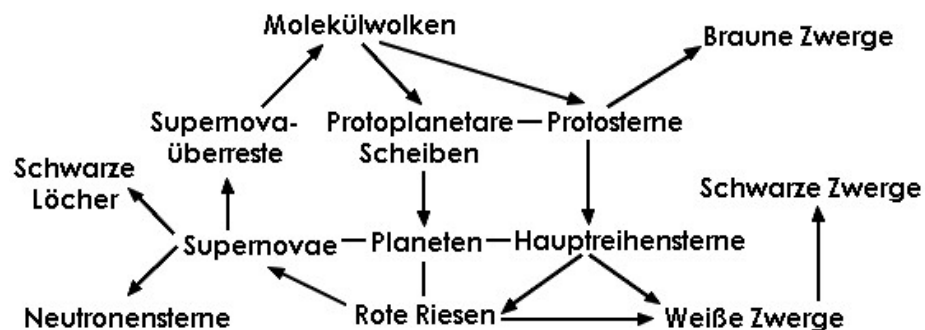


# Materiekreislauf

## Überblick

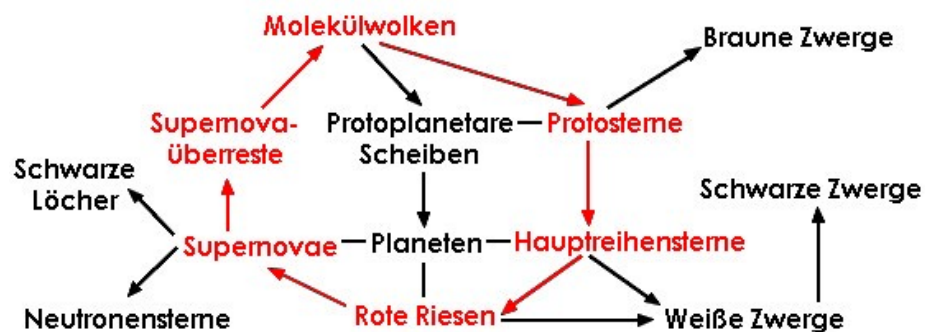
Die Materie in unserem Universum liegt in den unterschiedlichsten Formen vor: Mal ist sie zu Sternen oder Planeten verdichtet, mal verteilt sie sich im interstellaren Medium. Im Laufe ihrer Entwicklung kann die Materie ihren Zustand ändern.



In dieser Grafik ist die Entwicklung der baryonischen (also sichtbaren) Materie dargestellt. Die Dunkle Materie und die Dunkle Energie werden nicht berücksichtigt, weil man über sie zu wenig weiß.

Die Pfeile in der Grafik symbolisieren eine mögliche Weiterentwicklung der Materie vom Anfang des Pfeils zum Ende. Die Striche ohne Pfeilende symbolisieren eine starke gravitative Anziehung.

Beim genaueren Betrachten der Graphik stellt man fest, dass sich große Teile der Materie in einem Kreislauf, dem so genannten „Materiekreislauf“ befindet.



In dieser Graphik ist der Materiekreislauf rot eingezeichnet. Alle äußeren Äste sind sogenannte „Endstadien“, das heißt, wenn die Materie sich in einem solchen Ast

befindet, bleibt sie bis zum Ende ihrer Entwicklung dort. Die inneren Objekte sind durch gravitative Bindung sehr nah an Objekten des Materiekreislaufs und werden daher meist im Verlauf des Materiekreislaufes wieder eingesaugt.

## 1 Genereller Durchlauf

Ab einer gewissen Masse zieht sich eine Molekülwolke aufgrund ihrer Gravitation zu einem Protostern zusammen.

Die trägeren Teile der Molekülwolke sammeln sich in der protostellaren Scheibe an, die um den Protostern rotiert. Diese Scheibe verdichtet sich aufgrund der Gravitation großteils weiter zu Planeten, Zwergplaneten, Monden und Asteroiden, nur die wenigsten Teilchen bleiben als interplanetares Medium erhalten. Diese Objekte bleiben meist auch im Verlauf der weiteren Entwicklung gravitativ an den Stern gebunden, bis sie von diesem aufgrund der zunehmenden Gravitation eingesaugt werden. Einzelne Objekte werden auch durch Zusammenstöße oder gravitative Wechselwirkung mit anderen Objekten aus dem System geschleudert und später von einem anderen System eingefangen.

Was mit dem Protostern passiert, hängt von seiner Masse ab.

Ist der Stern größer als 75 Jupitermassen ist der Druck so stark, dass Wasserstoff zu Helium fusioniert wird. Die dabei frei werdende Energie hält den weiteren gravitativen Kollaps auf und sorgt für Licht und Wärme. Ein Hauptreihenstern wie unsere Sonne entsteht.

Ist der Stern kleiner als 75 Jupitermassen entsteht nicht ausreichend Druck für eine Kernfusion von Wasserstoff zu Helium. Es wird höchstens Wasserstoff zu Deuterium fusioniert. Das ist jedoch kein stabiles Isotop sodass es sofort wieder zerfällt und keine Energie frei wird. Man bezeichnet dieses Objekt als Braunen Zwerg.

Irgendwann (je nach Masse des Sterns unterschiedlich schnell) ist der Wasserstoff des Hauptreihensterns aufgebraucht und kann nicht weiter fusioniert werden. Ist der Stern zu diesem Zeitpunkt kleiner als 1,44 Sonnenmassen geht der gravitative Kollaps weiter. Zunächst leuchtet das Objekt noch aufgrund der Restenergie von der Kernfusion nach und man bezeichnet es als Weißen Zwerg. Wenn auch diese Leuchtkraft erloschen ist, bezeichnet man ihn als Schwarzen Zwerg.

Wenn der Stern massereicher als 1,44 Sonnenmassen ist (das wird auch auf unsere Sonne zutreffen, weil die Masse eines Hauptreihensterns im Laufe seiner Entwicklung zunimmt), ist der Druck hoch genug, um selbst das Helium weiter zu fusionieren. Es entstehen alle Elemente die im Periodensystem zwischen Helium und Eisen liegen. Da dieser Vorgang noch mehr Energie auf einmal erzeugt, wird der Stern größer, heißer und leuchtkräftiger. Man spricht jetzt von einem roten Riesen.

Eisen ist das Element mit der meisten Energie. Spätestens wenn alle Elemente im Stern zu Eisen fusioniert sind, lässt sich keine Energie mehr durch Kernfusion gewinnen und der gravitative Kollaps nicht mehr aufhalten. Es kommt zu einer Supernova. Dabei werden auch Elemente erzeugt, die sich im Periodensystem hinter Eisen be-

finden. Das bedeutet einen weiteren Energieverlust wodurch die Supernova nur noch schneller voranschreitet.

Durch die Energie der Supernova werden große Teile des Sterns ins umliegende interstellare Medium geschleudert. Man bezeichnet diese Teile als Supernovaüberreste. Sie vermischen sich mit dem interstellaren Medium und sind so wieder an der Bildung neuer Molekülwolken beteiligt.

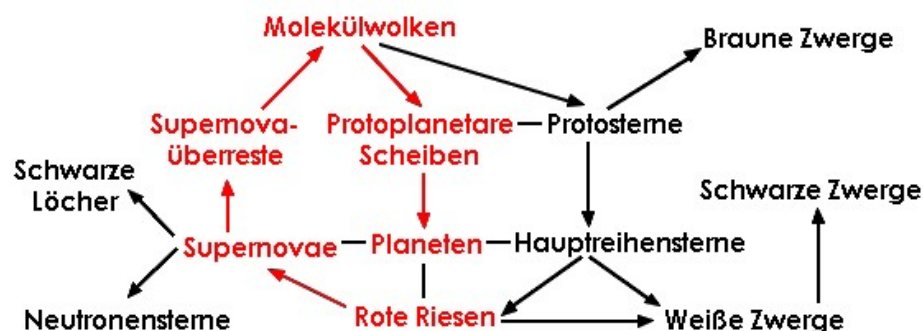
Bei Objekten die kleiner als 8 Sonnenmassen sind, verdichtet sich der Rest so stark, dass nicht einmal die starke Kernkraft dem Druck der Gravitation standhalten kann und somit selbst die Elektronen auf den Atomkern gedrückt werden. Es entsteht ein weiterer Aggregatzustand, das Quark-Gluonen-Plasma. Das gesamte Objekt bezeichnet man als Neutronenstern.

Ist das Objekt größer als 8 Sonnenmassen ist die Gravitation so stark, dass nicht einmal Licht entweichen kann und wir daher auch nicht wissen, was im Inneren des Objekts passiert. In diesem Fall spricht man von einem schwarzen Loch.

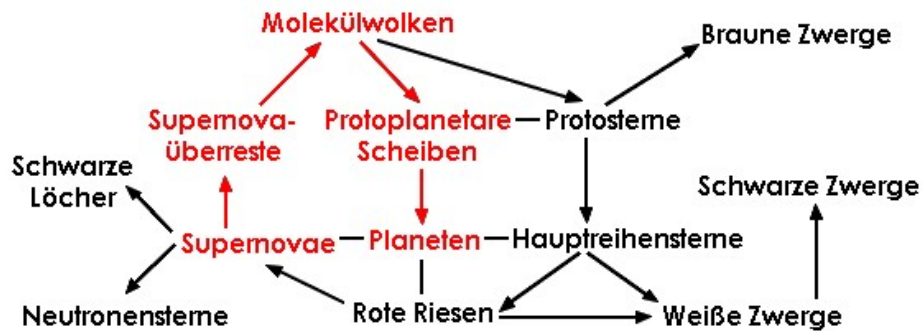
## 2 Erster Durchlauf

Am Anfang bestand das Universum nur aus Wasserstoff, der nahezu homogen verteilt war. In der kosmischen Hintergrundstrahlung betragen die maximalen Temperaturunterschiede weniger als 1 Kelvin, was darauf hindeutet, dass auch die Dichteunterschiede sehr gering sind. Durch die Gravitation verdichteten sich die Stellen mit einer höheren Dichte weiter und die Stellen mit einer geringeren Dichte wurden dünner. So vergrößerten sich die Unregelmässigkeiten immer stärker, so dass sich immer deutlicher erste Molekülwolken aus Wasserstoffgas bildeten. 100 Millionen Jahre nach dem Urknall verdichteten sich die ersten Molekülwolken zu Sternen. Da es nur Wasserstoff gab, war die Planetenbildung damals wenn überhaupt nur sehr eingeschränkt möglich.

Mit der Entstehung des ersten Hauptreihensterns entstand auch das erste Helium. Zunächst befand sich dieses nur in diesem Stern. Das selbe galt für die ersten schwereren Elemente, die im ersten roten Riesen entstehen. Erst mit der ersten Supernova wurden die Elemente im Universum verteilt. Von da an befanden sich auch Elemente außer Wasserstoff in den Molekülwolken, sodass sich auch Planeten wie wir sie kennen bilden können.



Die Elemente, die sich im Periodensystem zwischen Helium und Eisen befinden, entstehen erst in roten Riesen. In dieser Grafik ist der Weg markiert, über den diese Elemente trotzdem in Planetensysteme wie unseres gelangt sind.



Die Elemente, die sich im Periodensystem hinter Eisen befinden, entstehen erst in Supernovae. In dieser Grafik ist der Weg eingezeichnet, über den diese Elemente in Planetensysteme wie unseres gelangt sind.

### 3 Grundlegende Mechanismen

Die zwei grundlegenden Mechanismen im Materiekreislauf sind die Gravitation, die dazu führt dass sich Materie verdichtet und die Kernfusion, die die Verdichtung aufhält.

#### Gravitation

Die Gravitation ist die wichtigste Kraft auf astronomischen Skalen, mit ihr kann man fast alle Materiebewegungen im All erklären. Sie führt dazu, dass aus nur geringen Unregelmäßigkeiten in der Ursuppe Gebilde entstehen, die so dicht sind, dass überhaupt erst Kernfusion entsteht.

Man darf aber nicht den Fehler machen, zu glauben, dass Gravitation immer nur zur Verdichtung führt. Das bekannteste Gegenbeispiel sind die Planeten, die nur um die Sonne kreisen, sich ihr aber nie signifikant annähern. Man kann sogar die gravitative Energie von Planeten nutzen, um eine Raumsonde mittels Swing-by-Manöver von der Sonne weg zu befördern.

Eine weniger bekannte aber umso wichtigere Ausnahme findet bei allen durch die Gravitation hervorgerufenen Implosionen statt. Dabei implodiert immer zuerst der Kern und die dabei erzeugte Energie, wird dazu verwendet, die Hülle wegzustoßen. Bei der Kontraktion zu einem weißen Zwerg entsteht ein planetarer Nebel, bei einer Supernova ein Supernovaüberrest. Ohne diesen Mechanismus könnten sich nie die schweren Elemente im Universum verteilen.

## Kernfusion

Die Kernfusion zu jeweils noch schwereren Elementen ist die treibende Kraft im Materiekreislauf und sorgt dafür, dass die Sterne Licht und Wärme abgeben und nicht in sich zusammenfallen.

Man unterscheidet zwischen zwei Kernfusionsprozessen. Der s-Prozess (s wie slow) ist langsamer und findet in masseärmeren Sternen statt. Der r-Prozess (r wie rapid) ist schneller und findet in massereichen Sternen statt.

Es gibt in jedem Stern sogenannte „Brennzonen“, in denen der Druck besonders hoch ist, sodass zunächst dort die Kernfusion stattfindet und die Elemente in dieser Zone ändert.

Durch Mischprozesse verteilen sich sowohl die neuen Elemente als auch die Temperatur und die Wärme im ganzen Stern und gelangen bis an die Oberfläche. Gleichzeitig gelangen dadurch auch alte Elemente in die Brennzonen, so dass die Kernfusion fortgesetzt werden kann.

An der Oberfläche können Licht und Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben werden. Die neuen Elemente mischen sich in den Sternwind und verteilen sich so im umliegenden interstellaren Medium.

## 4 Materiekreislauf bei sonnenähnlichen Sternen

In der folgenden Tabelle sind die Daten der einzelnen Objekte für einen Stern aufgetragen, der im Hauptreihenstadium eine Sonnenmasse hat. Die Verhältnisse zwischen den einzelnen Größen sind bei anderen Sternen ähnlich. Bei massereicheren Sternen werden alle Phasen schneller durchlaufen, bei masseärmeren langsamer.

Lage im HRD	Zeit	Kernfusion	Radius	$T_{\text{eff}}$	$T_c$
Hauptreihe	$10^{10}$ Jahre	Zentrales H-Brennen	$1R_{\odot}$	$5,8 \times 10^4 \text{K}$	$1,5 \times 10^7 \text{K}$
Roter Riesenast	$10^8$ Jahre	H-Schalenbrennen	$100R_{\odot}$	$4 \times 10^4 \text{K}$	$5 \times 10^7 \text{K}$
Horizontalast	$5 \times 10^6$ Jahre	Zentrales He-Brennen	$10R_{\odot}$	$5 \times 10^4 \text{K}$	$2 \times 10^8 \text{K}$
Asymptotischer Riesenast	$10^4$ Jahre	He-Schalenbrennen	$500R_{\odot}$	$3,5 \times 10^4 \text{K}$	$2,5 \times 10^8 \text{K}$

Nach dem Durchlaufen der Fusionsphasen bildet sich ein Weißer Zwerg mit einem planetaren Nebel. Der planetare Nebel bleibt nur die ersten 2000 Jahre bestehen, der weiße Zwerg kühlt immer weiter aus, bis er zu einem schwarzen Zwerg wird.

	Radius	$T_{\text{eff}}$	$T_c$
<b>Weißer Zwerg</b>	7.000km	$5 \times 10^5 \text{K}$	$10^8 \text{K}$
<b>Planetarer Nebel</b>	5AU	$5 \times 10^4 \text{K}$	$3 \times 10^8 \text{K}$