

# Der Übergang vom Hauptreihen-Stern zum Roten Riesen

H. Hauptmann, F. Herrmann, K. Schmidt

Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

## Einleitung

Im Laufe seiner Entwicklungsgeschichte durchläuft ein Stern sehr unterschiedliche Stadien. Er beginnt als kosmische Gaswolke, die sich verdichtet und dabei erhitzt, bis in ihrem Inneren die Wasserstoff-Fusion einsetzt. In dieser längsten stabilen Phase des Sternlebens, in der sich auch unsere Sonne gerade befindet, wird er als Hauptreihenstern bezeichnet. Geht schließlich der Wasserstoff in seinem Zentrum zu Ende, geht er über in das Stadium der sogenannten „Roten Riesen“. Es handelt sich dabei um die nächste Fusionsphase, bei der im Sternzentrum Helium fusioniert. Je nach Gesamtmasse des Sterns schließen sich daran weitere Fusionsphasen an, bevor der Stern sein Leben als weißer Zwerg, Neutronenstern oder schwarzes Loch beendet.

Auf der Hauptreihe ist ein Stern stabil aufgrund eines Stabilisierungsmechanismus, der auf der negativen Wärmekapazität des Sterns beruht. Dieser Mechanismus kann an einem einfachen Modell veranschaulicht werden, bei dem der Stern als homogenes System aufgefasst wird.

Beim Übergang zum Roten Riesen steigt die Temperatur im Sterninnern von typischerweise 15 Millionen Kelvin auf 100 Millionen Kelvin, wobei sich gleichzeitig seine Hülle stark ausdehnt. Das einfache Hauptreihen-Modell kann dieses Verhalten nicht mehr erklären, es scheint zu Widersprüchen zu führen. Mit Hilfe einer kleinen Modifikation, läßt sich aber auch der Übergang von der Wasserstoff-Fusionsphase zum Rote-Riesen-Stadium qualitativ korrekt modellieren.

Beide Modelle können sehr einfach mit Systemdynamik- bzw. Modellbildungsprogrammen, wie STELLA™, POWERSIM™ oder DYNASYS™ simuliert werden.

## I. Der Stabilitätsmechanismus in Hauptreihensternen

Zum Verständnis des Lebenszyklus der Sterne ist eine ihrer Eigenschaften besonders wichtig. Es handelt sich um eine sehr einfache Eigenschaft, die allerdings unseren Alltagserfahrungen widerspricht: Sterne haben eine negative Wärmekapazität.

Das bedeutet, daß ein Stern bei Wärmezufuhr seine Temperatur verringert. Diese Abkühlung ist immer mit einer Expansion des Sterns verknüpft. Umgekehrt wird ein Stern bei Energieverlust heißer, und er schrumpft gleichzeitig.

Man kann dieses auf den ersten Blick seltsame Verhalten verstehen, wenn man sich klar macht, daß ein Stern zwei Möglichkeiten hat, Energie zu speichern.

Einerseits kann er Energie in seiner Materie speichern, als innere Energie. Die Temperatur ist dafür ein direkter Indikator. Je heißer ein Stern ist, desto größer ist seine innere Energie.

Daneben kann der Stern noch Energie in einem zweiten Teilsystem speichern: dem Gravitationsfeld. Für diesen Energiespeicher gilt: Je größer der Stern, desto mehr Energie ist im Gravitationsfeld gespeichert.

Die beiden Energiespeicher sind fest aneinander gekoppelt und können nur in einem ganz bestimmten Verhältnis Energie austauschen: Nimmt die innere Energie um eine Energieeinheit zu, muß gleichzeitig die Feldenergie um 2 Energieeinheiten abnehmen:  $dE_{Feld} = -2 \cdot dE_{innen}$ . Diese Kopplung der Energiespeicher ist in der Literatur oft unter dem Stichwort „Virial-Satz“ zu finden. Sie führt dazu, daß der Stern, um seine Energie netto um eine Einheit zu verringern, 2 Energieeinheiten aus dem Speicher Gravitationsfeld abgeben und gleichzeitig eine Energieeinheit als innere Energie speichern muß. Daher schrumpft er und erhitzt sich bei Energieabgabe.

Die negative Wärmekapazität des Sterns ist, wie man leicht einsehen kann, wesentlich für die Stabilität der Fusionsreaktion:

Dazu betrachtet man einen Stern in dem die Wasserstoff-Fusion noch nicht begonnen hat, da die Temperatur noch zu niedrig ist. Durch Abstrahlung verliert dieser Stern Energie und wird daher, gemäß seiner negativen Wärmekapazität, heißer und kleiner. Mit zunehmender Temperatur kommt dann im Zentrum langsam die Wasserstoff-Fusionsreaktion in Gang. Er wird noch solange weiter schrumpfen und sich erhitzen, bis die bei der Kernfusion freigesetzte Wärme gerade die außen abgestrahlte Energie ersetzt.

Es stellt sich ein Fließgleichgewicht zwischen der innen produzierten Wärme und der abgestrahlten Energie ein, die Temperaturzunahme kommt zum Stillstand, Bild 1.

Bei einer Störung läuft der Stern von selbst wieder in einen Fließgleichgewichtszustand zurück. Sollte z. B. die Reaktionsrate der Wasserstoff-Fusion einmal zu groß werden, so wird mehr Energie produziert als abgestrahlt. Durch den Energieüberschuß dehnt sich der Stern aus, und seine Temperatur sinkt. Bei kleinerer Temperatur wird die Fusionsumsatzrate verringert. Der Stern reguliert sich auf diese Weise selbst.

## II. Ein Modell für Hauptreihensterne

Man kann diesen Hauptreihenstern leicht modellieren, Bild 2. Das Modell besteht aus den beiden Energiebehältern für die innere Energie und die Feldenergie, die nach den oben genannten Regeln Energie austauschen. Der Stern verliert Energie durch Abstrahlung, und erhält Energie durch die Wasserstoff-Fusion.

Das Modell simuliert den Weg eines homogenen Modellsterns zur Hauptreihe und das Einstellen des Fließgleichgewichts, und zeigt den erwarteten zeitlichen Verlauf. Der Ra-

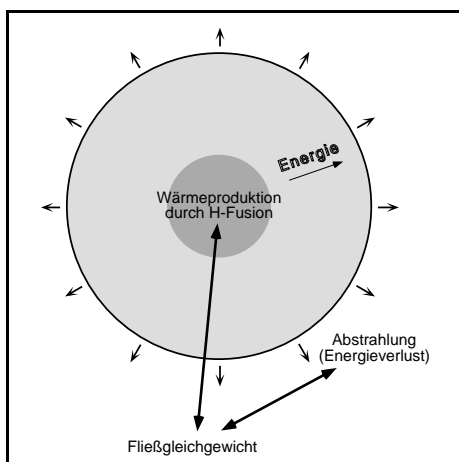


Bild 1: Stabiler Hauptreihenstern im Fließgleichgewicht

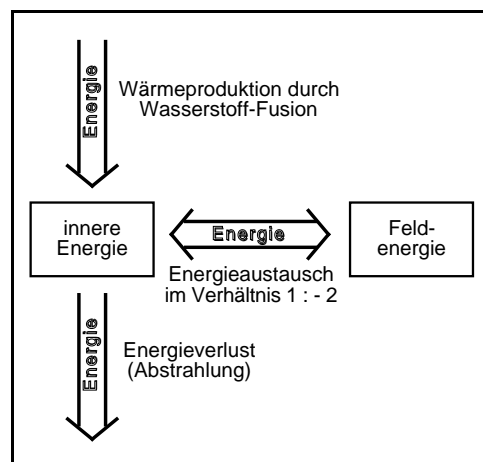


Bild 2: Modell eines Hauptreihensterns

dius des Sterns nimmt ab, seine Temperatur gleichzeitig zu. Zusammen mit der Temperatur steigt die Energieproduktion stark an, bis sie mit der Abstrahlung im Gleichgewicht ist. Ab dann sind die Werte stabil, Bild 3.

### III. Der Übergang vom Hauptreihenstern zum Roten Riesen

Wenn der Wasserstoff im Sternzentrum größtenteils verbraucht ist, funktioniert der Regelmechanismus nicht mehr. Eine Temperaturzunahme kann dann zu keiner ausreichenden Zunahme der Fusionsrate mehr führen. Der Stern verläßt die Hauptreihe und geht über zum Stadium des Roten Riesen.

Das einfache Hauptreihen-Modell kann man leicht so erweitern, daß in ihm der Wasserstoffvorrat nach einiger Zeit zur Neige geht. Auch kann man eine weitere Energiequelle für die Helium-Fusion vorsehen, die bei einer ausreichend hohen Temperatur „angezapft“ wird.

Das einfache Modell zeigt dann, daß der Stern am Ende der Wasserstoff-Fusion weiterhin Energie durch Abstrahlung verliert. Daher erhitzt er sich und kontrahiert, bis er durch die bei ausreichend hohen Temperaturen einsetzende Helium-Fusion wieder stabilisiert wird.

Im Gegensatz zu realen Sternen ist unser Modellstern beim Übergang zum Roten-Riesen-Stadium also kleiner geworden.

Die Ursache dieses scheinbaren Widerspruchs ist, daß reale Sterne keine homogenen Systeme sind, wie der Stern in unserem Modell. Statt dessen sind reale Sterne sehr inhomogene Objekte, bei denen alle physikalischen Größen wie Temperatur oder Druck vom Zentrum zum Rand um viele Größenordnungen variieren.

Global betrachtet verhält sich ein Roter Riese aber tatsächlich so, wie es das homogene Modellsystem vormacht: er schrumpft und heizt sich auf. Zwar expandieren die leichten und dünnen äußeren Bereiche und kühlen dabei ab; der Zentralbereich aber kontrahiert, bis die Heliumfusion gezündet wird. Und diese zentrale Kontraktion dominiert die Expansion der Außenbereiche.

Um das tatsächliche Verhalten der Roten Riesen im Modell qualitativ richtig wiederzugeben, muß das Modell modifiziert werden.

Es zeigt sich, daß dazu die einfachste Erweiterung des homogenen Modellsterns ausreicht: Der Stern wird in zwei homogene Teilsysteme zerlegt: einen Kern und eine Hülle. Diese Zerlegung ist nicht willkürlich gewählt, denn die beiden Teile haben für den Stern sehr verschiedene Bedeutungen. Im Kern finden die Fusionsprozesse statt, zunächst auf

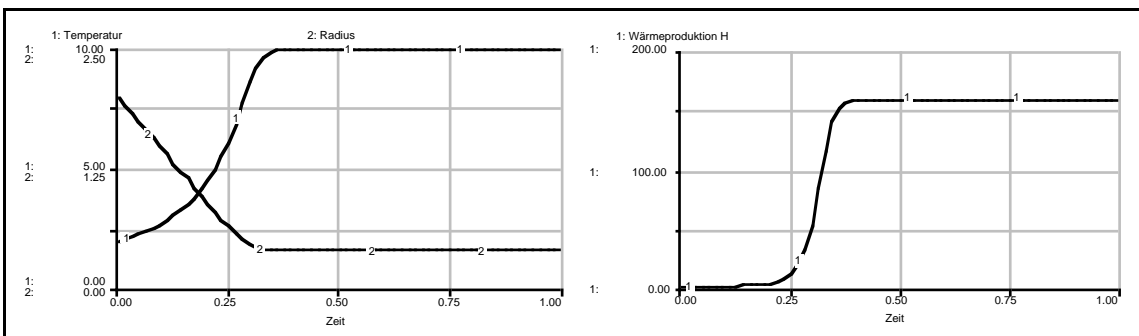


Bild 3: Links Temperatur (1) und Radius (2); rechts Wärmeproduktion durch Wasserstoff-Fusion des Modell-Sterns auf dem Weg zur Hauptreihe.

der Hauptreihe die Wasserstoff-Fusion, später dann die Helium-Fusion. In der Hülle findet keine Fusion statt. Sie macht sich im wesentlichen als thermischer Widerstand um den Kern bemerkbar und behindert den Abtransport der Energie an die Oberfläche des Sterns.

Die beiden Teilsysteme verhalten sich beim Übergang vom Wasserstoff fusionierenden Hauptreihenstern zum Helium fusionierenden Roten Riesen sehr unterschiedlich, und es ist zu beachten, daß beide Teilsysteme weiterhin eine negative Wärmekapazität besitzen. Bei beiden Teilsystemen wird diese Eigenschaft zu einer Rückkopplung führen, die für die Stabilität des Roten Riesen entscheidend ist.

Zunächst der Kern: Ist der Wasserstoffvorrat größtenteils aufgebraucht, kann der Kern seinen Energieverlust durch Abstrahlung nicht mehr decken. Er kontrahiert und erhitzt sich, bis die Heliumfusion einsetzt. Dabei steigt seine Energieabgabe insgesamt an. Das neue Fließgleichgewicht, das nach Einsetzen der Heliumfusion erreicht wird, liegt auf einem höheren Niveau als vorher in der Wasserstoffbrennphase.

Der Kern verhält sich genau wie vorher der Gesamtstern im einfachen Modell.

Nun zur Hülle: Der Wärmewiderstand der Hülle hatte sich gerade so eingestellt, daß während des Wasserstoffbrennens ein Fließgleichgewicht zwischen dem vom Kern zugeführten und dem von der Hülle durchgelassenen Energiestrom herrschte. Steigt nun die Energiezufuhr vom Kern an, kann nicht mehr die ganze Energie durchgelassen werden. Es sammelt sich Energie in der Hülle an, wodurch sie expandiert und abkühlt. Damit die Hülle eine Chance hat, sich wieder zu stabilisieren, muß sie dabei ihren Wärmewiderstand verringern. Würde der Wärmewiderstand bei der Expansion steigen, würde immer weniger der vom Kern zugeführten Energie durchgelassen werden. Die Hülle müßte immer weiter expandieren und wäre instabil.

Glücklicherweise nimmt der Wärmewiderstand der Hülle bei der Expansion aber tatsächlich ab, was man relativ leicht verstehen kann.

Der Energietransport in der Hülle erfolgt im wesentlichen durch Strahlung, also Photonen. Für den Wärmewiderstand der Hülle ist daher entscheidend, wie leicht sich die Photonen durch die Hülle bewegen können.

Würde sich die Hülle nur in einer Dimension ausdehnen, bliebe die „Durchsichtigkeit“ der Hülle insgesamt konstant. Die Verringerung der Materiedichte, würde durch die Verlängerung des zurückzulegenden Weges gerade ausgeglichen, Bild 4.

Durch die radialsymmetrische Ausdehnung der Hülle in drei Dimensionen, ist aber die Vergrößerung der mittleren freien Weglänge für die Photonen dominant gegenüber der Verlängerung des zurückzulegenden Weges. Die Hülle wird „durchsichtiger“, Bild 5.

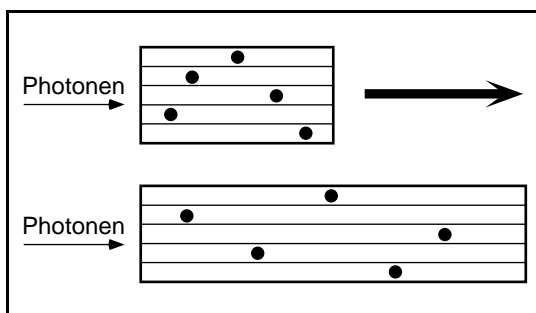


Bild 4: 1-dimensionale Ausdehnung

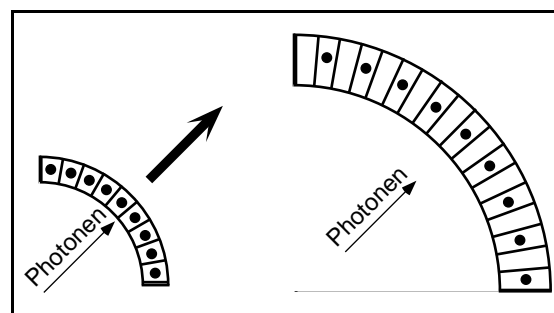


Bild 5: 3-dimensionale Ausdehnung

Daneben führt die mit der Expansion verbundene Abkühlung der Hülle zu einer weiteren Erhöhung der mittleren freien Weglänge der Photonen.

Die Hülle expandiert daher solange, bis sich wieder ein neues Fließgleichgewicht zwischen der vom Kern zugeführten und der durchgelassenen Energie eingestellt hat. Der Energieumsatz bei diesem Fließgleichgewicht in der Hülle ist genauso groß, wie bei dem neuen Fließgleichgewicht im Kern.

In beiden Teilen beobachtet man eine Rückkopplung aufgrund der negativen Wärmekapazität, die zur Einstellung eines neuen Gleichgewichts führt, Bild 6. Diese Mechanismen wirken in Kern und Hülle aber sehr unterschiedlich: Im Kern wirkt die Rückkopplung auf die Fusionsrate. Er heizt sich solange auf, bis das Heliumbrennen, also die Energiezufuhr, seine höhere Energieabgabe decken kann.

Die Hülle dagegen kann keinen Einfluß auf ihre Energiezufuhr nehmen, diese ist durch den Kern vorgegeben. Steigt die Energiezufuhr expandiert die Hülle und vergrößert damit ihre Energieleitfähigkeit, bis wieder ein Gleichgewicht zwischen der Energiezufuhr und der Energiedurchlässigkeit erreicht ist.

#### IV. Die Modellierung des Roten Riesen

Natürlich kann auch der Rote Riese sehr leicht modelliert werden. Trotz der sehr vereinfachenden Zerlegung in nur zwei homogene Teilsysteme werden dabei die Vorgänge beim Übergang von der Wasserstoffbrennphase zur Heliumbrennphase qualitativ korrekt wiedergegeben.

Die Reservoirs für die innere Energie und die Feldenergie, sowie der Austausch zwischen ihnen nach den bekannten Regeln ist jetzt zweimal vorhanden, einmal für den Kern und einmal für die Hülle, Bild 7.

Der Kern hat zwei Energiezuflüsse, die Wasserstoff und Heliumfusion. (Beide hängen von der Kerntemperatur ab, die Heliumfusion benötigt aber höhere Temperaturen.) Im Modell wird nach einiger Zeit der Wasserstoffvorrat zu Ende gehen, und dann die Heliumfusion einsetzen. Der Kern hat einen Energieausgang, die Abstrahlung zur Hülle. Sie

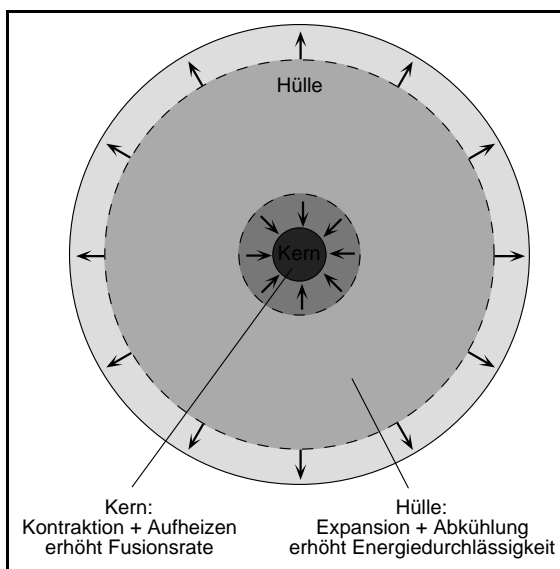


Bild 6: Energie-Fließgleichgewicht beim Roten Riesen

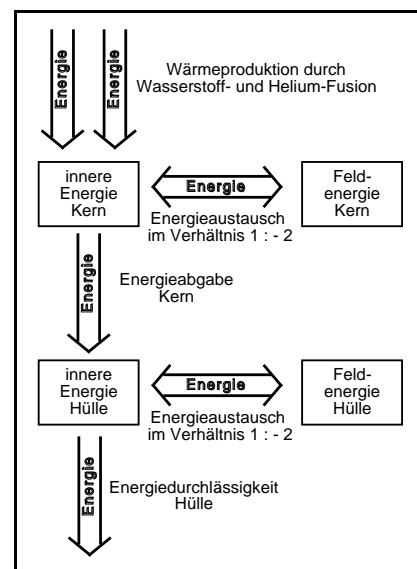


Bild 7: Modell des Roten Riesen

ist gleichzeitig der Energieeingang für die Hülle. Der Energieausgang der Hülle ist ihre Strahlungsdurchlässigkeit. (Die Durchlässigkeit ist abhängig von ihrem Radius und ihrer Temperatur.)

## **V. Fazit**

Man sieht, daß man die Frage warum der Kern eines Roten Riesen schrumpft und sich aufheizt, während die Hülle gleichzeitig expandiert und abkühlt, leicht anschaulich beantworten kann. Ein einfaches Modell aus zwei homogenen Teilsystemen zeigt dasselbe Verhalten und kann sehr einfach mit Modellbildungsprogrammen simuliert werden.

Beide Teilsysteme werden durch einen Rückkopplungsmechanismus stabilisiert, der auf der negativen Wärmekapazität basiert.

Während im Kern die Energieproduktion durch Fusion geregelt wird, wird in der Hülle die Wärmeleitfähigkeit eingestellt.

## **Anhang: Dateien zur Modellbildung**

Die beiden im Text beschriebenen Modelle wurden mit Hilfe der drei gebräuchlichsten Modellbildungsprogramme simuliert. Die zugehörigen Dateien finden Sie auf dieser Tagungsband-CD-Rom.

Die Dateien „waytoHR.dyn“ (für DYNASYS™), „waytoHR.sim“ (für POWERSIM™ ab Version 2) und „waytoHR.stm“ (für STELLA™ ab Version 5.1) gehören zu dem Modell aus Bild 2. Es wird simuliert, wie sich in einem Stern das Fließgleichgewicht der Wasserstoffbrennphase einstellt. Der Stern erhitzt sich, wobei die Wasserstoff-Fusionsrate zunimmt, bis die Wärmeproduktion mit der Abstrahlung im Gleichgewicht ist. Erhöht man die Simulationsdauer auf 1,1 Sekunden, kann man beobachten wie sich das einfache Modell verhält, wenn der Wasserstoffvorrat zu Ende geht.

Die Dateien „redgiant.dyn“ (für DYNASYS™), „redgiant .sim“ (für POWERSIM™ ab Version 2) und „redgiant.stm“ (für STELLA™ ab Version 5.1) gehören zum Modell aus Bild 7. Der Übergang eines Sternes von der Wasserstoff-Brennphase zur Helium-Brennphase wird simuliert.

Falls Sie eines der genannten Programme auf ihrem Rechner installiert haben, können Sie die Simulationen eventuell sofort durch Klick auf die passenden Dateinamen starten. Sollten Sie keines der Programme besitzen, ist die Shareware-Version von Dynasys auf dieser CD enthalten. Das vollständige Programm ist in der Archiv-Datei „dynas123.zip“. Zur Installation dekomprimieren Sie das Archiv und starten das Installationprogramm. Dynasys V1.23 ist lauffähig unter Windows™ ab Version 3.1.

Auf der CD ist ebenfalls eine direkt lauffähige Version von Dynasys. Verwendet Ihr Rechner das Betriebssystem Windows™ ab Version 3.1 können sie das Programm durch Klick auf „dynasys.exe“ direkt von der CD starten. Klicken sie auf „Dynasys mit Modell 1“ bzw. „Dynasys mit Modell2“ um Dynasys direkt mit den Modellen zu starten.