

# Materiekreislauf

## Endstadien

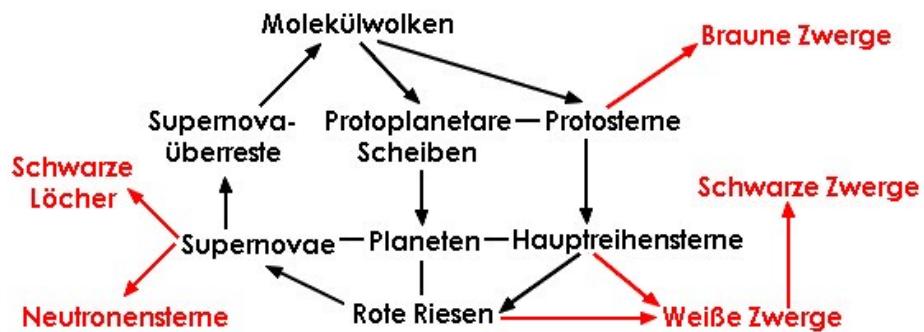
**Grundlagen aus dem ersten Semester:**  
**08-Sternarten und Sternentwicklung (Seite 13 - 17)**

Als Endstadien bezeichnet man alle Nachfolger von Sternen, in denen keine Kernfusion mehr stattfinden kann. Der Grund dafür ist, dass sie die Atome, die sie aufgrund ihrer Masse fusionieren könnten, bereits fusioniert haben. In der folgenden Tabelle ist die Maximalmasse der unterschiedlichen Endstadien aufgelistet und welches die letzte Kernfusion war, die durch diese Masse ermöglicht wurde.

Name	Maximalmasse	letzte Kernfusion	weitere Eigenschaft
Brauner Zwerg	$75M_J$	H zu Be	
Weißen Zwerg	$1,44M_{\odot}$	H zu He	Nachleuchten
Schwarzer Zwerg	$1,44M_{\odot}$	H zu He	Kein Nachleuchten
Neutronenstern	$3M_{\odot}$	He zu Fe	Licht kann entweichen
Schwarzes Loch	unbegrenzt	He zu Fe	Licht kann nicht entweichen

Der Unterschied zwischen weißen und schwarzen Zwergen sowie zwischen Neutronensternen und schwarzen Löchern wird nicht über die letzte Kernfusion sondern über das Licht definiert. (Siehe Spalte weitere Eigenschaft).

Die Bezeichnung „Endstadien“ kommt daher, weil die Kernfusion normalerweise zu neuen Entwicklungszuständen im Materiekreislauf führen. Die Endstadien stellen also gewissermaßen die Sackgassen im Materiekreislauf dar.



## 1 Kräfte

Dadurch, dass in den Endstadien keine Kernfusion stattfindet, geben sie, wenn überhaupt, nur wenig Licht und Wärme ab. Die Energie dafür ist ein Nachglühen von früheren Supernovaexplosionen. Langfristig hören die Endstadien jedoch auf zu leuchten.

Die Kernfusion ist gleichzeitig auch die stärkste Kraft, die nach außen wirkt. Dadurch, dass diese wegfällt, sind die Endstadien viel dichter als normale Sterne.

Bei Endstadien, die kleiner als die Chandrasekhar-Grenzmasse sind, ist die stärkste nach außen wirkende Kraft der Entartungsdruck. Dieser kommt durch die Abstoßung der Elektronen und der Protonen eines Atoms zustande. Bei der Herleitung der Chandrasekhar-Grenzmasse im Kapitel weiße Zwerge wird diese Kraft genauer erläutert.

Ist die Masse größer als die Chandrasekhar-Grenzmasse, so wie das bei Neutronensternen und schwarzen Löchern der Fall ist, ist die Gravitation sogar stärker als der Entartungsdruck und das Objekt wird um ein Vielfaches dichter. Die stärkste Kraft die in dem Fall nach außen wirkt, ist die Fliehkraft.

Neutronensterne und schwarze Löcher rotieren in der Regel sehr schnell, weil der Drehimpuls der roten Riesen erhalten bleibt und der Radius stark abnimmt. Das führt zu dem Effekt, dass die Atome, ähnlich wie die Planeten unseres Sonnensystems, durch die Trägheit nicht ganz ins Zentrum fallen. Je schneller die Winkelgeschwindigkeit ist, desto größer wird der Stern. Diese Größe ist dadurch begrenzt, dass die Geschwindigkeit nicht größer als die Lichtgeschwindigkeit werden kann. Für die Winkelgeschwindigkeit gilt

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (1.1)$$

Damit die Geschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreitet, muss folglich gelten

$$r\omega < c \quad (1.2)$$

Um die Formel in Abhängigkeit von der Periodendauer anzugeben, muss man für  $\omega$  einsetzen

$$\omega = \frac{2\pi}{P} \quad (1.3)$$

Damit erhält man

$$\frac{2r\pi}{P} < c \quad (1.4)$$

Wenn man die Formel nach dem Radius umformt, erhält man einen von der Periodendauer abhängigen minimalen Radius

$$r < \frac{cP}{2\pi} \quad (1.5)$$

Einsetzen der Konstanten ergibt

$$r < 47800P \quad (1.6)$$

wobei der Radius in km und die Periodendauer in Umdrehungen pro Sekunde eingesetzt werden muss.

Für einen Neutronenstern oder ein schwarzes Loch im hydrostatischen Gleichgewicht gilt

$$F_{Flieh} = F_{Grav} \quad (1.7)$$

Einsetzen der Formeln für Fliehkraft und Gravitationskraft ergibt

$$\frac{rP^2}{4\pi^2} = \frac{GM}{r^2} \quad (1.8)$$

Umformen der Gleichung nach dem Radius ergibt

$$r = \sqrt[3]{\frac{GMP^2}{4\pi^2}} \quad (1.9)$$

Einsetzen der Konstanten ergibt

$$r = 1500 \sqrt[3]{MP^2} \quad (1.10)$$

wobei der Radius in km, die Masse in Sonnenmassen und die Periodendauer in Umdrehungen pro Sekunde gemessen wird. In der Formel ist vorausgesetzt, dass der Mindestradius aus Formel 1.6. nicht unterschritten wird.

## 2 Jets

Im Skriptum über die Protoplanetare Scheibe wurde erläutert, dass nicht die gesamte Molekülwolke sofort zu einem Protostern zusammenfällt, sondern sich zunächst eine Scheibe bildet, die um den Stern rotiert und erst später vom Protostern akkretiert wird.

Beim Zusammenfall von Hauptreihensternen und roten Riesen ist dieser Vorgang analog. Am bekanntesten sind dabei die planetaren Nebel, die sich um weiße Zwerge bilden, weil sich diese aufgrund der geringen Gravitation der weißen Zwerge am längsten und am stärksten halten können, aber selbst um Neutronensterne und schwarze Löcher bilden sich derartige Scheiben.

## *Materiekreislauf*

## *Endstadien*

Bei der Akkretion dieser Scheibe kommt es zu einem Phänomen, dass Jet genannt wird: Ein Teil der Energie, die bei der Akkretion frei wird, wird dazu verwendet, Material senkrecht zur Scheibe hinaus ins Weltall zu schleudern. Dieses ist oft als Röntgenquelle sichtbar. Wie dieser Vorgang genau funktioniert, ist nicht erforscht, man vermutet, dass er mit Magnetfeldern zusammenhängt.

Jets kommen bei allen Objekten vor, die vor kurzem zusammengefallen sind, und daher noch von einer Scheibe akkretiert werden. Das können weiße Zwerge, Neutronensterne oder schwarze Löcher sein. Selbst Protosterne erzeugen Jets, wenn sie junge stellare Objekte akkretieren. Am stärksten werden die Jets jedoch bei schwarzen Löchern, weil sie die größte Masse und damit auch die stärkste Gravitation haben.

Auch in Mehrfachsternsystemen kann es durch die Akkretion der Masse von einem Stern auf den anderen (sowohl durch Sternwinde, als auch durch überschreiten der Rochegrenze), zu Teilchenjets und dadurch auch zu verstärkter Röntgenstrahlung kommen. Man spricht in dem Fall auch von „Röntgendifoppelsternen“

Bei Röntgendifoppelsternen unterscheidet man zwischen HMXBs (High-Mass X-Ray Binaries), bei denen mehr Masse akkretiert wird und LMXBs (Low-Mass X-Ray Binaries), bei denen weniger Masse akkretiert wird. Die Stärke der Strahlung variiert in vielen Fällen, man spricht dann auch von temporären Röntgenquellen.