

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit RR-Lyrae-Sternen (RR Lyrs). Dabei werden die RR Lyrs in zweierlei Hinsicht betrachtet nämlich sowohl in ihrer Kinematik in der Milchstraße als auch in ihren physikalischen Eigenschaft als pulsierende veränderliche Sterne. RR Lyrs gehören zu den Horizontalaststernen. Das sind Sterne, die in ihrer Evolution bereits das Hauptreihenstadium und das Riesenaststadium verlassen haben und jetzt in ihrem Kern Helium zu Kohlenstoff fusionieren. Die Altersspanne von RR Lyrs reicht von Objekten von ungefähr 1 Milliarde Jahren bis zu solchen, die älter sind als 10 Milliarden Jahre. Damit sind diese Sterne sehr gut geeignet für Studien der Kinematik der Milchstraße. Sie repräsentieren die alte Population II und die jungen Sterne der Population I und sind sowohl im Halo als auch in der Scheibe der Galaxis zu finden.

RR Lyrs sind als Gruppe für diese Untersuchungen auch deswegen besonders geeignet, weil sie an Hand ihres charakteristischen Lichtwechsels leicht aufzufinden sind, und weil sie relativ lichtstark sind und so über größere Entfernungen gefunden werden können. Deswegen kann man davon ausgehen, dass die RR Lyrs eine Stichprobe der Sterne der Milchstraße bieten, die nicht durch Auswahlwirkungen verfälscht wird.

Als zweites werden die RR Lyrs in ihrer Eigenschaft als pulsierende veränderliche Sterne betrachtet. Durch die Beobachtung mit schmalbandigen Filtern wurde aus den Farbindeizes Temperatur,  $\log g$  Radien und Radialgeschwindigkeiten der Sterne während ihres Pulsationszyklus ermittelt. Es wurde auch die Änderung der Absorptionslinien in Spektren betrachtet, die auf dem Observatorium Hoher List gewonnen werden konnten.

## Kinematik und Bahnen der RR Lyrs

Kapitel 2 und Kapitel 3 befassen sich mit der Kinematik der RR Lyrs. Die genauen Positionen heller RR Lyrs wurden ermittelt und in einem Katalog mit 561 RR Lyrs zusammengestellt (Maintz 2005). Die übrigen Daten der RR Lyrs wurden der Literatur entnommen. Die ermittelten Daten der Positionen und Geschwindigkeiten von 217 RR Lyrs wurden zuerst in das euklidische Koordinatensystem ( $XYZ, UVW$ ) übertragen. Es wurden die Orbital- ( $\Theta$ ) und Zentrifugalgeschwindigkeit ( $\Phi$ ) ermittelt. Danach wurden die Bahnen der RR Lyrs in der Galaxis berechnet und zwar einmal mit Hilfe des Potentialmodells von Allen & Santillan (1991b) (AS) (Kap. 1) und zweitens auch mit dem Potentialmodell "2b" von Dehnen & Binney (1998) (DB) (Kap. 3).

Die Berechnung der Bahnen mit zwei unterschiedlichen Potentialmodellen der Galaxis stellt sicher, dass die Ergebnisse der Untersuchung nicht auf der Grundlage eines ausgesuchten Potentials beruhen sondern allgemein gültig sind. Aus diesen Bahnen wurde die perigalaktischen und apogalaktischen Entfernungen der RR Lyrs, ihre maximale Höhe

über der galaktischen Ebene und die Exzentrizität der Bahnen ermittelt.

In den Berechnungen nach dem Potential von Allen & Santillan (1991b) (Kap. 2) zeigte sich, dass über die Hälfte der Sterne Bahnen mit chaotischen Formen aufweisen. Diese Bahnen, die große Höhen über der galaktischen Scheibe erreichen und im allgemeinen große Exzentrizität haben, weisen diese Sterne als mögliche Halo Sterne aus. Es zeigte sich aber, dass eine kleine Exzentrizität nicht bedeutet, dass der Stern zur Scheibenpopulation gehört. Erst die Betrachtung aller Parameter ermöglicht eine Trennung der Sterne in Scheiben- und Halo-Population.

Es wurden die Zusammenhänge von Bahnparametern und der Metallizität der Sterne oder ihrer Periode untersucht. So haben alle RR Lyrs mit hohem Metallgehalt ( $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$ ) prograde Bahnen, während kein retrograder Stern eine Metallizität von  $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.9$  hatte. Die retrograd rotierenden RR Lyrs unterscheiden sich nicht von den übrigen Sternen in  $z_{\text{max}}$  oder ihrer Periode, aber die Werte dieser Gruppe für  $\overline{ecc} = 0.79$ ,  $\sigma_{ecc} = 0.20$ ,  $\overline{nze} = 0.79$  und  $\sigma_{nze} = 0.79$  sind größer als die der prograden Halo-Sterne von etwa der selben Metallizität.

Bei den Berechnungen der Bahnen mit dem Potential der Milchstraße "2b" nach Dehnen & Binney (1998) (Kap. 3) ergaben sich für einzelne Sterne etwas unterschiedliche Bahnen. Die Orbits nach DB (Abb. 3.2 unten) erscheinen kompakter, geschlossener und auch symmetrischer als die nach AS. Trotz der leicht unterschiedlichen Bahnen, die sich bei den Berechnungen mit den beiden Potentialen ergaben, weist die Verteilung der 217 RR Lyrae Sterne in den Werten für  $R_p$ ,  $R_a$  und  $z_{\text{max}}$  nur geringe Unterschiede auf (s. Tab. 3.1). Auch bei der die Exzentrizität haben nur wenige Sterne leicht unterschiedliche Werte. Etwas größer sind die Differenzen, die sich für die Höhe über der galaktischen Scheibe ergeben, die die Sterne erreichen.  $z_{\text{max}}$  ist nach dem Potential von AS - besonders bei Sternen, die Werte von  $z_{\text{max}} > 5$  kpc erreichen, - teilweise größer als nach DB.

Bei der Bahngeschwindigkeit  $\Theta$  zeigt sich die Wirkung der unterschiedlichen Voraussetzungen in den beiden Potentialen. Da im Potential von DB von einer um  $15 \text{ km s}^{-1}$  höheren Sonnengeschwindigkeit ausgegangen wird, differieren auch alle  $\Theta_{\text{RR Lyrs}}$  um  $\sim 15 \text{ km s}^{-1}$ , mit Abweichungen von maximal  $-0.2 \text{ km s}^{-1}$ .

## Populationszugehörigkeit und Skalenhöhe

Zur Bestimmung der Skalenhöhe wurde aus der Summe aller Orbits die Wahrscheinlichkeits-Verteilung der  $z$ -Entfernungen aller RR Lyrs des Sampels ermittelt. Diese Verteilung entspricht dem statistischen  $z$ -Dichte Gradient. Mit der Exponentialgleichung 2.2 wurde aus der Steigung der  $\log N$  gegen  $z$  Verteilung die Skalen-Höhe der Populationen ermittelt. Dabei ergaben sich für die Berechnungen mit dem Potential nach AS (Kap. 2) Skalenhöhen von  $1.28 \pm 0.1$  kpc für die Scheiben-Population der Milchstraße und  $4.54 \pm 0.3$  kpc für die Population des galaktischen Halos. Das Verhältnis der Dichten der Verteilung ist  $N(0)_{\text{halo}}/N(0)_{\text{disk}} = 0.16$ . Der Versuch, drei Komponenten an die  $z$ -Höhen Verteilung anzufitten, ergab keine vernünftigen Resultate. Mit diesen Daten ist daher keine Trennung der Scheiben-Population in die der Dicken und der Dünnen Scheibe möglich. Dieses Ergebnis für die Skalenhöhe wurde mit Tests mit mehreren Untergruppen der RR Lyrs überprüft und es ergaben sich immer konsistente Ergebnisse.

Bei der Analyse der Parameter  $\Theta$ ,  $ecc$ ,  $nze$ , und  $[\text{Fe}/\text{H}]$  für jeden der 217 Sterne wurde

deutlich, dass nur bei Einbeziehung aller Parameter ein Stern als Halo-Stern oder Mitglied der Scheiben-Population klassifiziert werden kann. Von den 217 Sternen des Samples sind 54 wirkliche Sterne der Scheiben-Population und 163 sind Sterne des galaktischen Halos. Das sind 75% der untersuchten Gruppe.

In dieser Gruppe gibt es auch 87 RR Lyrs mit retrograden Bahnen. Die Sterne mit retrograden Bahnen haben im allgemeinen eine sehr hohe Exzentrizität allerdings gibt es darunter auch 7 RR Lyrs mit  $ecc \leq 0.45$ . Diese Gruppe retrograd rotierender RR Lyrs hat einen geringen Metallgehalt von  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.85$ . Die 54 Sterne mit  $ecc \leq 0.45$  und prograden Bahnen, deren Bahngeschwindigkeit im Durchschnitt  $\Theta = 196 \text{ km s}^{-1}$  beträgt, sind wahrscheinliche Kandidaten für Sterne der Dünnen und Dicken Scheibe.

Es konnte auch eine Gruppe von 7 metallarmen RR Lyrs mit den Kriterien  $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$ ,  $ecc \leq 0.2$  and  $183 < \Theta < 225 \text{ km s}^{-1}$ , nachgewiesen werden. Dies bestätigt, dass es auch metallarme Sterne mit klassische Scheiben-Bahnen gibt.

Auch für die Berechnungen nach dem Potential von DB (Kap. 3) aus der Summe aller Orbits die Wahrscheinlichkeits-Verteilung der  $z$ -Entfernungen aller RR Lyrs des Samples ermittelt. Auch hier wurden mehrere Test mit verschiedene Untergruppen von RR Lyrs vorgenommen. Es wurden die nach DB die gleiche Bingröße und die die gleichen Grenzen der einzelnen Fits verwendet wie nach AS. Es ergab sich für das Potential nach DB für die Skalenhöhe der Scheiben-Population der selbe Endwert von  $1.28 \pm 0.1 \text{ kpc}$  wie nach AS. Für die Halo-Population ergeben sich bei DB etwas geringere Werte von  $4.41 \pm 0.3 \text{ kpc}$  gegen  $4.54 \pm 0.3 \text{ kpc}$  nach AS. Beide Ergebnisse liegen aber innerhalb ihrer Fehlergrenzen. Auch ist das Verhältnis von  $N(0)_{\text{halo}}/N(0)_{\text{disk}}$  mit 0.14 bei DB - entsprechend der geringeren Skalenhöhe für die Halo-Population - etwas geringer als das bei AS mit  $N(0)_{\text{halo}}/N(0)_{\text{disk}} = 0.16$ . Auch nach DB ließ sich für die untersuchte Gruppe von RR Lyrs keine Trennung der Populationen der Dicken und Dünnen Scheibe erreichen.

Ein Vergleich der Orbitberechnungen mit den beiden unterschiedlichen Potentialen zeigt nur eine geringe Abhängigkeit der Ergebnisse von dem gewählten Potential. Zwar weichen die Ergebnisse für einzelne Sterne in den beiden Potentialen voneinander ab. Die Unterschiede in den Ergebnisse betreffen aber nur wenige Sterne der Gruppe. Die Werte und Orbits der meisten RR Lyrs sind in den beiden Potentialen fast gleich. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Orbitberechnungen mit den unterschiedlichen Potentialen nach AS und DB zeigt die Verlässlichkeit der Ergebnisse. Außerdem zeigt es, dass die Gruppe der 217 untersuchten RR Lyrs ausgewogen ist. Es zeigen sich keine Auswahleffekte, die die Ergebnisse verfälschen. Diese müßten sonst in der Untersuchung mit den unterschiedlichen Potentialen erkennbar sein.

## Strömgrenphotometrie

Im Kapitel 4 wird eine photometrische Auswertung der Lichtkurven einiger RR Lyrs durchgeführt. Für die Photometrie der RR Lyrs wurden die Strömgren-Filter ausgewählt, die in der Busca-Kamera am 2.2m Cassegrain Teleskop am Observatorium Calar Alto zur Verfügung stehen. Die Beobachtungen wurden in 3 Zeiträumen im Jan. und Dez. 2005 sowie im Nov. 2006 mit der Busca Kamera in simultan Photometrie durchgeführt. Es wurden  $u$ ,  $v$ ,  $b$ ,  $y$ ,  $I$  und die beiden  $\text{H}\beta$ -Filter ( $\text{H}\beta_{\text{schmal}}$ ,  $\text{H}\beta_{\text{weit}}$ ) eingesetzt. Durch Benutzung der Strömgren-Filter können einige physikalische Parameter wie  $\log g$  und  $T_{\text{eff}}$ , sowie

deren Änderungen im Verlauf der Periode der beobachteten Sterne bestimmt werden.

Von 12 RR Lyr's konnten die Lichtkurven über die ganze Periode gewonnen werden. Nach der photometrischen Auswertung erfolgte die Kalibration der Helligkeiten mit Hilfe von Aufnahmen von Standardsternen mit den jeweiligen Filtern aus dem Katalog der *uvby $\beta$*  Standards von Perry et al. (1987). Es wurden die Airmassfunktionen der verschiedenen Nächten mit Hilfe der langen Beobachtungsreihen der konstanten Vergleichssterne der RR Lyr's gewonnen. Die Kalibration des Nullpunktes wurde anhand der Standardsterne bestimmt. Zur Bestimmung der interstellaren Absorption wurde von Literaturwerten ausgegangen.

Aus den Lichtkurven mit den einzelnen Filtern wurden die Farbindizes  $u - b, v - b, b - y, m1, c1$  und der Beta-Index  $\beta_{eng} - \beta_{weit}$  gebildet. Abbildung 4.2 zeigt die Lichtkurven und Kurven der Farbindizes aller RR Lyr's, von denen mindestens 70% der Periode beobachtet wurden. In einem Diagramm in dem die beiden Farbindizes  $b - y$  gegen  $c1$  aufgetragen werden, ergeben sich im Verlauf des Pulsations-Zyklus der RR Lyr's Hysteresen. Diese Hysterese zeigt, dass die Helligkeit des Sterns - während des Auf- und Abstiegs - gleich sein kann aber unterschiedliche Temperaturen und  $\log g$  vorliegen. Es ist ein Wechselspiel zwischen der Temperatur des RR Lyr's und seinem Radius, das diese Hysterese verursacht.

Aus den beiden Farbindizes  $b - y$  und  $c1$  wurde die Schwerebeschleunigung  $\log g$  und der Temperatur  $T_{eff}$  der RR Lyr's bestimmt. Dazu wurde Eichung der Arbeit von Clem et al. (2004) herangezogen, die anhand von Modell-Atmosphären und synthetischen Spektren der Sterne die Korrelationen zwischen den beobachtbaren Werten und den Parametern  $\log g$  und  $T_{eff}$  herstellt. Eine zweite Berechnung dieser Parameter wurde nach Gleichungen aus der Arbeit von van Albada & de Boer (1975) vorgenommen. Es ergaben sich bei allen Sternen im Helligkeits-Maximum Werte für  $T_{eff}$  zwischen 7000 und 9500 K mit einem Mittelwert von 8226 K (nach van Albada & de Boer 1975) bzw. zwischen 7250 und 8900 K mit einem Mittelwert von 8095 K (nach Clem et al. 2004). Im Minimum liegen die Werte zwischen 5300 und 7000 Grad (Mittelwert 6004 K) bzw. zwischen 5150 und 6750 Grad (Mittelwert 5820 K).

Es konnte gezeigt werden, dass der "Buckel" der sogenannte "bump", der im Helligkeitsminimum kurz vor dem Aufstieg zum Maximum in der Lichtkurve mehrerer RR Lyr's zu erkennen ist, durch eine Aufheizung der Hülle der Sterne hervorgerufen wird. Diese Aufheizung beträgt z.B. für RR Gem  $\sim 400$  Grad.

Aus den Werten von  $T_{eff}$  zusammen mit der Leuchtkraft der Sterne wurden die sich ändernden Radien der RR Lyr's während ihres Zyklus ermittelt. Außerdem konnte aus den Radiusänderungen pro Zeiteinheit die Radialgeschwindigkeitsänderungen der RR Lyr's berechnet werden und Radialgeschwindigkeitskurven des Pulsationszyklus erstellt werden. Diese Radialgeschwindigkeitskurven konnten mit einer zweiten Berechnung aus  $\log g$  und der Masse der Sterne bestätigt werden.

Bei der Auswertung der Aufnahmen der RR Lyr's auf dem Observatorium Calar Alto vom Jan. 2005 erwies sich ein Stern, der ursprünglich als Vergleichssterne für den RR Lyr-Sterne GM And vorgesehen war, ebenfalls als veränderlich. Dieser Stern ist als NSV 26190 im NSV-Katalog der vermuteten Variablen von Samus et al. (2004) geführt. Es war aber weder der veränderlichen Typ noch seine Periode bekannt. Dieser Stern wurde als W-Uma Stern mit einer Periode von 0.353401113 d bestimmt.

## Spektroskopie einiger RR Lyrae Sterne

Es wurden fünf RR Lyrs (TZ Aur, RS Boo, RR Gem, TW Lyn und XZ Cyg) spektroskopisch beobachtet, davon vier über ihre ganze Periode. Die Spektren der RR Lyrs wurden am Observatorium Hoher List aufgenommen. Außer den Sternspektren wurden auch Lampenspektren mit den Linien von Argon, Neon, Quecksilber und Xenon aufgenommen. Die Dispersion der Spektren wurde anhand dieser Lampenspektren ermittelt. Da die Dispersion nicht linear war, mußten für drei Bereiche (blauer, mittlerer und roter Wellenlängenbereich) gesonderte Dispersionsgleichungen benutzt werden. Die Dispersion der Spektren beträgt zwischen 2.331 (roter Bereich) und 2.253 Angström/Pixel (blauer Bereich).

Die Variation der Absorptionslinien mit der Periode der RR Lyrs wurde ausführlich behandelt. Während des Helligkeitsminimum der Sterne d.h. wenn die Temperatur der RR Lyrs am niedrigsten ist, zeigen sich die Metalllinien sehr deutlich, während sie in den Spektren im Maximumlicht des Sterns nur schwach angedeutet sind. In diesen Spektren im maximalen Licht der RR Lyrs dominieren die Absorptionslinien der Balmerreihe des Wasserstoffs. Dies zeigt sich z. B. auch in den Äquivalentbreiten der  $H\alpha$ -Linie, die im Minimum nur  $\sim 0.5$  der Äquivalentbreite der Linie im Licht-Maximum beträgt. Bildet man das Verhältnis der Äquivalentbreiten der  $H\beta$ -Linie zur NaD- bzw. CaK-Linie so wird die Dominanz der Wasserstoff Linien im Maximum der Helligkeit von RR Lyrs besonders deutlich. Mit dem beginnenden Anstieg der Helligkeit bei  $\Phi \sim 0.8$  nimmt die Äquivalentbreite der  $H\beta$ -Linie zu, die Stärke der Metalllinien aber ab. So ändert sich das Verhältnis  $H\beta$  zur NaD-Linie vom  $\sim$  fünffachen im Helligkeits-Minimum auf den zwanzigfache Wert im Maximum. In dem Diagramm der Farbe  $b - y$  gegen die Äquivalentbreite der  $H\beta$ -Linie ergibt sich eine Hysterese. Dies entspricht der Hysterese, die sich in dem Diagramm der Farbindizes  $b - y$  gegen  $c1$  ergab, was nicht verwundert, da sowohl der Farbindex  $c1$  als auch die Äquivalentbreite der Wasserstoffabsorptionslinien von der Temperatur und der Gravitation der Sterne abhängen.