

In diesem Kapitel wollen wir das Objekt *Stern* definieren und einige beschreibende Parameter, auch *Zustandsgrößen* genannt, kennenlernen. Diese Vorarbeiten sind für das Verständnis der unterschiedlichen Entwicklungen und Typen von Sternen unabdingbar. Wir werden einige Begrifflichkeiten erklären und motivieren, die zum Wortschatz der Astrophysik gehören und die Ihnen das Studium weiterführender Literatur erleichtern sollen. Wir werden versuchen, diese komplexe Vorarbeit immer in einem ganzheitlichen Aspekt darzustellen um zum einen die Arbeiten von über 2 000 Jahren entsprechend zu würdigen und zum anderen Ihnen den Zugang zu erleichtern.

---

## 2.1 Was sind Sterne?

Die Prozesse innerhalb eines Sterns bewirken, dass er Licht aussendet, das uns nach einer mehr oder weniger langen Reise durch das Universum erreicht. Sprechen wir von der Zeit, die das Licht eines Sterns benötigt um uns Beobachter zu erreichen, dann beschreiben wir die Dauer in Größenordnungen von Jahren. Das Licht des uns nächsten Sterns  $\alpha$  Cen benötigt etwa 4,4 Jahre auf seiner Reise zur Erde. Wir sehen also den Hauptstern im Sternbild *Centaurus* (bei  $\alpha$  Cen handelt es sich um einen Doppelstern, daher sprechen die Astronomen von  $\alpha$  Cen A, wenn sie den helleren der beiden Sterne und von  $\alpha$  Cen B, wenn sie die zweite Komponente meinen) so, wie sein Zustand vor über vier Jahren war. Die Beschäftigung

mit dem Universum macht uns die Vergangenheit überdeutlich. Bevor wir einige Zustandsgrößen kennenlernen, wollen wir eine vorläufige Definition der Sterne geben:

- Sterne sind helle Objekte am Himmel, welche auch beim Blick durch ein Teleskop *punktförmig* bleiben.
- Sterne produzieren eigenes Licht, sind also *selbstleuchtend*.
- Sterne müssen *massereich* sein, denn wir wissen aus unserem Sonnensystem, dass die Sonne durch Gravitation andere Himmelskörper wie Planeten, Kleinplaneten oder Kometen bindet bzw. ihr Schwerezentrum darstellt.
- Sterne müssen teilweise sehr *leuchtkräftig* sein, denn selbst weit entfernte Sterne sind für uns noch mit bloßem Auge sichtbar.

Klären wir noch zwei Fragen, ehe wir zu den Zustandsgrößen der Sterne kommen:

*Woher kommt die Bezeichnung Stern?* Diese leitet sich von den lateinischen Worten *stella* (Stern) und *astrum* (Stern, Gestirn) her.

*Wie viele Sterne gibt es in unserem Universum?* Mit dem bloßen Auge können wir abseits der Städte auf der nördlichen Halbkugel etwa 5 000 Sterne sehen. Würden Sie um den Globus reisen und jeden Teil des sichtbaren Himmels durchmusternd, würde diese Inventur etwa 9 000 Sterne ergeben. In unserer Galaxis existieren etwa 100–200 Mrd. Sterne. Dies ergaben Himmelsdurchmusterungen der letzten Jahre und unsere Galaxis ist von eher durchschnittlicher Größe. Elliptische Galaxien haben teilweise bis zu zehnmal mehr Sterne als unsere Galaxis. Untersuchungen mit modernen Instrumenten wie dem *Hubble Space Telescope* oder dem *Herschel Space Observatory* ergaben, dass es etwa 200 Mrd. Galaxien gibt. Das *Hubble Space Telescope* fotografierte einen Himmelsausschnitt, der gerade einmal die Größe eines hundertstels Vollmonddurchmessers hatte. In dieser Aufnahme, dem sogenannten *Hubble Ultra Deep Field*, zählten die Astronomen etwa 10 000 Galaxien. Eine *isotrope und homogene*<sup>1</sup> Verteilung vorausgesetzt, ergibt sich so eine Gesamtzahl von etwa 200 Mrd. Galaxien. Diese Zahl ist aber als Untergrenze zu sehen, denn das Licht muss die Zeit gehabt haben um zu uns zu gelangen. Man spricht in diesem Zusammenhang von dem *beobachtbaren*

---

<sup>1</sup> Das *Kosmologische Prinzip* sagt, dass unser Universum *räumlich isotrop* und *homogen* ist. Mit *räumlich* meint man den Zustand des Universums zu einer festen Zeit. *Isotrop* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass keine Richtung, *homogen*, dass kein Punkt im Universum ausgezeichnet ist. Aus der Homogenität und der Isotropie folgt eine maximale Raumsymmetrie. Der betrachtete Raumbereich muss aber so groß gewählt sein, dass die Materie im Mittel gleich verteilt ist. Das *Kosmologische Prinzip* wurde erstmalig im Jahr 1933 vom englischen Astrophysiker *Edward A. Milne* (1896–1950) formuliert.

*Universum.* Man darf nicht das Alter des Universums von etwa 14 Mrd. Jahren mit dem beobachtbaren Universum gleichsetzen. Denn während das Licht auf der Reise zu uns war, und das sind beträchtliche Zeiträume, hat sich das Universum in der Zwischenzeit weiter ausgedehnt. Man geht heute davon aus, dass das beobachtbare Universum eine Größe von 46,6 Mrd. Lichtjahren besitzt (Gott et al. 2005).

Multiplizieren wir die Anzahl der Galaxien mit der Anzahl der Sterne pro Galaxie ergibt dies etwa  $10^{22}$  Sterne. Auf die Frage „*Weißt du wie viel Sternlein stehen ...?*“ können wir also weiterhin beruhigt antworten: „*Sehr viele!*“

---

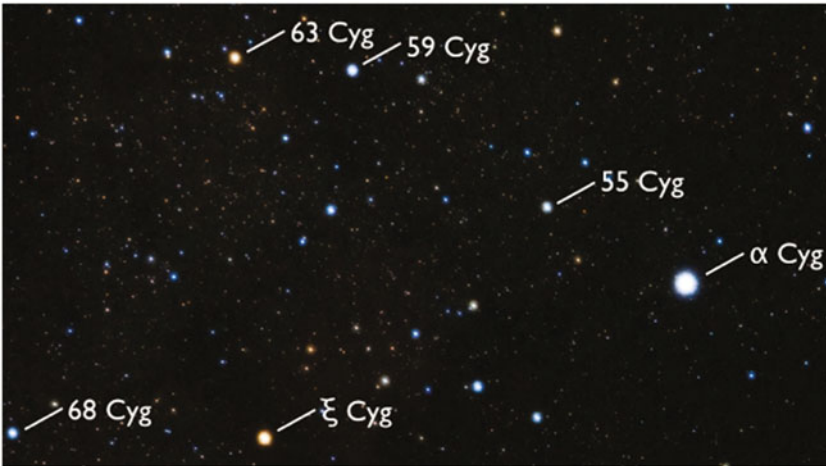
## 2.2 Zustandsgrößen von Sternen

In diesem Abschnitt wollen wir die Vorarbeiten zum Verständnis der Sterne leisten und die Frage beantworten, durch welche Größen sie sich kategorisieren lassen.

### 2.2.1 Helligkeit und Leuchtkraft

Blicken Sie zum Himmel, werden Sie feststellen, dass Sterne unterschiedlich stark leuchten. Einige sind heller, andere wiederum können wir nur gerade so sehen, nachdem sich unsere Augen nach einer gewissen Zeit an die Dunkelheit gewöhnt haben. Die Helligkeit der Sterne ist die erste Zustandsgröße, welche wir betrachten wollen.

In Abb. 2.1 sehen Sie einen Ausschnitt des Sternbilds *Schwan* (lat. *Cygnus*). Die Bezeichnungen einiger Sterne, welche auf *Johann Bayer (1572–1625)* und *John Flamsteed (1646–1719)* zurückgehen, haben wir hinzugefügt. Der deutsche Astronom Johann Bayer erstellte 1603, einige Jahre vor Erfindung des Teleskops, den Sternatlas *Uranometria*. Dem hellsten Stern eines Sternbilds gab er den ersten Buchstaben des griechischen Alphabets  $\alpha$ , dem zweithellsten Stern den Buchstaben  $\beta$  usw. In Abb. 2.1 ist der, nach der Bayer-Logik, hellste Stern des Sternbilds *Schwan*,  $\alpha$  *Cyg*, ebenso wie der nach Bayer vierzehnthellste Stern,  $\xi$  *Cyg*, zu sehen. Die Benennung durch Bayer spiegelt das subjektive Empfinden bei der Betrachtung der Sterne wider, welches wir oben motiviert haben. Die Sterne erscheinen uns auf der Erde unterschiedlich hell, subjektiv wird das Verfahren dadurch, dass die Entscheidung dem menschlichen Auge überlassen wird. Viele Sterne erscheinen uns gleich hell, da unsere Rezeptoren in ihrer Auflösung begrenzt sind. Schwächen dieses Systems stellten sich erst später heraus, zum



**Abb. 2.1** Ausschnitt des Sternbilds *Schwan*. (Aufnahme: Leo Bette)

Beispiel die Tatsache, dass Sterne ihre Helligkeit in vergleichbar kurzen Zeiträumen ändern können. Nicht alle Sterne bekamen eine Bayer-Bezeichnung. John Flamsteed, ein englischer Astronom, der 1675 der erste Hofastronom im englischen Königshaus war, katalogisierte die Sterne pro Sternbild nicht nach ihrer Helligkeit, sondern nach ihren Koordinaten. Die Himmelskoordinaten wurden aufsteigend von Westen nach Osten festgelegt. In Abb. 2.1 ist Westen rechts und Osten links. So wird  $\alpha$  Cyg auch als 50 Cyg,  $\xi$  Cyg auch als 62 Cyg bezeichnet. Auch das System von Flamsteed bekam seine Probleme im Laufe der Zeit. Denn wenn die Helligkeit der Sterne u. U. keine feste Bezugsgröße in der Zeit ist, so ist auch das astronomische Koordinatensystem keine solche im Raum. Ein astronomisches Koordinatensystem, das unsere Erde als Bezugspunkt hat, verändert seine Lage mit der Zeit, da die Erdachse durch den gravitationellen Einfluss der Sonne, des Mondes und weiterer Gestirne nicht absolut im Raum fixiert ist. Erdgebundene Messungen der Sternpositionen, aber auch durch Satelliten erzielte Himmelsdurchmusterungen haben den Sternen immer wieder neue Inventarnummern beschert.  $\alpha$  Cyg wurde von der Mission *Hipparcos* der ESA, welche 1989 ihren Dienst antrat, neu katalogisiert und bekam beispielsweise die Bezeichnung HIP 102098. Mit einer bis dato nicht gekannten Genauigkeit wurden die Positionen, Eigenbewegungen und Abstände von über 100 000 Sternen gemessen. Die Vermessung der Sterne wird auch als *Astrometrie* bezeichnet.

Die Helligkeit der Sterne, welche wir auf der Erde wahrnehmen, wird als *scheinbare Helligkeit* bezeichnet und ihre Einheit ist die *Magnitude* (man spricht auch von der Größenklasse). Dieses System ist keine Erfindung der Neuzeit, sondern wurde bereits im zweiten Jahrhundert nach Christus benutzt. Der griechische Astronom *Hipparch* (etwa 190–120 v. Chr.) soll bei der Anfertigung eines Sternkatalogs die scheinbare Helligkeit bereits benutzt haben. Die Mission *Hipparcos* wurde zu seinen Ehren benannt.

*Claudius Ptolemäus* (etwa 100–160 n. Chr.) verwendete in seinem *Almagest* die scheinbare Helligkeit in seinem dreizehn Bücher umfassenden Werk, welches die astronomische Standardreferenz für Jahrhunderte darstellte. In seinem siebten Buch katalogisierte er den Sternbestand der nördlichen, in seinem achten Buch den der südlichen Halbkugel. In der Originalfassung finden sich zu jedem Stern vier Einträge: Die Bezeichnung des Sterns, sein Längengrad innerhalb der Konstellation, sein Breitengrad in Bezug auf die Bahn der Sonne und schließlich die *Schätzung der Größe*, welche der scheinbaren Helligkeit entspricht. Insgesamt teilte Ptolemäus die sichtbaren Sterne in sechs Größenklassen ein. Die hellsten waren von der Größenklasse 1, und jene, welche eben noch mit bloßem Auge sichtbar waren, wurden der Größenklasse 6 zugeordnet. Im Laufe der Jahrhunderte erfuhr der *Almagest* immer wieder *Verbesserungen* durch seine Übersetzer und Autoren. In einer lateinischen Version aus dem Jahre 1515, welche von *Petrus Lichtenstein* (Lichtenstein 1515) herausgegeben wurde, werden die scheinbaren Helligkeiten noch ganzzahlig angegeben, später wurden sogar Dezimalstellen verwendet. Es sei nur erwähnt, dass die Übersetzung des Petrus Lichtenstein die letzte Aufbereitung des *Almagest* war, bevor das Werk *De Revolutionibus Orbium Coelestium* des *Nikolaus Kopernikus* (1473–1543) im Jahre 1543 erschien und einen Paradigmenwechsel in unserem Weltbild einläutete. Für die scheinbaren Helligkeiten der Sterne  $\alpha$  Cyg und  $\xi$  Cyg finden wir in der Ausgabe des *Almagest* von Lichtenstein (Lichtenstein 1515) die Werte  $2^m$  bzw.  $4^m$ , also einen Unterschied von zwei Größenklassen. Insgesamt katalogisierte Ptolemäus über 1 020 Sterne in 48 Sternbildern.

Die moderne Astrophysik misst die auf der Erde empfangene scheinbare Helligkeit nicht mit dem bloßen Auge, sondern setzt dafür Fotoplatten oder lichtelektrische Kathoden ein. Der subjektive Eindruck wird durch objektive Messung ersetzt. In beiden Fällen wird der Strahlungsstrom  $\Phi$  gemessen, welcher auf den Detektor fällt. Der Strahlungsstrom ist die Energie, welche pro Zeiteinheit auf eine definierte Fläche des Empfängers trifft. Neben der Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers spielt die Durchlässigkeit der Fernrohroptik, des Filters und der Erdatmosphäre eine wichtige Rolle. Misst man mit entsprechenden Apparaturen den Strahlungsstrom verschiedener Sterne, so stellt man fest, dass zwischen

den hellsten und den schwächsten Sternen ein Faktor von einigen Milliarden liegt. Um mit leicht überschaubaren Zahlen rechnen zu können, werden die Helligkeitsunterschiede zwischen zwei Sternen als Differenz ihrer logarithmischen Strahlungsströme  $\log_{10}(\Phi)$  angegeben. Um nun auch noch die Größenklassen eines Hipparch oder Ptolemäus annähernd beschreiben zu können, wurde von den Astronomen die Übereinkunft getroffen, einen Faktor  $-2,5$  einzufügen (Scheffler und Elsässer 1984, S. 57). Die Differenz der scheinbaren Helligkeiten  $m_1$  und  $m_2$  zweier Sterne berechnet sich als Funktion der gemessenen Strahlungsströme  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  zu

$$m_1 - m_2 = -2,5 (\log_{10}(\Phi_1) - \log_{10}(\Phi_2)) = -2,5 \log_{10} \left( \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \right). \quad (2.1)$$

Nehmen wir die im Almagest von 1515 (Lichtenstein 1515) angegebenen Werte zur scheinbaren Helligkeit von  $\alpha$  Cyg ( $m_1 = 2^m$ ) und  $\xi$  Cyg ( $m_2 = 4^m$ ), so ergibt eine einfache Rechnung mit Formel (2.1) als Verhältnis ihrer Strahlungsströme  $\Phi_1/\Phi_2 = 6,31$ . Der Stern  $\alpha$  Cyg hat also einen mehr als sechsfach höheren Strahlungsstrom als  $\xi$  Cyg. Moderne Verfahren ergaben folgende Werte für die beiden Sterne:

$$\alpha \text{ Cyg} : m_1 = 1,25^m, \quad \xi \text{ Cyg} : m_2 = 3,72^m. \quad (2.2)$$

$\alpha$  Cyg ist also mittlerweile ein Stern erster,  $\xi$  Cyg ein Stern dritter Größenklasse. Mit den modernen Werten ergibt sich  $\Phi_1/\Phi_2 = 9,73$ . Nach Formel (2.1) kann man leicht überprüfen: Unterscheiden sich die scheinbaren Helligkeiten zweier Sterne um eine Magnitude, so hat der hellere Stern einen um einen Faktor 2,512 höheren Strahlungsstrom. Nach dem System des Hipparch und des Ptolemäus lag zwischen den hellsten und den eben noch mit bloßem Auge sichtbaren Sternen eine Differenz von fünf Magnituden, was einem Faktor 100 bezüglich der Strahlungsströme entspricht.

Dies ist alles kein Zufall, denn die Wahrnehmung unserer Sinnesorgane vollzieht sich nach einem Grundgesetz, welches 1834 vom deutschen Physiologen *Ernst Heinrich Weber* (1795–1878) erstmals erwähnt und 1860 vom Physiker *Gustav Theodor Fechner* (1801–1887) formuliert wurde. Auch wenn sich die Intensität einer Wahrnehmungsquelle kontinuierlich ändert, gibt es Schwellenwerte, ab denen unsere Sinnesorgane einen Unterschied in der Intensität wahrnehmen. Dies ist das allgemeine *Weber-Fechner-Gesetz*, bei dem eine logarithmische Proportionalität zwischen der Intensität der Wahrnehmungsquelle und der tatsächlichen Wahrnehmung (Empfindung) besteht. Bezeichnet der Strahlungsstrom  $\Phi$  diese Intensität und die scheinbare Helligkeit  $m$  die Empfindung, folgt Formel (2.1) exakt



<http://www.springer.com/978-3-658-07495-1>

Das Leben der Sterne

Teil I: Von der Dunkelwolke zum Protostern

Heyssler, M.

2015, IX, 56 S. 8 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-07495-1