

# Schwarze Löcher und das „Keine-Haare-Theorem“ (Teil 1 von 4)

## Wenn Sterne sterben

Nicht nur Lebewesen, auch Sterne durchlaufen einen Lebenszyklus von der „Geburt“ bis zum „Tod“ über relativ stabile Zwischenphasen. Die Art und Weise dieses Verlaufes und seine Dynamik sind im Wesentlichen durch das „Geburtsgewicht“ vorbestimmt. Je schwerer ein Stern ist, desto intensiver laufen die energetischen Vorgänge in seinem Inneren ab und umso kürzer ist sein Lebenszyklus. Fusionsvorgänge und das Wechselspiel zwischen der nach innen gerichteten Schwerkraft und dem nach außen wirkenden Strahlungsdruck bestimmen sein „Leben“. Der vorliegende Beitrag befasst sich vor allem mit der Endphase der Sternentwicklung.

In der Hauptphase seines Daseins erzeugt ein Stern Energie durch Fusion von Wasserstoff zu Helium. Liegt seine Masse unter 0,3 Sonnenmassen, glüht er nach Abschluss des Wasserstoffbrennens aus und kontrahiert wegen Wegfall des Strahlungsdrucks unter seiner eigenen Gravitation zu einem Weißen Zwergen mit einem Durchmesser von einigen tausend Kilometern und einer Dichte von ca.  $1000 \text{ kg/cm}^3$  (<https://de.wikipedia.org/wiki/Stern#Sp%C3%A4tstadien>). Wenn er im weiteren Abkühlverlauf irgendwann keine nennenswerte Strahlung mehr abgibt, endet er schließlich als (hypothetischer) Schwarzer Zwerg. Eine Abkühlung auf etwa 5 K dauert nach Schätzungen ([https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer\\_Zwerg](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_Zwerg)) etwa eine Billiarde Jahre, d.h. das bisherige Alter des Universums (13,7 Milliarden Jahre) reicht dafür bei weitem noch nicht aus.

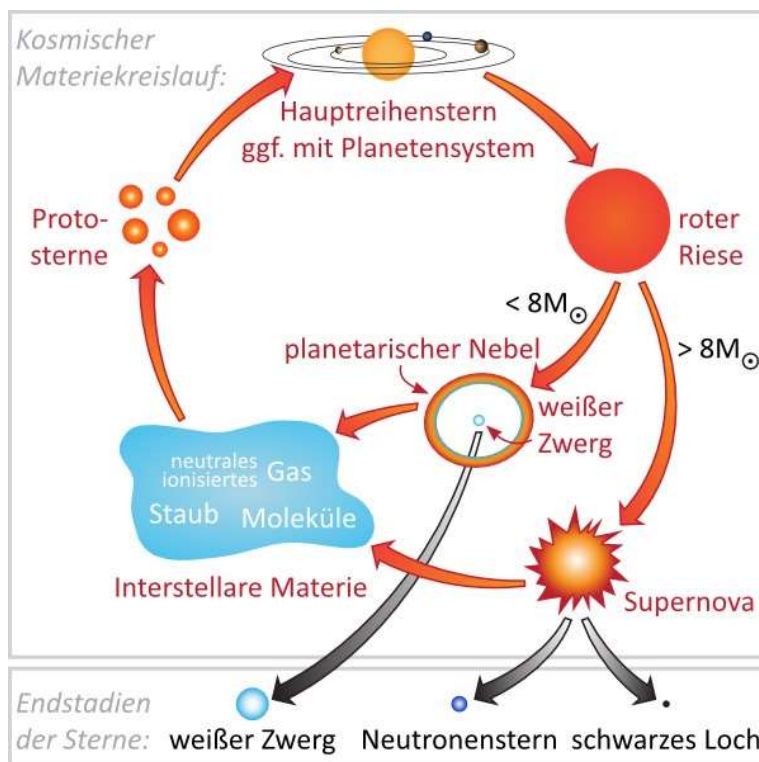
Schwerere Sterne bis etwa zum 8-fachen unserer Sonne durchlaufen über mehrere Milliarden Jahre eine stabile Phase des Wasserstoffbrennens. Beim weiteren Fortschreiten dieses Prozesses steigen Temperatur und Druck an und die Fusion schwererer Elemente kommt in Gang. In Abhängigkeit von der Sternenmasse kann dieser Prozess bis maximal zum Eisen ablaufen, da die Fusion noch schwererer Elemente keine Energie erzeugt, sondern Energie verbraucht. Temperatur und Druck erreichen schließlich so hohe Werte, dass sich der Stern zu einem Roten Riesen mit etwa 100-fachem Sonnendurchmesser aufbläht, wobei die äußeren Hüllen meistens, z.B. in Form Planetarischer Nebel, abgestoßen werden. Nach Erlöschen der Fusionsvorgänge geht auch ein solcher Stern in einen Weißen Zwerg über. Auch unsere Sonne wird in ca. 5 Milliarden Jahren dieses Schicksal ereilen. Voraussetzung für die Bildung eines weißen Zwerges ist, dass die nach Abstoßen der äußeren Hülle verbleibende Masse unterhalb der sogenannten Chandrasekhar-Grenze liegt. Diese beträgt für Weiße Zwerge, die im Wesentlichen aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehen, ca. 1,5 Sonnenmassen und bei Vorhandensein eines Eisenkerns ca. 1,3 Sonnenmassen (<https://de.wikipedia.org/wiki/Chandrasekhar-Grenze>). Wird dieser Grenzwert überschritten, reicht der Strahlungsdruck (in diesem Fall richtiger: Entartungsdruck des Elektronengases, s. [https://de.wikipedia.org/wiki/Entartete\\_Materie](https://de.wikipedia.org/wiki/Entartete_Materie)) nicht aus, den weiteren Kollaps des Sterns aufzuhalten.

Bei Sternen mit mehr als der 8-fachen Sonnenmasse führt die Fusion zur Ausbildung eines vollständigen Eisen- (bzw. Eisen-Nickel-) Kerns, der die Chandrasekhar-Grenze überschreitet (<https://ip.uni-goettingen.de/get/text/7180>). Durch den fortschreitenden Kollaps werden die Elektronen in den Atomkern gepresst, wobei sich aus Protonen und Elektronen Neutronen bilden, die zusammen mit den übrigen Neutronen ein Neutronengas mit einer Dichte ähnlich der von Atomkernen bildet. Dieser Vorgang ist mit einer gewaltigen als Supernova bezeichneten Explosion verbunden. Die Leuchtkraft eines solchen Ereignisses beträgt das millionen- bis milliardenfache des ursprünglichen Sterns, wobei auch Elemente schwerer als Eisen entstehen und der äußere Teil des Sterns abgesprengt wird. Als Überrest der Supernova bleibt bei einer Masse von ca. 1,44 bis 2,5 Sonnenmassen ein Neutronenstern mit einem

Radius von ca. 10 km und einer mittleren Dichte von etwa  $4 \text{ bis } 6 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$  zurück. Ein Teelöffel dieses Materials wiegt Milliarden von Tonnen. Typische Neutronensterne rotieren sehr rasch und haben ein starkes Magnetfeld. Beispiele sind Pulsare, bei denen die Symmetrieachse des Magnetfeldes von der Rotationsachse abweicht. Sie senden Radio- und Röntgenstrahlung aus, die das 100.000-fache der Strahlungsleistung unserer Sonne betragen kann. Bei geeigneter Ausrichtung kann das periodische Signal auf der Erde wie ein Leuchtturmsignal wahrgenommen werden.

Überschreitet der Supernova-Überrest die 2,5-fache Sonnenmasse, kann selbst der enorme Druck des Neutronengases (s.o.) dem Gravitationspotential nicht widerstehen und das Objekt kollabiert weiter zu einem Schwarzen Loch (s. Teil 2).

**Bild 1** gibt in stark vereinfachter Form einen Überblick über den kosmischen Materiekreislauf. Die Sternentstehung über die Bildung von Protosternen (Sternvorläufer vor Einsetzen des Wasserstoffbrennens) ist hier mit einbezogen. Staub und Gas der interstellaren Materie, die z.T. vom Urknall übrig sind, z.T. durch Supernova-Explosionen aufgefüllt werden, bilden das Ausgangsmaterial. Die Bezeichnung „Hauptreihenstern“ bezieht sich auf das HertzsprungRussel-Diagramm, eine Darstellung der Sternentwicklungen als Funktion der Leuchtkraft über der Spektralklasse. Die Spektralklasse steht in direktem Zusammenhang zur Oberflächentemperatur des Sterns (<https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell-Diagramm>). Auch unsere Sonne ist z.Z. ein Stern der Hauptreihe.



**Bild 1** Kosmischer Materiekreislauf

(<https://lp.unigoettingen.de/get/text/7283>)

