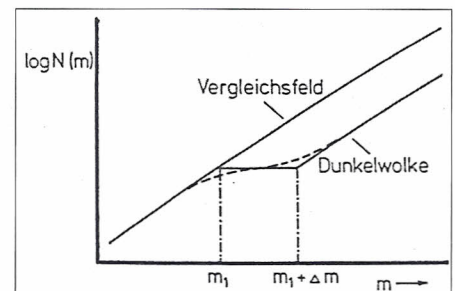
Arbeiten mit TOPCAT und Aladin, Teil 2

von Arndt LatuBeck

„Big Data“ hat auch in der Astronomie längst Einzug gehalten. Gewaltige Mengen topaktueller professioneller astronomischer Daten lagern im Internet, bereit, auch im schulischen Umfeld genutzt zu werden. Doch auch hier gilt es, die Schülerinnen und Schüler nicht zu überfordern, will man die Methoden des „Data Mining“ im Unterricht gewinnbringend einsetzen. – Der 1. Teil dieses Beitrages erschien in ASTRONOMIE+RAUMFAHRT im Unterricht, Heft 6, 2019.



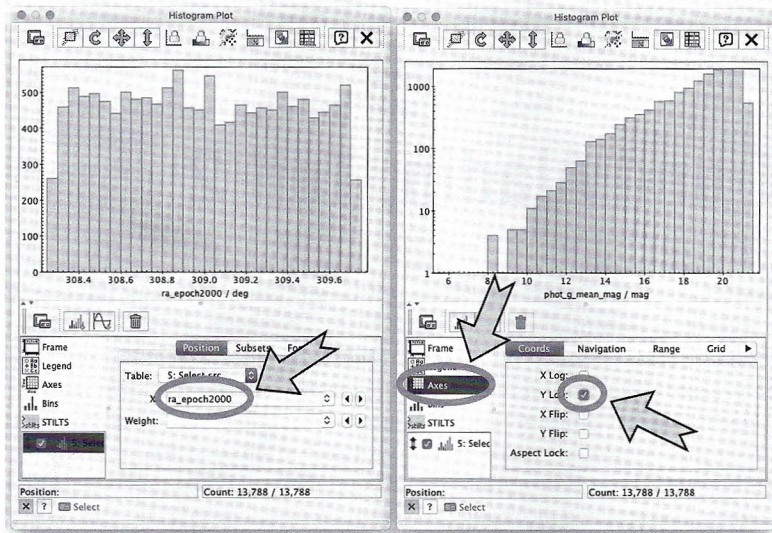
14 Vergleich zweier Sternfelder in der Milchstraße im Sternbild Schwan: mit Einfluss absorbierender interstellarer Materie (oben) und, dicht daneben, ohne Absorption (unten).



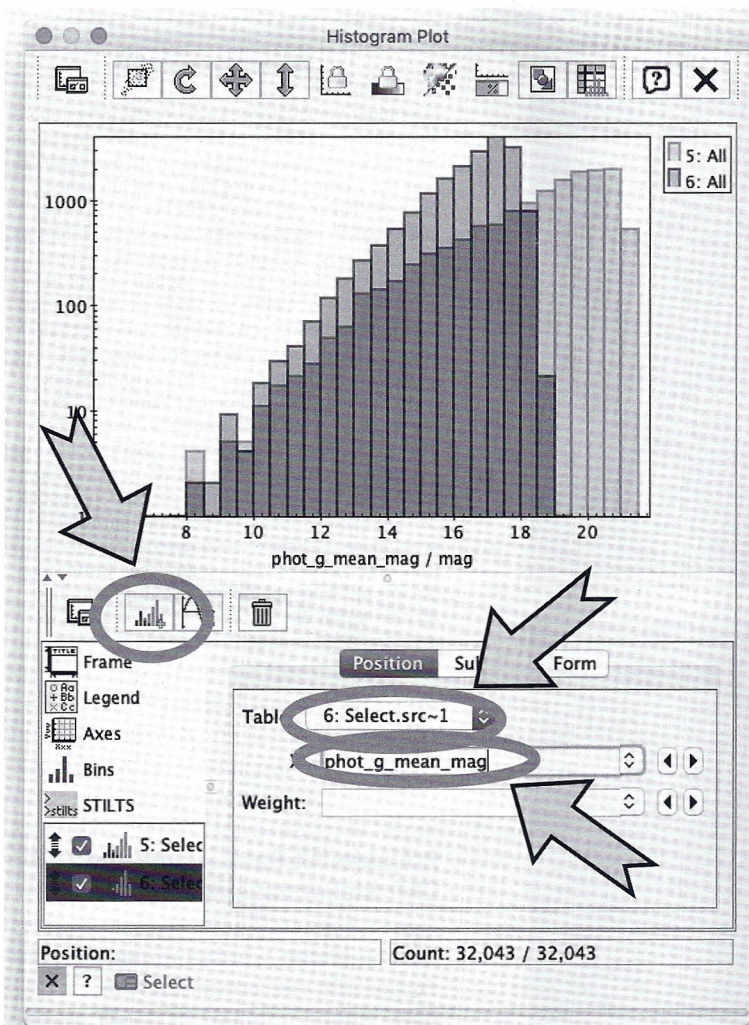
13 Schema eines Wolf-Diagramms, das den Einfluss einer Wolke aus absorbierender interstellarer Materie auf die Sternzahlen in einem betroffenen Himmelsareal zeigt. Aufgetragen ist der Logarithmus der Sternzahlen in einem Intervall scheinbarer Helligkeit $\log N(m)$ zwischen $m - 0,5$ mag und $m + 0,5$ mag gegen die scheinbare Helligkeit m . (In Gaia ist dies `phot_g_mean_mag`.) Ohne Dunkelwolke ergibt sich der Verlauf gemäß dem „Vergleichsfeld“ betitelten Graphen, entnommen einem dem durch Dunkelwolken beeinflussten Himmelsareal benachbarten Feld, das keine Dunkelwolken beinhaltet. Die Sternzahl steigt ohne Beeinflussung durch Dunkelwolken also exponentiell. Eine Dunkelwolke schwächt aber das Sternlicht ab einer gewissen Entfernung, die mit der scheinbaren Helligkeit m_1 direkt zusammenhängt, was sich in einem geringeren Anstieg der Sternzahlen für einen bestimmten Bereich scheinbarer Helligkeiten bemerkbar macht. Die Dunkelwolke endet in einer gewissen Entfernung, die mit der scheinbaren Helligkeit m_2 korreliert; ab hier laufen die Graphen der Sternzahlen wieder parallel zueinander.³

Projekte mit Gaia, Aladin und TOPCAT: Stellarstatistik im Unterricht

Im Folgenden werden einige Projekte vorgestellt, die beispielhaft in die vertiefte Benutzung von TOPCAT einführen sollen. In jedem Projekt werden dabei andere Details von TOPCAT vorgestellt, so dass es sinnvoll ist, sie zum besseren Erlernen der Software in ihrer Reihenfolge abzuarbeiten.



15 Notwendige Einstellungen, um in der Histogrammsicht von TOPCAT die Häufigkeitsverteilung der scheinbaren Helligkeitsklassen der Sterne im ersten (verdunkelten) Himmelsareal des Beispiels anzuzeigen. Nach Anwahl der Histogramm-Anzeige ((4) entsprechend Bild 4) ist darauf zu achten (Bild links), das richtige Datenmerkmal anzugeben (also Wechsel von ra_epoch2000 auf phot_g_mean_mag). Da die Sternzahlen in erster Näherung exponentiell ansteigen, sollte man – auch, um das Ergebnis mit dem Schema aus Bild 13 in Übereinstimmung zu bringen – die Skalierung der y-Achse logarithmieren (Bild rechts).



16 Überlagerung der Histogramme der Datenquellen des verdunkelten Himmelsareals und des Vergleichsfeldes aus dem Beispiel. Nach Klick auf die Histogramm-Option (links) wählt man unter Table die zweite geladene Datentabelle aus und gibt wiederum phot_g_mean_mag als anzuzeigenden Parameter ein. Daraufhin wird das obige Diagramm geplottet, das nun weiter untersucht werden kann. Die unterschiedliche Grenzhelligkeit am schwachen Ende des Histogramms ist übrigens auf den weiter oben beschriebenen Auswahleffekt von Aladin zurückzuführen.

Projekt 1: Wolf-Diagramme

In den Anfangsjahren des 20. Jahrhunderts ersann der Heidelberger Astronom Max Wolf (1863–1932) ein stellarstatistisches Verfahren, mit dessen Hilfe er in der Lage war, die absorbierende Wirkung von Wolken interstellarer Materie auf das Sternlicht nachzuweisen. Durch genauere Analyse seiner Diagramme konnte Wolf sogar die Entfernung, radiale Erstreckung und Dichte einer solchen Dunkelwolke abschätzen. Bild 13 zeigt die Grundzüge dieser Analyse, die hier jedoch nicht vollständig durchgeführt werden soll. Die Basis aber, die Diagramme selbst, lässt sich mit TOPCAT leicht herstellen.

Als Beispiel untersuchen wir ein Himmelsareal im Sternbild Schwan (Bild 14), das recht stark von Dunkelwolken beeinflusst ist, und vergleichen die dortigen Sternzahlen mit einem benachbarten Feld.

Schon die DSS-Bilder zeigen deutlich den Einfluss der Dunkelwolke auf das erste Gebiet, denn die Sternzahlen sind dort schon auf den ersten Blick viel geringer als im zweiten Bild. Wir untersuchen nun die Verteilung der Sternzahlen gemäß Bild 13. Dazu laden wir mithilfe von Aladin die Gaia-Daten für beide Bereiche nach TOPCAT. Dann erstellen wir eine Histogramm-Ansicht des ersten geladenen Datensatzes (Menüsymbol (4) gemäß Bild 4) und nehmen daran die notwendigen Einstellungen gemäß Bild 15 vor.

Um die Sternzahlen beider Sternfelder nun wie in Bild 13 direkt miteinander zu vergleichen, müssen die Histogramme beider Sternfelder in dasselbe Diagramm geplottet werden. Bild 16 zeigt das Vorgehen.

Man erkennt in Bild 16 nun sehr schön, wie die Graphen der beiden Himmelsareale mit abnehmender Sternhelligkeit (also zunehmender Magnitude phot_g_mean_mag) immer weiter auseinanderklaffen und kann bei genauerer Analyse sogar Bereiche parallelen Verlaufs wie in Bild 13 erkennen.

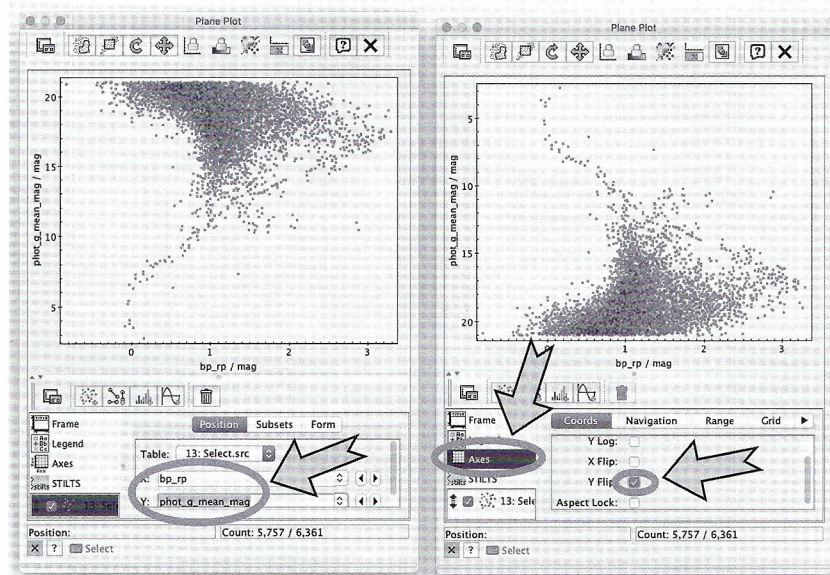
Projekt 2: Farben-Helligkeits-Diagramme offener Sternhaufen

Ein Farben-Helligkeits-Diagramm (kurz: FHD) ist ein zweidimensionales Diagramm, in dem die normierten Helligkeiten von Sternen gegen einen Farbindes aufgetragen werden, der gleichzeitig ein Maß für die Farbe (je größer der Index, desto röter; je klei-

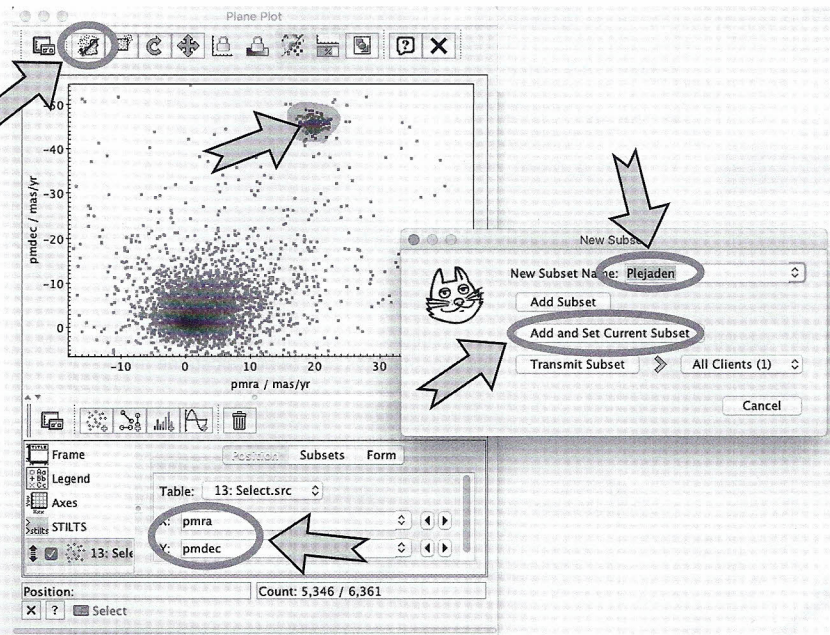
ner, desto blauer der Stern) und den Spektraltyp eines Sterns ist. Entsprechend bilden FHDs die wesentlichen Strukturen eines Hertzsprung-Russell-Diagramms ab: Hauptreihe, Riesenast, Weiße Zwerge usw. Unter „normierter Helligkeit“ versteht man dabei typischerweise die absolute Helligkeit der Sterne als Maß für ihre physikalische Leuchtkraft, also diejenige scheinbare Helligkeit, die die Sterne hätten, wenn sie allesamt exakt 10 Parsec von der Erde entfernt stünden.

Grundsätzlich lässt sich die Leuchtkraft von Sternen aber immer dann miteinander vergleichen, wenn man (gedacht oder real) Sterne in derselben Sternhaufen meistens gegeben: Alle Sterne dort können guten Gewissens als gleich weit entfernt angesehen werden.¹ Insofern kann man allein durch Messungen der scheinbaren Helligkeiten der Mitglieder eines Sternhaufens beispielsweise feststellen, welcher Stern das hellste Haufenmitglied ist. Und man kann wegen der direkten Helligkeitskorrelation aller Haufensterne zu deren absoluten Helligkeiten (die über das Entfernungsmodul gekoppelt sind) ein „relatives“ FHD eines Sternhaufens allein durch Gegenüberstellung der scheinbaren (statt der absoluten) Helligkeit aller Sterne gegen ihren Farbindex erstellen. TOPCAT bietet dazu mit der Option „2D-Plots“ (Funktion (5) in Bild 4) das notwendige Handwerkszeug, die „Plane Plots“.

Bild 17 zeigt die Erstellung des FHD des Sternfeldes um den offenen Sternhaufen der Plejaden im Sternbild Stier. Die Daten wurden wiederum mit *Aladin* in TOPCAT importiert, wobei man in *Aladin* bequem nach diesem Sternhaufen suchen kann, indem man in der *Command*-Leiste (Bereich (B) in Bild 1) einfach dessen Katalogbezeichnung „Pleiades“ eingibt (Leerzeichen bei Katalognummern nicht vergessen!). Man erkennt bereits sehr schön die Hauptreihe, bestehend aus Sternen, die ihre Energie über das Wasserstoffbrennen beziehen, und auch der Riesenast ist angedeutet. Allerdings ist das FHD noch recht erheblich durch zufällig gemeinsam mit M 41 im selben Bildfeld stehende Sterne „verschmutzt“ – verschmutzt deshalb, da man ihre scheinbaren Helligkeiten nicht mit denen der Haufensterne vergleichen darf, denn sie stehen wahrscheinlich in gänzlich anderen Ent-



17 Erstellung des Farben-Helligkeits-Diagramms der Plejaden in TOPCAT. Auf der x-Achse wird der Farbindex aufgetragen (Datenmerkmal bp_rp im Gaia DR2-Katalog), auf der y-Achse die scheinbare Helligkeit (phot_g_mean_mag). Man erhält den Plot auf der linken Seite des Bildes. Da FHDs normalerweise mit aufsteigender Sternhelligkeit orientiert sind (also abnehmender Magnitude), muss die y-Achse noch in umgekehrter Reihenfolge geplottet werden. Dazu wird der entsprechende Axes-Parameter geändert (rechts).



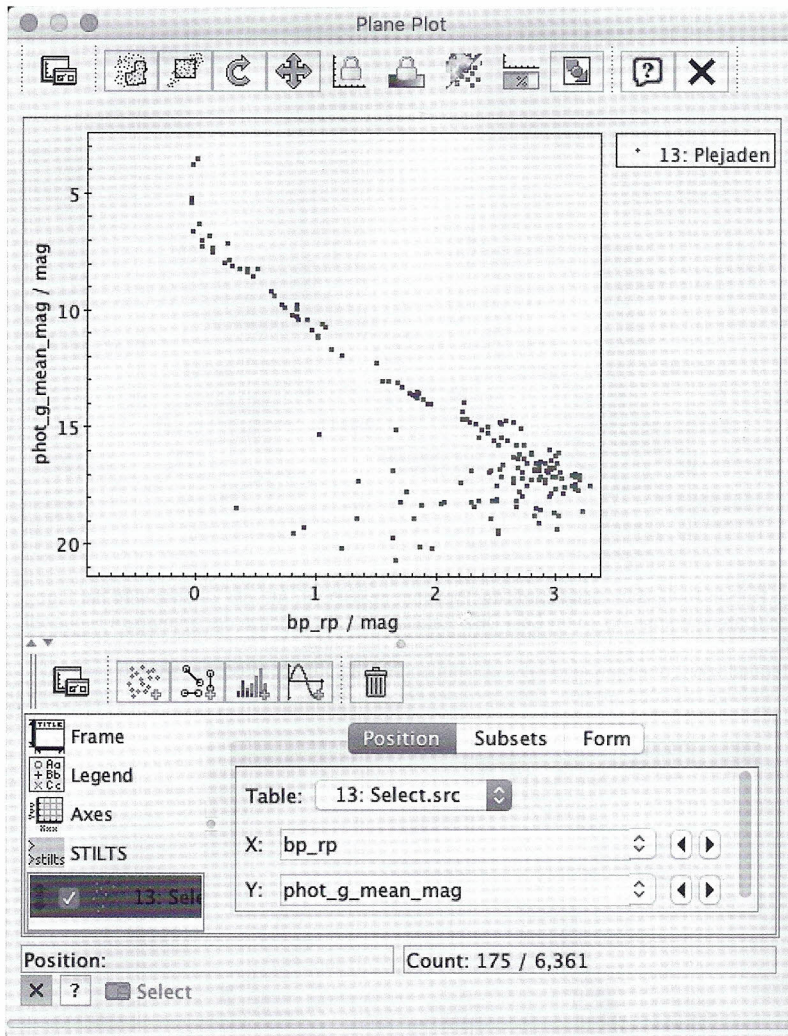
18 Eingrenzung potentieller Sternhaufenmitglieder in den Plejaden (M45). Gezeigt ist ein 2D-Plot des Datensatzes von M 45, der auf der x-Achse die jährlichen Eigenbewegungen aller Sterne in Rektaszension und auf der y-Achse die Eigenbewegung in Deklination (jeweils in 1/1000 Bogensekunden pro Jahr) verzeichnet. Alle Mitglieder des Sternhaufens haben – da es sich um eine gravitativ gebundene Sterngruppe handelt – sehr ähnliche Eigenbewegungen, so dass sie sich im Diagramm durch die starke Häufung bei etwa (+18|–47) bemerkbar machen. Diese Sterngruppe kann nun als eigener Teildatensatz (*Subset*) definiert werden, indem man im 2d-Plot-Fenster das *Subset*-Symbol oben links klickt und dann bei gedrückter Maustaste die betreffenden Sterne umrandet. (Es bildet sich eine grau unterlegte Fläche.) Zum Schluss klickt man erneut auf das *Subset*-Symbol, und es erscheint das Menüfenster rechts. Hier klickt man die Option *Add and Set Current Subset*, woraufhin weitere 2D-Plots standardmäßig nur noch mit dem ausgewählten Teildatensatz arbeiten.

fernungen. Mit Hilfe von TOPCAT kann man nun aber wiederum recht einfach die Kandidaten für „echte“ Haufenmitglieder bestimmen. Dazu müssen wir eine passende Untermenge der dargestellten Sterne anlegen. Das Vorgehen zeigt **Bild 18**, und das Ergebnis ist in **Bild 19** zu sehen: ein im Vergleich zu **Bild 17** stark „bereinigtes“ FHD, in dem

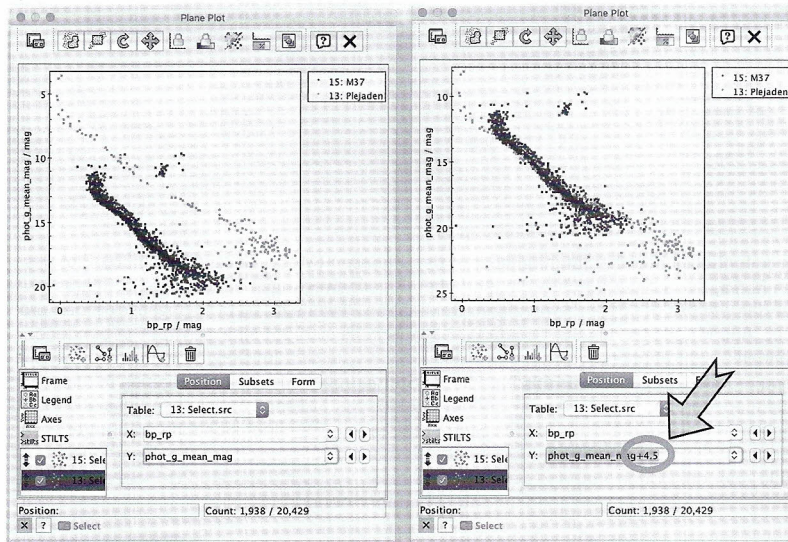
die Hauptreihe bestens zu erkennen ist und sich sogar einige Rote Riesen (Mitte oben im FHD) zeigen.

Projekt 3: Entfernung von Sternhaufen; Entfernungskalibrierung

Zur Entfernungskalibrierung offener Sternhaufen machen wir uns das Entfernungsmodul zunutze:



19 Mit der Methode aus Bild 18 bereinigtes Farben-Helligkeits-Diagramm der Plejaden. Dieses FHD enthält praktisch nur noch wirkliche Mitglieder des Sternhaufens und keine Feldsterne mehr.



20 Links: Gleichzeitiger Plot der bereinigten FHDs der Plejaden (M 45, grün) und von M 37 (blau). Man erkennt sofort die größere Entfernung von M 37, denn die Hauptreihe ist systematisch hin zu schwächeren scheinbaren Helligkeiten $phot_g_mean_mag$ verschoben. Das Entfernungsmodul $m_{M37} - m_{Plejaden}$ beträgt etwa 4,5 Magnituden. Überprüfen können wir diese Vermutung, indem wir zu den Werten der scheinbaren Helligkeit der Plejaden 4,5 Magnituden addieren (rechts), ein Wert, den wir „relatives Entfernungsmodul“ nennen wollen, da noch keine Kalibrierung der Entfernungen erfolgt. Dieser Wert kann also direkt im TOPCAT-Diagramm experimentell bestimmt werden, bis man eine möglichst gute Übereinstimmung beider Hauptreihen hat. Nicht berücksichtigt wurde bei dieser Analyse übrigens die interstellare Extinktion, die einerseits eine allgemeine Schwächung des Sternlichts verursacht (entsprechend einer Überschätzung der Entfernungsmoduln bzw. des Entfernungsverhältnisses) und andererseits eine Rötung des Sternlichts zur Folge hat (was eine Verschiebung des FHD nach rechts bedingt).

$$m - M = -5 + 5 \log_{10}(r) \text{ bzw.}$$

$$r = 10^{0,2(m - M + 5)}. \quad (1)$$

Bekanntlich macht das Entfernungsmodul die Aussage, dass die Differenz der scheinbaren zur absoluten Helligkeit eines Objekts in direktem Zusammenhang mit seiner Entfernung steht. Allgemeiner gesprochen steht die Differenz der scheinbaren Helligkeiten zweier gleichartiger Objekte (z. B. zwei Sternhaufen) in direktem Zusammenhang mit ihrem Entfernungsverhältnis:

$$\frac{r_2}{r_1} = \sqrt{2,512^{m_2 - m_1}}. \quad (2)$$

Dieses Entfernungsverhältnis kann mit TOPCAT sehr einfach untersucht werden, wenn man die FHDs zweier offener Sternhaufen in dasselbe 2D-Diagramm plottet. Dazu verwenden wir das bereinigte FHD der Plejaden aus Projekt 2 und erstellen zusätzlich ein entsprechendes FHD des offenen Sternhaufens M 37. Den entsprechenden Plot zeigt **Bild 20**.

Die grafische Analyse ergibt ein relatives Entfernungsmodul der Plejaden zu M 37 von $m_{M37} - m_{Plejaden} = 4,5$ Magnituden. Gemäß Gleichung (2) ergibt sich somit ein Entfernungsverhältnis der beiden Sternhaufen von $\frac{r_{M37}}{r_{Plejaden}} \approx 8$. Also ist M 37 ungefähr achtmal so weit von uns entfernt wie die Plejaden. Für eine absolute Kalibrierung benötigen wir nun nur noch ein „Referenz-FHD“ eines Sternhaufens, dessen Entfernung bekannt ist. Auch hier bieten sich die Plejaden an, denn sie stehen der Erde so nah, dass Gaia ihre Parallaxen und somit ihre Entfernungen recht zuverlässig bestimmen kann. Mit dem Literaturwert der Plejadenentfernung von 136 Parsec können wir die M37-Entfernung folglich zu $r_{M37} \approx 8 \cdot r_{Plejaden} = 8 \cdot 136 \text{ pc} = 1088 \text{ pc}$ bestimmen – nicht optimal (Literaturwert: 1383 pc), aber für diese einfache Analyse sicherlich ein gutes Ergebnis (zumal jedes weitere Zehntel Magnitudendifferenz hier ca. 50 pc zusätzliche Entfernung bedeutet).

Offiziell übernimmt natürlich kein einzelner Sternhaufen die Rolle eines „Referenzhaufens“, sondern man vergleicht das FHD mit einem auf absolute Helligkeiten normierten FHD – das typischerweise von Sternen der Sonnenumgebung stammt. Aber auch das Plejaden-FHD können wir mit TOPCAT auf absolute Helligkeiten normieren – und

so zukünftig durch Vergleich hiermit vom „relativen“ zum „absoluten“ (und damit eigentlichen!) Entfernungsmodul gelangen. Dafür müssen wir lediglich mithilfe der verfügbaren Informationen aus dem Datensatz der Plejaden in TOPCAT die absoluten Helligkeiten berechnen. Um sie zu berechnen, benötigen wir lediglich die scheinbare Helligkeit jedes Plejadensterns (die ja als `phot_g_mean_mag` bereits vorliegen) sowie dessen Entfernung. Sie liegt zwar noch nicht vor, kann aber direkt aus der trigonometrischen Parallaxe berechnet werden (wobei wir deren Messungenauigkeiten hier nicht weiter betrachten wollen). Da die Parallaxen im Gaia DR2-Katalog in tausendstel Bogensekunden gegeben werden, muss die Berechnung der Entfernung (in Parsec) folgendermaßen erfolgen:

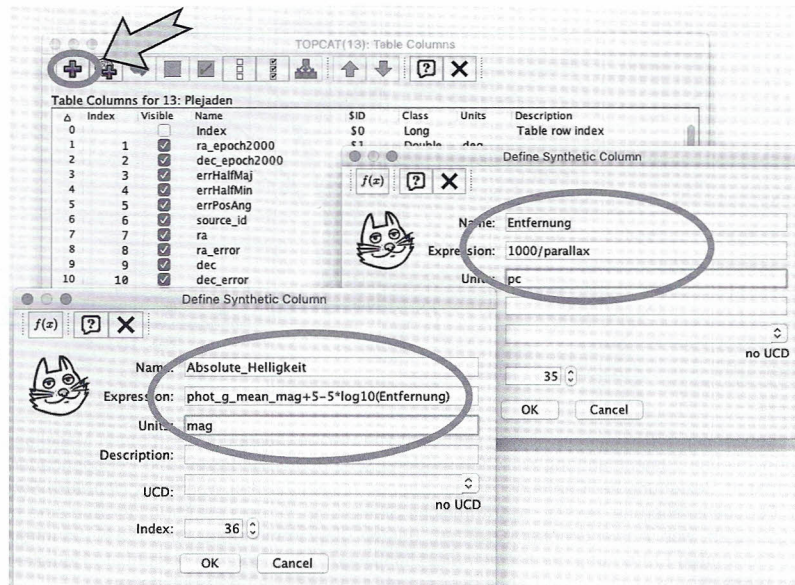
$$\text{Entfernung} = \frac{1}{\pi''} = \frac{1000}{\text{parallax}} \quad (3)$$

$$\text{Absolute}_{\text{Helligkeit}} = \text{phot}_{\text{g_mean_mag}} + 5 - 5 \log_{10}(\text{Entfernung}). \quad (4)$$

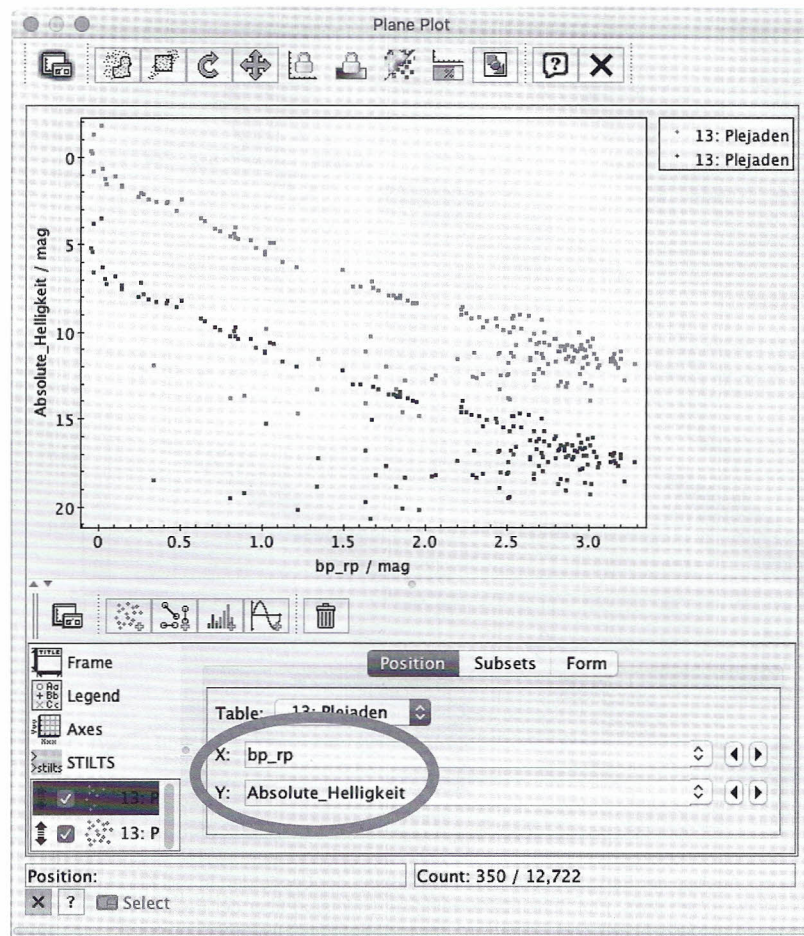
Mit r (Formel 3, `parallax` steht für den entsprechenden Gaia-Eintrag für die trigonometrische Parallaxe) kann mit Formel (4) die absolute Helligkeit berechnet werden, im Fall des Gaia-Katalogs verwendet man natürlich `phot_g_mean_mag` als scheinbare Helligkeit. In TOPCAT muss dementsprechend also die Datentabelle der Plejaden um zwei weitere Spalten bzw. Merkmale ergänzt werden: um die Entfernung und die absolute Helligkeit. Die TOPCAT-Datentabelle erweitern wir, indem wir zunächst die Funktion (2) in der Menüleiste aufrufen („*Display column metadata*“). Über das Plus-Symbol können wir nun die beiden neuen Merkmale der Tabelle hinzufügen, wie in **Bild 21** zu sehen ist. Das Ergebnis zeigt **Bild 22**: Das FHD der Plejaden ist nun auf absolute Helligkeiten kalibriert. Das rote FHD könnte somit direkt zur Entfernungsbestimmung per Entfernungsmodul benutzt werden.

Projekt 4: Die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden

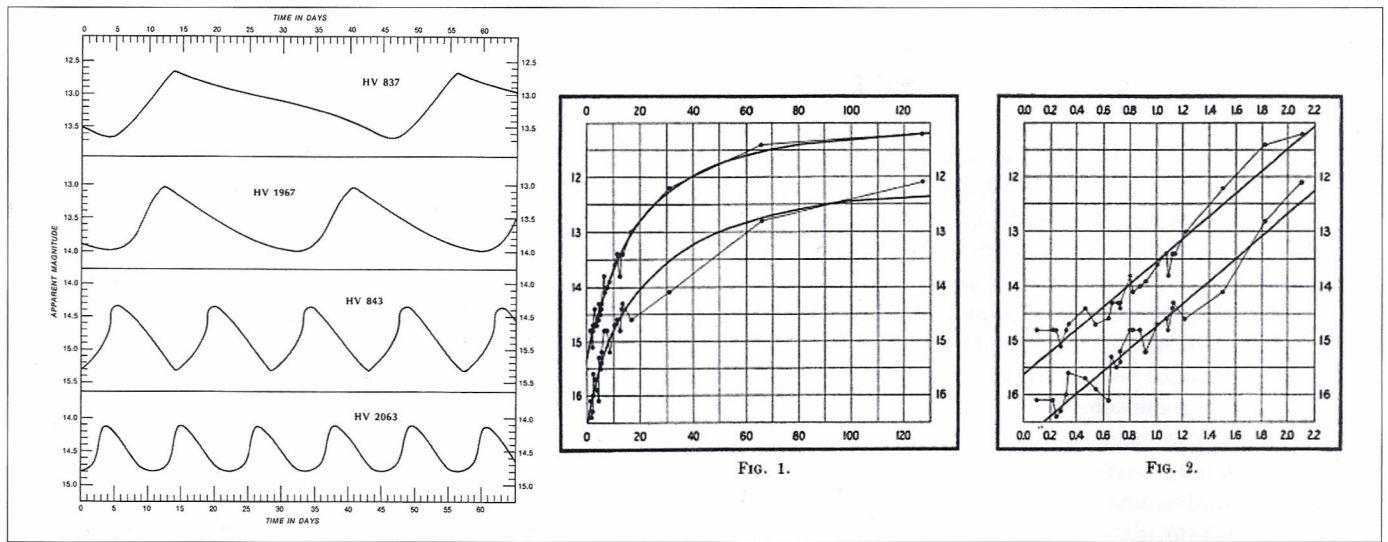
Die amerikanische Astronomin *Henrietta Swan Leavitt* (1868–1921) gilt als Entdeckerin der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Veränderlichen Sterne von Typ δ Cephei, meist kurz „Cepheiden“ genannt. Mithilfe dieser Beziehung lässt sich die Entfernung eines solchen Veränderlichen allein durch Bestimmung



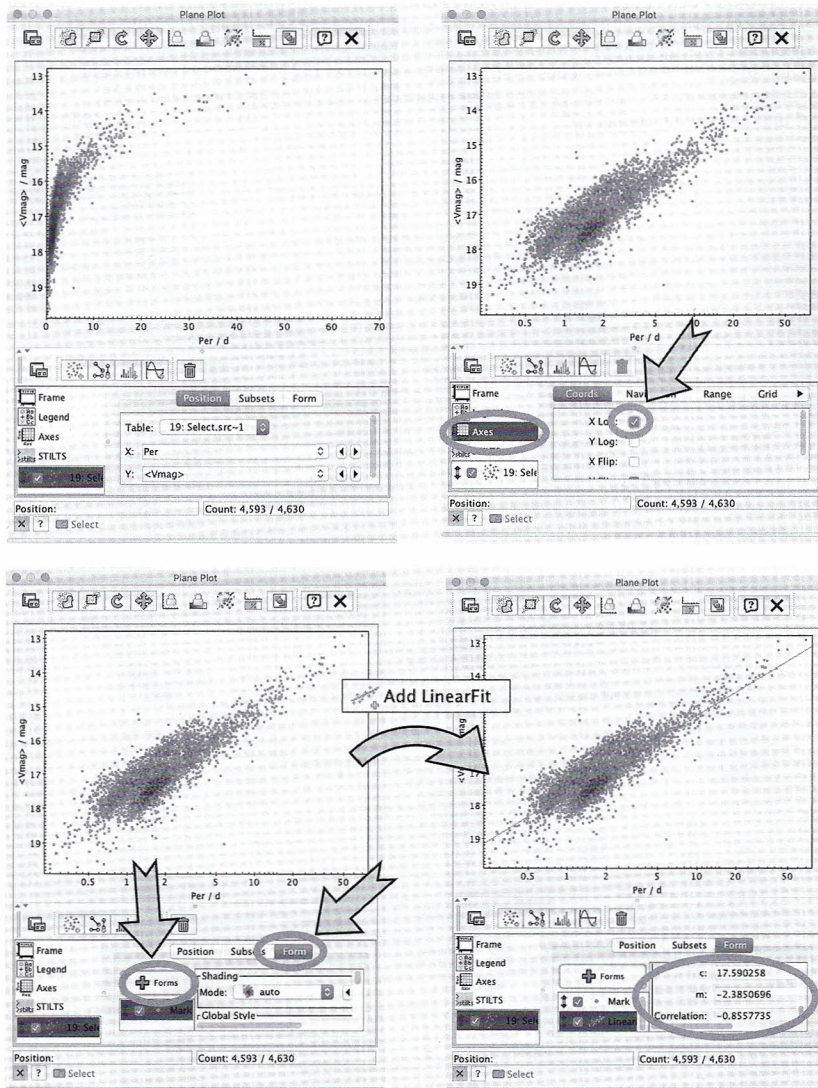
21 Eingabe zweier neuer „synthetischer“ Merkmale für die Datentabelle der Plejaden, die aus den vorhandenen Daten berechnet werden. Der Aufruf erfolgt über Funktion (2) im TOPCAT-Hauptfenster (Bild 4). Die zwei Eingabefenster für die Erstellung einer „*Synthetic Column*“ sind ebenfalls abgebildet: eine für die Berechnung der Entfernung aus der Parallaxe und eine für die Bestimmung der absoluten Helligkeit jedes Sterns. Nach Fertigstellung enthält die Datentabelle der Plejaden entsprechend der Namensgebung zwei zusätzliche Datenspalten bzw. Merkmale: „*Entfernung*“ und „*Absolute_Helligkeit*“.



22 Ergebnis der Entfernungskalibrierung an den Plejaden mit dem Entfernungsmodul. Während die blauen Datenpunkte nochmals die Originaldaten wie in Bild 19 zeigen, wurden die rot gefärbten Daten mit den beschriebenen Formeln wie in Bild 21 berechnet. Man kann hieraus auch das Entfernungsmodul der Plejaden direkt bestimmen: $m - M = 5,7$ mag.



23 Links: Lichtkurven der mittleren scheinbaren Helligkeit von vier Cepheiden in der Kleinen Magellanschen Wolke⁴. Man erkennt bereits bei oberflächlicher Analyse den prinzipiellen Zusammenhang zwischen mittlerer scheinbarer Helligkeit und Periodendauer. Mitte und rechts: Diagramme zur Entdeckung der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden in der Kleinen Magellanschen Wolke von *Henrietta Swan Lewitt* aus ihrer Originalveröffentlichung von 1912⁵ (Mitte: lineare Periodenskalerung, rechts: logarithmische Skalierung). Anders als im linken Bild sind hier jeweils die Maximal- und Minimalhelligkeit jedes Cepheiden aufgetragen, was in zwei Graphen resultiert. Beiden Diagrammen fehlt noch die Nullpunktkorrektur: Auf der y-Achse sind jeweils aufgrund der damals noch unbekanntenen Entfernung der Kleinen Magellanschen Wolke lediglich scheinbare Helligkeiten aufgetragen, was aber trotzdem zu aussagekräftigen Resultaten führt, da alle gemessenen Cepheiden ja praktisch gleichweit entfernt stehen.



24 Vier Schritte zur Analyse der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden in der Kleinen Magellanschen Wolke. Oben links: Plot Scheinbare Helligkeit (<Vmag>) über der Periode (Per). Oben rechts: Logarithmierung der x-Achse. Der Graph wird linear. Unten links: Vorbereitung zur Anzeige einer Ausgleichsgeraden. Anwahl von *Forms*, dann Klick auf das grüne Kreuz. Dann Auswahl der Option „Add LinearFit“. Unten rechts: Graph mit eingezeichnete Ausgleichsgerade. Im Parameterbereich rechts unten im Fenster kann man bis nach unten scrollen und dort Steigung (m), y-Achsenabschnitt und Korrelationskoeffizienten des Fits ablesen. Daraus kann man eine vorläufige mathematische Perioden-Leuchtkraft-Beziehung ableiten.

der Periodendauer seines Lichtwechsels bestimmen (**Bild 23**). Da Cepheiden eine sehr hohe absolute Helligkeit haben, sind sie noch in sehr großen Entfernungen von mehreren Millionen Lichtjahren beobachtbar, was sie zu wichtigen „kosmischen Standardkerzen“ gemacht hat. Mit *Aladin/TOPCAT* können wir *Leavitts* Entdeckungen, die sie seinerzeit durch die Analyse von Fotoplatten der Kleinen Magellanschen Wolke in jahrelanger, mühseliger Arbeit gemacht hatte, selbst nachvollziehen – innerhalb von Minuten, denn heutzutage liegt modernes Datenmaterial über die Cepheiden frei verfügbar vor. Dabei nutzen wir zunächst wieder den Umstand, dass die enorme Sternansammlung der Kleinen Magellanschen Wolke so weit entfernt ist, dass in guter Näherung alle Sterne gleich weit von uns entfernt sind, mithin also wieder ein direkter Helligkeitsvergleich der Sterne untereinander möglich ist – es fehlt nur noch eine Nullpunktkorrektur.

In den Daten des Gaia DR2-Katalogs finden wir allerdings keine Informationen zum Lichtwechsel Veränderlicher Sterne, so dass wir an anderer Stelle suchen müssen. Aber die komplette *vizieR*-Datenbank steht uns zur Verfügung – und hier werden wir fündig.

In *Aladin* suchen wir dazu im *select*-Feld (Bereich (C) im Hauptfenster) nach einem geeigneten Katalog. Wir finden ihn als Resultat der Beobachtungen des OGLE-Projekts.² Dazu lassen wir zunächst die Region um die Kleine Magellansche Wolke anzeigen (Eingabe von „SMC“ für „Small Magellanic Cloud“

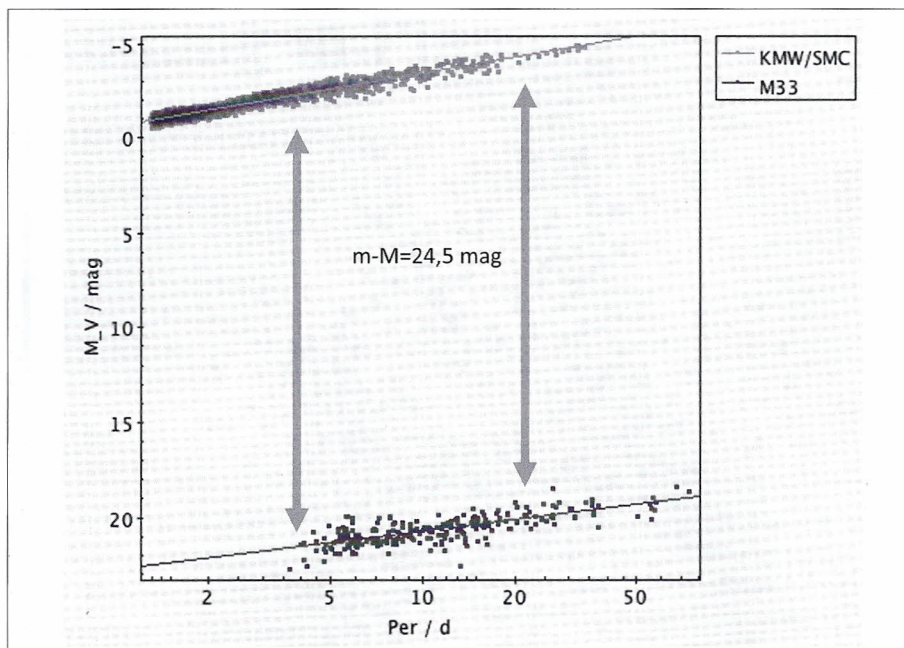
im *Command*-Feld und Zoom auf ein genügend großes Gesichtsfeld); dann geben wir im *select*-Feld von *Aladin* die folgenden Suchbegriffe ein: „OGLE classical cepheids SMC“. Mit einem ähnlichen Dialog wie in Bild 12 und 13 lassen wir in *Aladin* alle Objekte des Katalogs als Symbole im Himmelsfenster sowie als neue Datenebene anzeigen. Die geladene Tabelle übertragen wir nun auf die bekannte Weise per Kontextmenü (Bild 5) in TOPCAT. Dort erstellen wir einen 2D-Plot (Funktion (5) gemäß Bild 4) mit der Periodendauer *Per* auf der x-Achse und der scheinbaren Helligkeit $\langle V_{mag} \rangle$ (Achtung – das Merkmal heißt hier anders als im Gaia-Katalog!) auf der y-Achse. Wir erhalten das obere linke Diagramm aus **Bild 24** (y-Achse wiederum umgekehrt geplottet), das wir entsprechend den im Bild gezeigten Schritten weiter analysieren, bis wir durch lineare Regression auf eine vorläufige mathematische Perioden-Leuchtkraft-Beziehung kommen:

$$V_{mag} = -2,39 \log_{10}(Per) + 17,59.$$

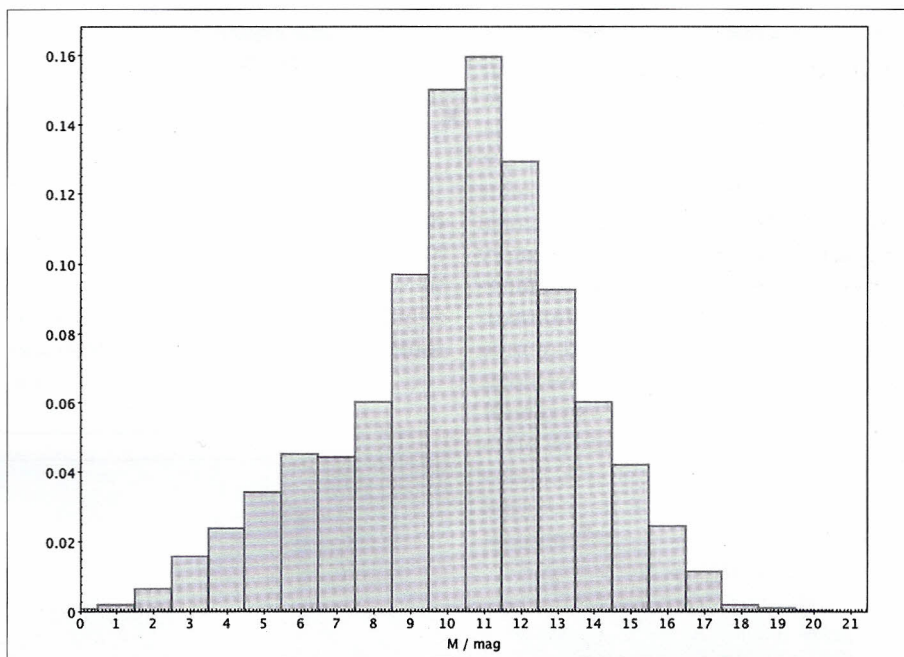
Das Ergebnis ist noch nicht sehr genau, was unter anderem daran liegt, dass wir die Cepheiden der beiden Populationen gemeinsam analysiert haben, obwohl sie im Perioden-Leuchtkraft-Diagramm ganz offensichtlich gut voneinander getrennt sind. Außerdem haben wir die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung noch nicht auf absolute Helligkeiten normiert, was aber durch Hinzufügen einer weiteren Datenspalte zur Cepheiden-Tabelle in TOPCAT (ähnlich Bild 21), die über das bekannte Entfernungsmodul der Kleinen Magellanschen Wolke ($m - M = 18,6$ mag, entsprechend einer Entfernung von 52.000 Parsec oder 170.000 Lichtjahren) die absoluten Helligkeiten mit aufnimmt, schnell erledigt. Damit hat man dann eine kalibrierte Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zur Verfügung, anhand derer man durch Vergleich mit den Beziehungen in anderen Galaxien beispielsweise deren Entfernung wiederum über das Entfernungsmodul bestimmen kann (entsprechend dem Vorgehen aus Bild 20). Ein Analyseergebnis zeigt **Bild 25**.

Weitere Projektideen

Im Folgenden werden als Anregung für eigene Experimente noch die Ergebnisse einiger Analysen gezeigt, die mit TOPCAT durchgeführt wurden (**Bil-**



25 Bestimmung des Entfernungsmoduls und der Entfernung der Galaxie M 33 durch Vergleich des Graphen ihrer Perioden-Leuchtkraft-Beziehung (PLB) mit der auf absolute Helligkeiten normierten PLB der Kleinen Magellanschen Wolke. Das mit TOPCAT durch Ausprobieren (vgl. Bild 20) bestimmte Entfernungsmodul von 24,5 mag entspricht laut Formel (1) einer Entfernung von etwa 800.000 Parsec (Katalogwert: 850.000 pc).

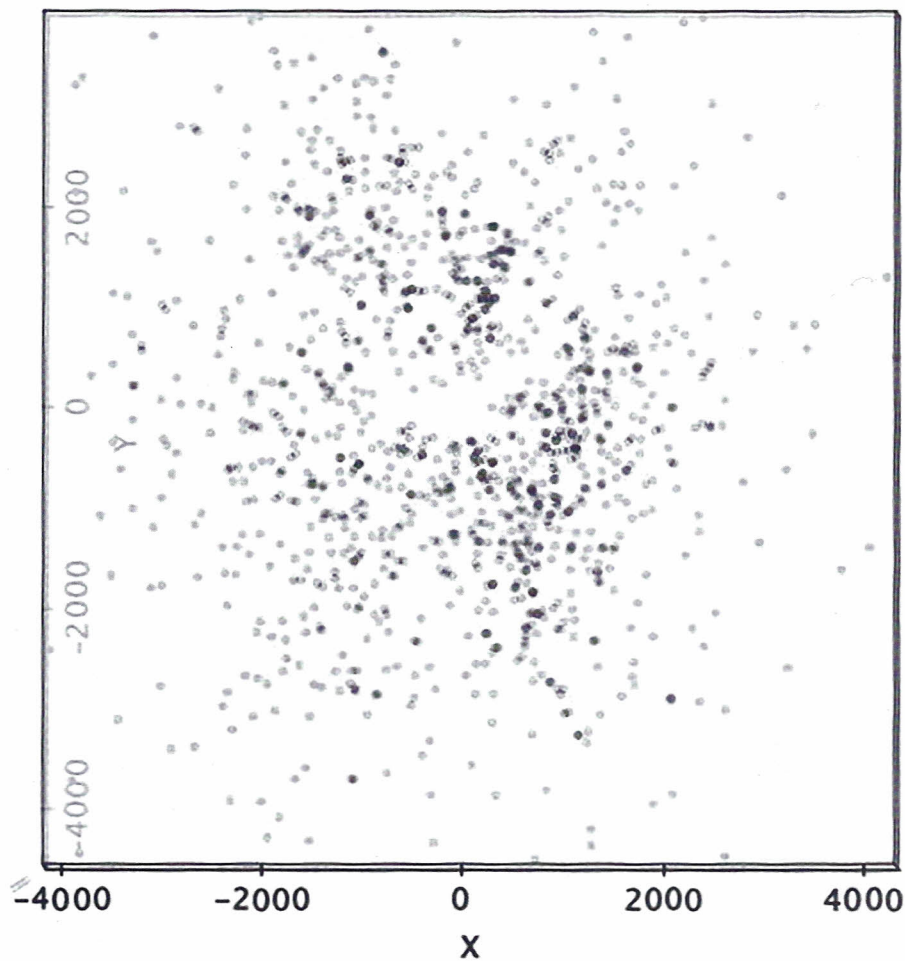


26 Leuchtkraftfunktion aller Sterne näher als 25 Parsec, extrahiert aus dem Gaia DR2-Katalog. Abgebildet sind die relativen Anteile der Sterne mit ihren absoluten Helligkeiten. Deutlich erkennt man ein Plateau bei $M = 6$ mag sowie das Maximum bei sehr schwachen Sternen mit $M = 11$ mag. In der näheren Sonnenumgebung fehlen helle Riesen und Überriesen mit $M < 0$ mag.

der 26–28). In den meisten Fällen wurde dabei nicht mehr der „Umweg“ der Objektauswahl über *Aladin* genommen, sondern es wurde direkt über die über Funktion (1) in der TOPCAT-Eingabemaske (Bild 4) verfügbaren Datenbanktools die Datenextraktion vorgenommen.

Fazit

Der Funktionsumfang der beiden Programme *Aladin* und TOPCAT ist so groß, dass die hier beschriebenen Methoden gerade einmal an der Oberfläche kratzen können; die beschriebenen Beispiele können maximal als Anregung die-



27 Verteilung offener Sternhaufen in der Milchstraße aus dem Katalog „*Optically visible open clusters and candidates*“ von Dias et al. Blickrichtung direkt auf die xy-Ebene, also auf die galaktische Ebene. Dargestellt sind nur Sternhaufen mit galaktischen Breiten $|b| \leq 3^\circ$. Die Sonne befindet sich bei (0|0), die Einheiten sind Parsec. Deutlich zeigen sich Ansätze zur Spiralstruktur der Milchstraße.

zung über die Datenauswertung zur Erkenntnis zu gelangen, waren noch nie besser als heute!

Anmerkungen

[1] Es gibt allerdings einige Ausnahmen bei Sternhaufen, die in sehr geringen Entfernungen stehen, beispielsweise die Hyaden, die Plejaden oder Melotte 111, der „Coma Berenices“-Sternhaufen. Dort spielen die individuellen Entfernungen jedes Einzelsterns sehr wohl eine nicht vernachlässigbare Rolle.

[2] Das *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE) ist ein Projekt der Universität Warschau, das seit 1992 unter anderem die Region der beiden Magellanschen Wolken regelmäßig auf Veränderungen der Sternhelligkeiten untersucht.

[3] Aus H. Scheffler: *Interstellare Materie*. Vieweg Verlag, 1988, S. 129

[4] Grafik aus J. M. Pasachof, R. W. Goebel: „*Laboratory Exercises in Astronomy – Cepheid Variables and the Cosmic Distance Scale*“, Sky&Telescope März 1979, S. 242. Daten basierend auf Messungen von H. C. Arp.

[5] H. S. Leavitt: „*Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*“, Harvard College Observatory Circular 173, S. 3

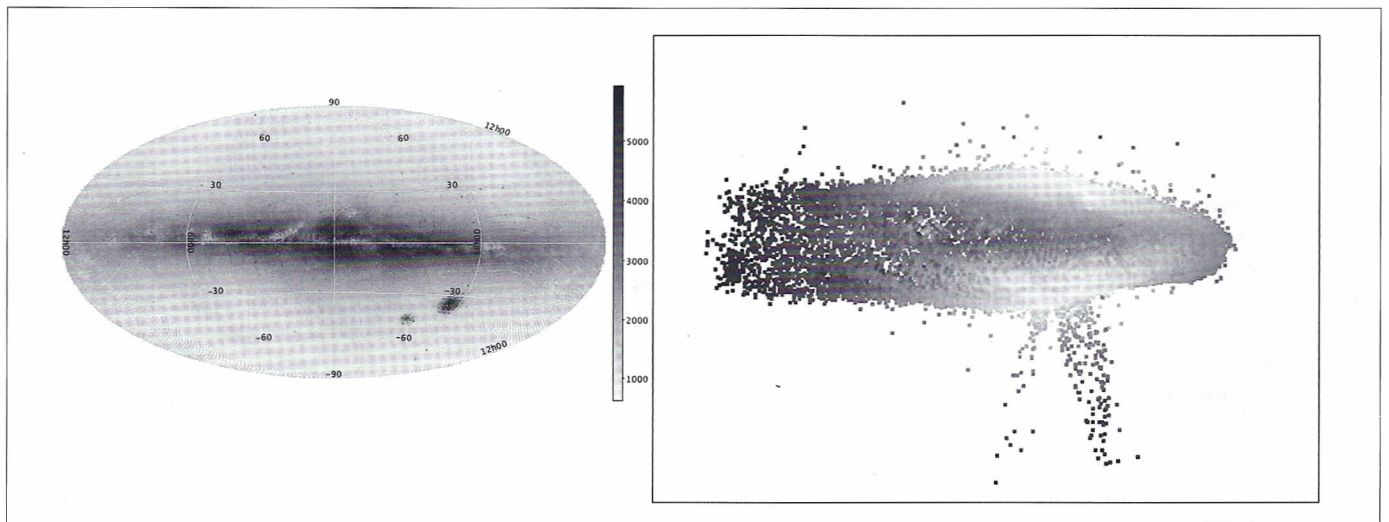
[6] <https://healpix.sourceforge.io>

nen, sich weitergehend mit dem ganzen Software-Paket des *Virtual Observatory* zu beschäftigen. Das soll aber niemanden von der Nutzung dieser fantastischen Hilfsmittel abhalten, und gerade

der enorme Funktionsumfang bietet die Möglichkeit zu intensiver projektorientierter Arbeit für die Schülerinnen und Schüler. Die Möglichkeiten, im Klassenraum von der astronomischen Beobach-

Dr. rer. nat. Arndt Latußeck

Bischöfliches Gymnasium Josephinum
Domhof 7
31134 Hildesheim
E-Mail: arndt@latusseck.com



28 Nachbildung der „Herschel-Milchstraße“ (rechts) aus Daten zur Sterndichte über HEALPix-Daten,⁶ wie sie auch für den Gaia DR2-Katalog vorliegen (links, Darstellung der Sterndichte für den gesamten Himmel in Aitoff-Projektion). Bereits im Jahr 1785 hatte der deutsch-englische Astronom *William Herschel* allein aus Sternzählungen einen ersten stellarstatistischen Ansatz zur Analyse der dreidimensionalen Struktur der Milchstraße verfolgt. Seine Methode lässt sich mit den verfügbaren Daten gut nachvollziehen. Das Resultatbild rechts ist dabei nur ein Standbild eines in seinen drei Dimensionen in TOPCAT drehbaren Milchstraßenbildes.