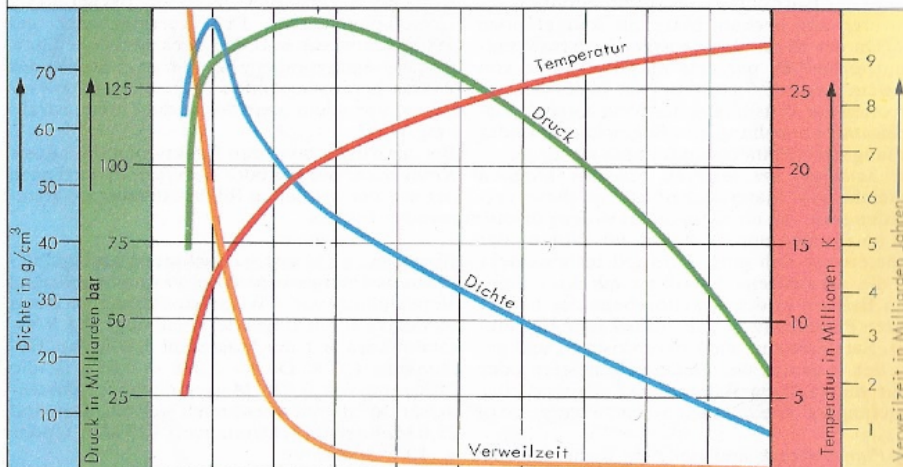
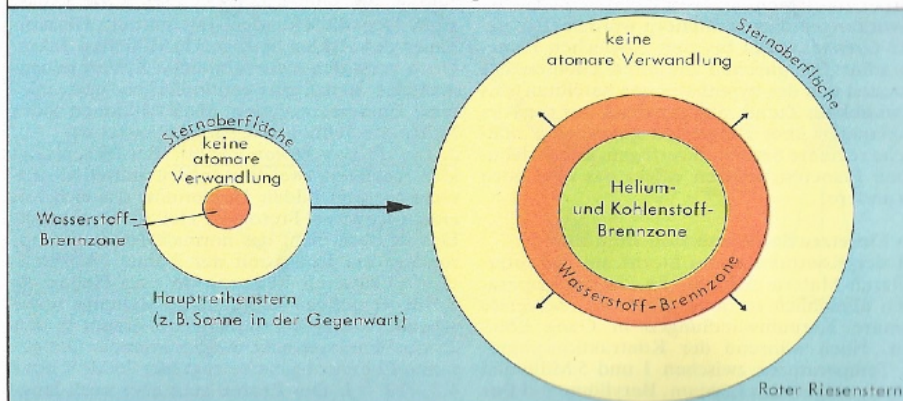


A Die Energieausbeute der beiden Zyklen des »Wasserstoff-Brennens« (logarithmische Skala)



B Physikalischer Zustand im Zentrum der Hauptreihensterne in Abhängigkeit von ihrer Gesamtmasse und Verweilzeit auf der Hauptreihe, d.h. bis zur Verwandlung in einen Roten Riesenstern



C Die atomaren »Brennzonen« im Inneren der Sterne

Schritt dauert nur 6 Sekunden, der dritte 1 Million Jahre.

Insgesamt verwandelt unsere Sonne pro Sekunde 4,2 Millionen Tonnen Masse in Energie. Trotzdem hat sich dieser Massenverlust in den etwa 4,5 Milliarden Jahren, seit die Sonne existiert, auf nur 3 Promille der Gesamtmasse aufsummiert!

Welcher der beiden genannten Zyklen ergiebiger ist, hängt von der jeweiligen Temperatur ab. Wie das logarithmische Diagramm (S. 188 A) zeigt, ist der Proton-Proton-Zyklus schon bei 5 Millionen Kelvin wirksam. Bei etwa 15 Millionen Kelvin hat ihn der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus eingeholt und über 15 Millionen Kelvin überwiegt die Energieausbeute nach dem BETHE-WEIZSÄCKER-Zyklus.

Weitere Entwicklung der Hauptreihensterne

Die Zentraltemperaturen der Sterne, die sich auf der Hauptreihe des HERTZSPRUNG-RUSSELL-Diagramms befinden, sind um so höher, je größer die Gesamtmasse ist (S. 188 B). Die Leuchtgiganten mit blau-weißer Farbe sind so heiß, daß in ihnen der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus überwiegt. Bei den gelben und roten Zwergsternen, also auch bei unserer Sonne, ist die Proton-Proton-Reaktion ergiebiger. In jedem Fall ist aber bei der Energieerzeugung der Hauptreihensterne nur ein verhältnismäßig kleines Kerngebiet maßgebend, das etwa 12% des ganzen Wasserstoffvorrates umfaßt. Da keine Durchmischung der Materie im Inneren stattfindet, brennt dieses Kerngebiet im Laufe der Zeit auf sich allein gestellt aus, ohne die Wasserstoffvorräte in den äußeren Sternbereichen angreifen zu können.

Die **Masse-Leuchtkraft-Beziehung** der Sterne (s. S. 148f.) zeigt nun, daß Sterne hoher Masse viel verschwenderischer mit ihrem Energievorrat umgehen als solche kleiner Masse – eine Folge der höheren Zentraltemperaturen. Ein Stern mit 15 Sonnenmassen leuchtet nicht nur 15 mal heller, sondern 10000 mal heller als die Sonne. Die Umsetzung Masse-Energie vollzieht sich also in einem solchen Stern etwa 670mal schneller als bei der Sonne. Als Folge ergibt sich sofort, daß dieser Stern in 1/670 der Zeit seinen Wasserstoffvorrat im Kern verbraucht, in der dies unsere Sonne zuwege bringt. Der massenreichere Stern hat also eine bedeutend kürzere **Lebenserwartung**. Umgekehrt ist es bei den massearmen Sternen.

Doeh ist die Entwicklung eines Sterns mit dem Abschluß des Wasserstoff-Brennens im Kern noch nicht beendet. Läßt nämlich die Energieerzeugung im Kern eines Sterns nach und damit auch der Gas- und Strahlungsdruck, kommt das innere Gleichgewicht des Sterns (s. S. 105) in Unordnung.

Die Gravitation macht sich in einer **Kontraktion** des Kerns bemerkbar. Dadurch steigen die Zentraltemperaturen aber weiter auf über 100 Millionen K an. Nun kann auch das inzwischen angereicherte Helium über Beryllium zu

Kohlenstoff aufgebaut werden (**»Helium-Brennen«**). Der letztere verbindet sich ab 500 Millionen K mit Heliumkernen zu noch schwereren Elementen, kurz das **»Kohlenstoff-Brennen«** setzt ein. Es liefert weiter Energie.

Die Wasserstoffbrennzone setzt sich allmählich in Richtung Sternoberfläche durch. Die Gesamtenergieproduktion des Sterns ist jetzt bei weitem größer als zu den Zeiten des Wasserstoff-Brennens. Wieder ist das innere Gleichgewicht gestört. Der Gasdruck im Inneren des Sterns wächst an und die äußeren Sternschichten werden solange nach außen gedrängt, bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Jetzt ist aus dem Hauptreihenstern ein **roter Riesenstern** geworden.

Der Zeitpunkt des Aufblähens ist aus S. 188 B ersichtlich. Die Dauer der Expansion selbst ist unterschiedlich, dürfte sich aber wiederum bei den massereichen Sternen schneller vollziehen. Auch der Weg durch den Riesenast des HERTZSPRUNG-RUSSELL-Diagramms ist wieder von der Masse abhängig (Abb. S. 190 B).

Unsere Sonne wird ebenfalls ein Riesenstern. Ihr Durchmesser dürfte etwa auf das 400fache anwachsen, also rund **550 Millionen km**. Die Oberflächentemperatur beträgt dann **3000°C**, die Leuchtkraft ist **10000mal** größer als heute. Es werden noch etwa **3,5 Milliarden Jahre** bis zu ihrer Verwandlung in einen roten Riesen vergehen. Die Oberflächentemperatur der Erde wird dann allmählich so weit ansteigen, daß das organische Leben zugrunde gehen muß.

Die Zentraltemperaturen in den Riesensternen können schließlich auf über 1 Milliarde K ansteigen. Dabei können Elemente bis etwa zum Calcium mit dem Atomgewicht 40 und vielleicht sogar bis zum Eisen (Atomgewicht 56) aufgebaut werden.

Rote Riesensterne haben nach ihrer Expansion vorübergehend ein neues Gleichgewichtsstadium gefunden. Es ist aber lange nicht so stabil wie zu der Zeit, als der Stern noch auf der Hauptreihe stand. Bei fast allen roten Riesen sind daher irgendwelche periodische oder unregelmäßige **Veränderungen** zu beobachten, vor allem in der Helligkeit und im Spektrum.

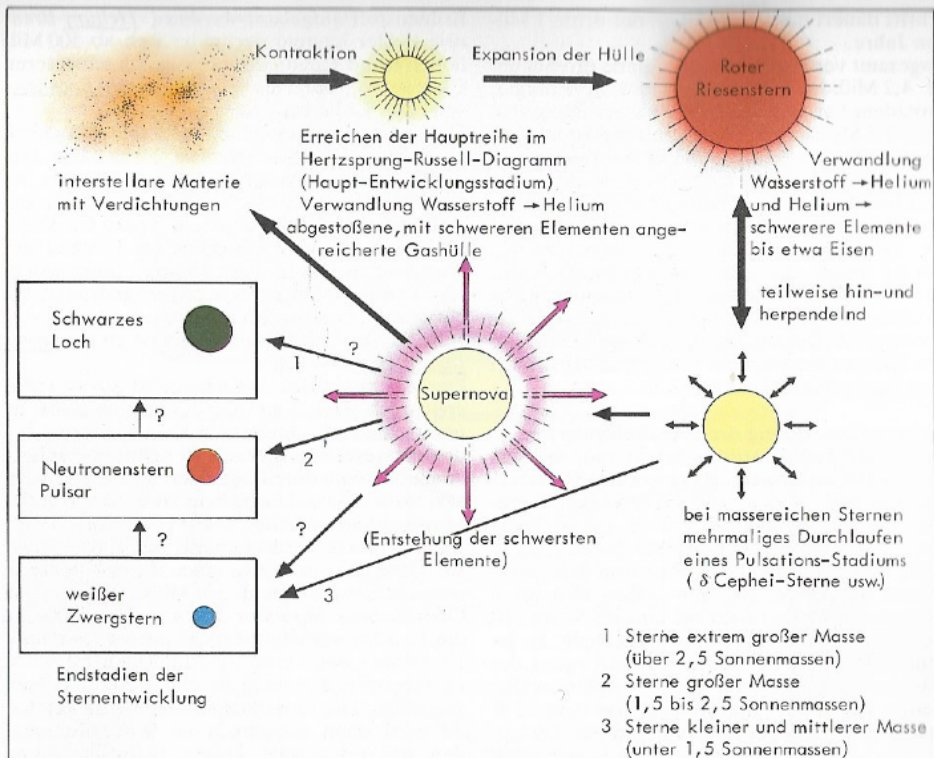
Dazu gehören vor allem die verschiedenen Typen der Pulsationsveränderlichen (s. S. 161). Der Stern kommt **zeitweise in Schwingungen**. Die grundlegende Theorie dazu stellten bereits SHAPLEY (1914) und EDDINGTON (1919) auf: Expandiert der Stern, sinkt der Druck im Inneren ab. Dadurch sinken aber auch Temperatur und Helligkeit, der Stern wird etwas röter. Nachdem der Stern seinen Maximaldurchmesser erreicht hat, fällt er wieder etwas zusammen, er kontrahiert. Der Innendruck beginnt wieder anzusteigen, die Temperatur ebenso und die Farbe geht gegen Weiß.

Irgendwann einmal reichen die Innentemperaturen des Sterns nicht mehr aus, um immer schwerere Elemente unter Energiefreisetzung aufzubauen. Damit sinkt aber auch der Druck,

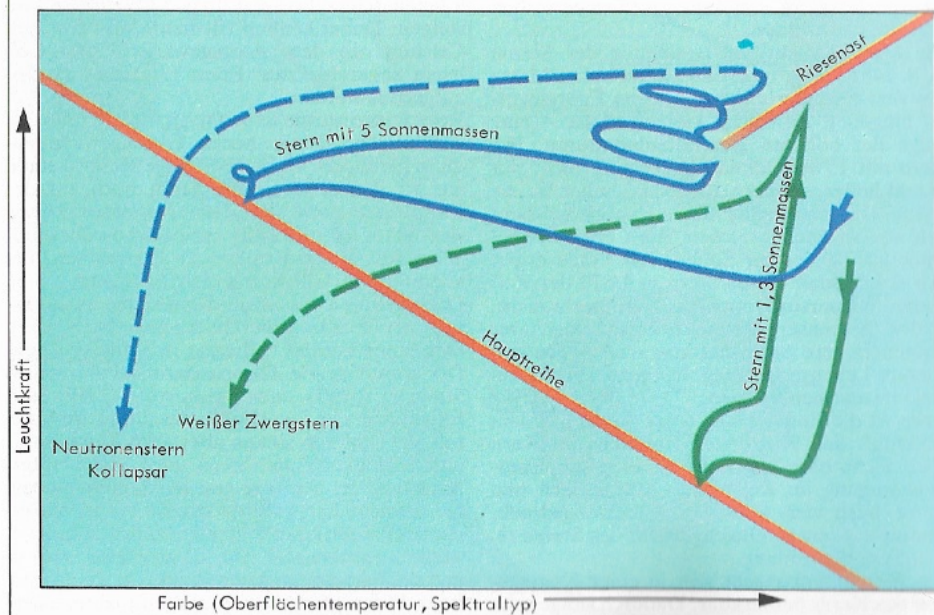
Handwritten note: Die Sonne wird zu einem roten Riesenstern

Handwritten note: SuW! = 300!

Handwritten note: 5-6



A Die Sternentwicklung (Schema). Die letzten Entwicklungswege sind teilweise noch unsicher



B Prinzipieller Entwicklungsweg zweier Sterne verschiedener Masse im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Gestrichelter Verlauf noch unsicher

der bisher die Gravitation kompensierte. Das innere Gleichgewicht des alternden Sterns kann nicht mehr aufrechterhalten werden. Der Kern des Sterns muß in sich zusammenfallen. Damit kommt es aber auch zu einer Trennung des dichten Kerns und der immer weiter aufgeblasenen Hülle: Die äußeren Sternschichten werden abgestoßen und es entsteht ein Planeta- rischer Nebel (s. S. 173). Zurück bleibt im Inneren ein weißer Zwergstern - der freigesetzte Sternkern.

Ein weißer Zwerg besteht aus entarteter Materie. Das mechanische Gleichgewicht wird nicht mehr durch den normalen Gasdruck aufrechterhalten, sondern durch den Elektronendruck. Im entarteten Gas mit seiner Dichte um 1 Mill. g/cm^3 ist der Druck nicht mehr von Temperatur und Dichte, sondern nur noch von der Dichte abhängig. Im Verlauf von 1-10 Mrd. Jahren kühlt ein weißer Zwerg allmählich aus und wird dann unsichtbar (schwarzer Zwerg). Die meisten Sterne enden als weißer Zwerg. Das erklärt auch ihre gar nicht so geringe Häufigkeit. Berechnungen zeigen aber, daß es für einen weißen Zwerg eine obere Massengrenze bei 1,5 Sonnenmassen gibt (CHANDRASEKHAR-Grenze). Übersteigt die verbleibende Masse des Sterns diesen Wert, so geht der Kollaps weiter in einen Neutronenstern.

Supernovae

Massereiche ältere Sterne haben in ihrem Inneren einen Schalenaufbau: Außen Wasserstoff und Helium, nach innen hin die im Laufe der Sternentwicklung aufgebauten schwereren Elemente: Kohlenstoff, Silicium und Eisen. Bei der Sonne, also einem Stern geringerer Masse, hört die Kernfusion bereits beim Kohlenstoff auf. Für die nächst höheren Reaktionen sind über 8 Sonnenmassen erforderlich. Schließlich enthält der Sternkern nur noch Eisen (und ähnlich schwere Elemente). Es können keine schwereren Elemente aufgebaut werden, da dies nicht Energie freisetzen, sondern verbrauchen würde. Jetzt können folgende Prozesse ablaufen: 1. Eine relativistische Entartung führt dazu, daß die Elektronen, deren Druck bei »normaler« Entartung zuvor zum Ausgleich der Gravitation diente, immer weniger zum Druck beitragen. Es kommt zum Kollaps. 2. Die Kerne der Eisatonome werden bei extrem hohen Temperaturen aufgebrochen. Dies verbraucht Energie, der Druck nimmt ab, ein Kollaps folgt. 3. Protonen lagern energiereiche Elektronen an und es bilden sich Neutronen. Oder Neon und Magnesium fangen Elektronen ein. Es sinkt der Druck, ein Kollaps folgt. Vermutlich dauert der Kollaps nur 0,1 s. Dabei entsteht eine Stoßwelle, die im Inneren reflektiert wird: Die äußeren Sternschichten explodieren, eine Supernova leuchtet auf, ein gasförmiger Überrest nach Art des Crabnebels bildet sich, zurück bleibt ein Neutronenstern (s. S. 165). Dieses Szenario gilt für Supernovae vom Typ II. Bei Typ I erfolgt die Explosion eines

weißen Zwergsterns. Dieser war Partner in einem Doppelsternsystem. Vom anderen Partner fließt Materie auf den weißen Zwerg über. Schließlich übersteigt die Masse des weißen Zwerges die CHANDRASEKHAR-Grenze. Er stürzt so abrupt in sich zusammen, daß die freiwerdende Gravitationsenergie den Stern völlig zerreißt. Als Überrest sieht man also nur expandierende Gasfetzen.

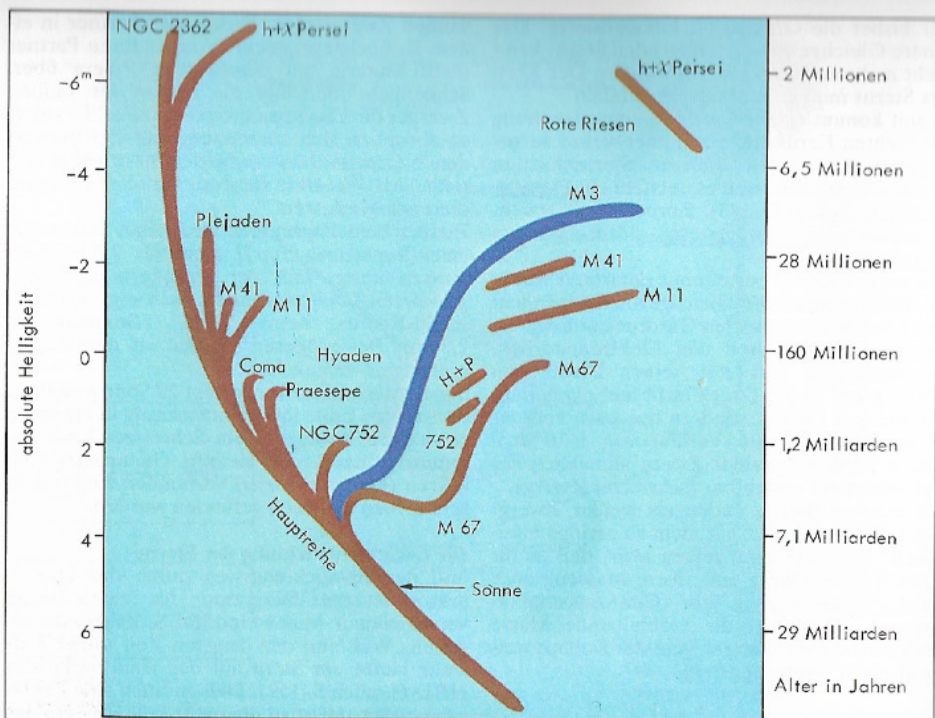
Bleiben beim Zusammenbruch eines Sterns und einer Supernova Typ II mehr als 2,5 Sonnenmassen übrig, fällt der Sternkern zu einem schwarzen Loch zusammen. Sein sog. Schwarzschild-Radius beträgt bei 1 Sonnenmasse 2,5 km. Bei größeren Massen ist der Radius größer und umgekehrt. Supermassive Sterne mit über 20 Sonnenmassen dürften am Ende ihrer Entwicklung in einem so gewaltigen Kollaps in ein Schwarzes Loch zusammenstürzen, daß sie mit Gammastrahlenblitzen (Gamma-Bursts) verbunden sind, die in sehr fernen Galaxien gefunden wurden.

Die Gesamtentwicklung der Sterne

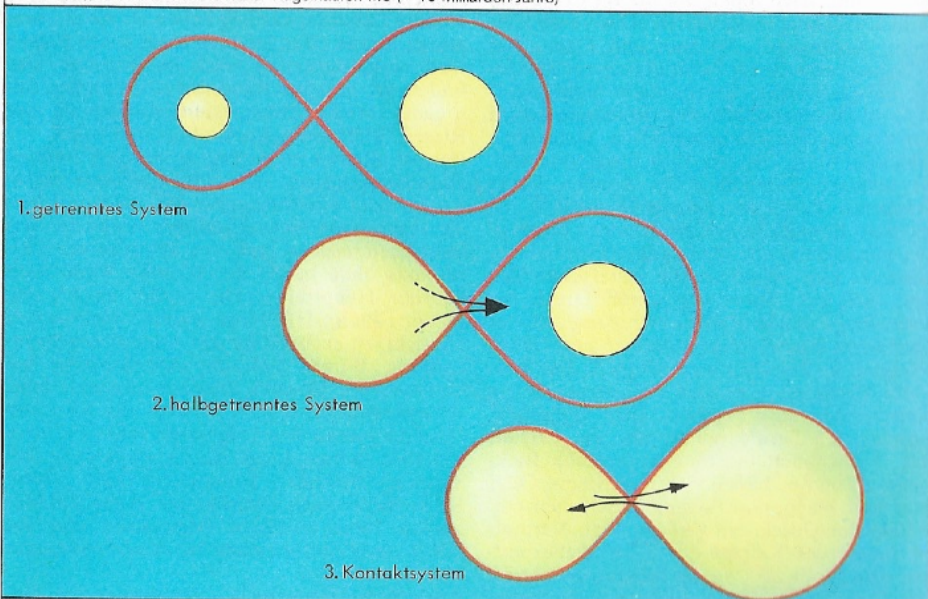
und der Entwicklungsweg durch das HERTZSPRUNG-RUSSELL-Diagramm für zwei Sterne verschiedenerer Masse sind auf S. 190 wiedergegeben. Während der längsten Zeit seiner Existenz bleibt ein Stern auf der Hauptreihe des HRD (s. auch S. 152). Dies ist auch eine Erklärung dafür, daß man die meisten Sterne auf der Hauptreihe findet. Der linke obere Teil der Hauptreihe ist dünner besetzt als der rechte untere Teil, weil die massereicheren Sterne eine kürzere Lebenserwartung haben als die massenarmen Sterne. Das Stadium eines roten Riesen wird verhältnismäßig rasch durchlaufen, also findet man auf dem Riesenast eine dünnere Besetzung. Weiße Zwerge sind häufiger als rote Riesen, weil sie ein Endstadium darstellen.

Betrachtet man eine gemeinschaftlich entstandene Sterngruppe, etwa einen offenen Sternhaufen oder einen Kugelhaufen, dann bröckelt die Hauptreihe im Laufe ihrer Geschichte von links oben nach rechts unten ab, denn die Sterne links oben haben die kürzeste Verweilzeit auf der Hauptreihe. Die Stelle, an der die Hauptreihe im HRD irgendeines Sternhaufens abbricht, ist ein Maß für das Alter dieses Sternhaufens. Würde z.B. die Abbruchstelle bei Sternen von 70facher Sonnenleuchtkraft bzw. 3 Sonnenmassen liegen, so wäre das Alter des Haufens gemäß dem Diagramm auf S. 192 etwa 350 Mill. Jahre. Liegt die Abknickstelle bei Sternen 5facher Sonnenleuchtkraft bzw. 1,5 Sonnenmassen, würde das Alter 2,4 Milliarden Jahre betragen. Man kann also das HRD eines Sternhaufens zu Altersbestimmungen heranziehen.

Auch für Einzelsterne läßt sich in günstigen Fällen ein ungefähres Alter angeben, und zwar dann, wenn ein älterer Stern sich bereits anschickt, die Hauptreihe zu verlassen oder wenn ein junger Stern noch nicht die Hauptreihe erreicht hat. In jedem dieser Fälle müssen aber



A Das Hertzsprung-Russell-Diagramm verschiedener Sternhaufen. Aus der Abbruch- bzw. Knickstelle der Hauptreihe kann das Alter der Sternhaufen abgeleitet werden. Extrem jung sind also z. B. NGC 2362 oder h+χ Persei (~ 2 Millionen Jahre), extrem alt M 67 und der Kugelhaufen M 3 (~ 10 Milliarden Jahre)



B Die verschiedenen Formen enger Doppelsternsysteme. Die rot gezeichnete geschwungene Acht ist die Rochesche Grenze der beiden Sterne. Bei 1 füllen beide Sterne ihr Rochesches Volumen nicht aus, bei 2 füllt ein Stern, bei 3 füllen beide Sterne diesen Bereich aus. Expandiert ein Stern über die Rochesche Grenze, dann fließt Materie auf den Nachbarstern über, bei 2 also von links nach rechts, bei 3 in beiden Richtungen (siehe Pfeile). Diese Systeme können aber auch von expandierenden Gashüllen umgeben sein

Masse und Leuchtkraft genügend genau bekannt sein. Ein extrem junger Stern ist z. B. der Stern ρ Puppis mit höchstens 500000 Jahren. Rigel im Orion hat 6 Mill. Jahre, Regulus im Löwen 200 Mill. Jahre, Sirius im Großen Hund höchstens 300 Mill. Jahre, desgleichen Wega in der Leier, während Atair im Adler nahezu 2 Milliarden Jahre alt ist.

Die Entwicklung enger Doppelsterne

Bei der Betrachtung einiger Doppelsterne stellen sich scheinbare Widersprüche zu dem auf den letzten Seiten dargestellten Entwicklungsmodell der Sterne heraus. Bei dem Paar Sirius A/Sirius B ist ein Stern von 2 Sonnenmassen, der auf der Hauptreihe des HRD sitzt, mit einem weißen Zwergstern von 1 Sonnenmasse verbunden. Wenn beide Komponenten mit diesen Massen etwa gleichzeitig entstanden sind, müßte der kleinere Stern B mit 1 Sonnenmasse eine viel längere Lebenserwartung haben als A. Er dürfte also entwicklungsmäßig noch gar kein weißer Zwerg geworden sein.

Wenn man trotzdem einen gemeinsam und gleichzeitig entstandenen Doppelstern annimmt, dessen Komponente B eine große Masse und dessen Komponente A eine geringe Masse aufweist, dann ist zu erwarten, daß Stern B als erster zu einem roten Riesen wird. Er bläht sich so stark auf, daß ein großer Teil seiner Masse auf den ursprünglich kleineren Partner A überfließt. Im Endeffekt ist nun A der massereichere Partner geworden, der von einem alten Stern, eben einem weißen Zwerg, der jetzt nur noch eine kleine Masse hat, umkreist wird.

Jedenfalls scheint es sehr plausibel, daß der Materieaustausch bei Doppelsternen eine sehr wichtige modifizierende Rolle für die Entwicklung spielt. Es kann z. B. vorkommen, daß von einem Riesenstern so lange Materie auf einen weißen Zwerg überfließt, daß dieser immer mehr mit unverbrauchtem Wasserstoff angereichert wird. Steigt dessen Temperatur auf mehrere Mill. K an, kommt es zu einer plötzlichen Kernfusion – ein Novaausbruch (s. S. 163). Dies kann sich mit dem weiteren Nachschub von Materie durch den Riesenstern wiederholen. Mit diesem Modell kann man viele Eigenschaften und die verschiedenen Typen der Novae gut erklären.

Ist der kompakte Begleiter ein Neutronenstern (Pulsar) oder sogar ein schwarzes Loch, so wird die überfließende und sich zunächst in einer Scheibe (Accretion-Scheibe) ansammelnde Materie durch das enorme Magnetfeld zu den Magnetpolen abgelenkt. Dort entsteht ein »Brennfleck« mit Temperaturen von 100 Mill. K sowie eine starke Röntgenstrahlung. So fließt z. B. bei dem System HZ Her/Her X-1 pro Jahr ein Milliardstel Sonnenmasse über. Es gibt auch Röntgen-Burster, wo auf einen Neutronenstern interstellare Materie fließt, die in unregelmäßiger Folge nach einem Aufheizen auf viele Mill. K zu Kernfusionen veranlaßt wird.

Schwarze Löcher lassen sich am ehesten als Partner in Röntgen-Doppelsternen nachweisen. Ein Beispiel ist Cygnus X-1, wo das kompakte Objekt rd. 10 Sonnenmassen enthalten dürfte, zu viel für einen Neutronenstern.

Anreicherung schwerer Elemente

Während der Entwicklung eines Sterns werden die schwereren Elemente aus den leichten Elementen, insbesondere aus Wasserstoff, aufgebaut. Nimmt man an, vor langen Zeiten sei im Weltall nur Wasserstoff und Helium vorhanden gewesen und die ersten Sterne seien nur aus diesen Elementen aufgebaut gewesen, dann würde sich doch allmählich die interstellare Materie mit schwereren Elementen anreichert haben. Denn ein Stern verliert während seiner letzten Entwicklungsphasen (Supernovae, normale Novae, aber auch Instabilitäten bei den roten Riesen, Planetarische Nebel) einen gewissen Teil seiner Materie an die Umgebung. Sterne, die sich später aus der interstellaren Materie bilden, erhalten also von Anfang an einen bestimmten Anteil schwererer Elemente. Je später ein Stern entsteht, desto größer ist dieser Prozentsatz an schwereren Elementen. Das Eisen, das Silicium, der Kohlenstoff usw. in unserer Erde oder Sonne ist also früher in einem anderen Stern gebildet worden. Die mit der Zeit stärkere Anreicherung schwererer Elemente im Kosmos macht sich in der Tat bei vielen Sternen und anderen kosmischen Objekten bemerkbar; junge Sterne sind metallreicher als ältere Sterne. So enthalten auch die Sterne der Population I (s. S. 153) mehr Metalle als die der Population II.

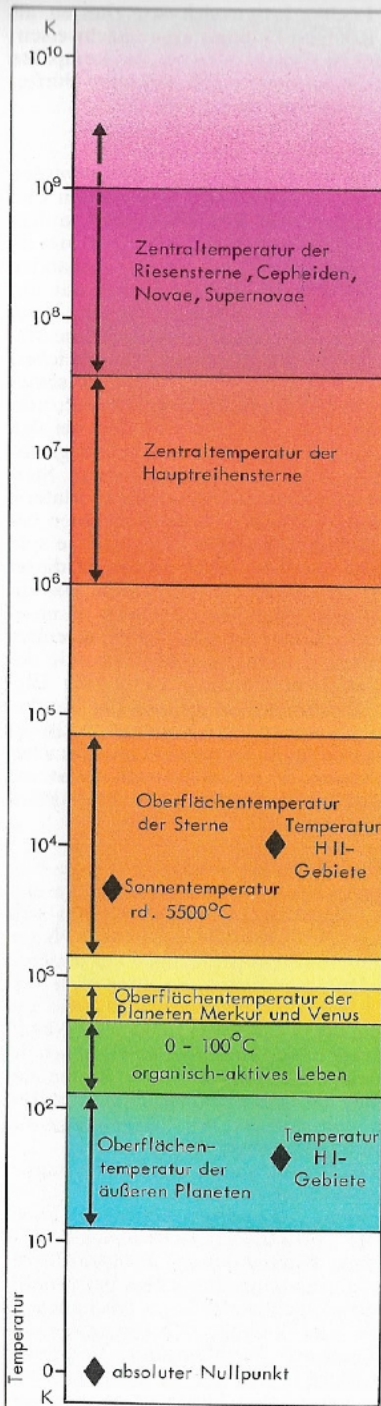
Organisches Leben (Astrobiologie)

In den letzten Jahren hat das Studium der biochemischen Grundlagen des Lebens große Fortschritte gemacht. Andererseits ist unser Wissen über die Oberflächenbedingungen auf anderen Himmelskörpern gestiegen. So ist es nicht verwunderlich, wenn die Frage nach der Rolle und Verbreitung des organischen Lebens im Weltall wieder stärker in den Brennpunkt wissenschaftlicher Überlegungen gerückt ist. In diesem Zusammenhang hat man auch gelegentlich die Bezeichnung Astrobiologie oder Exobiologie für diese Bemühungen eingeführt.

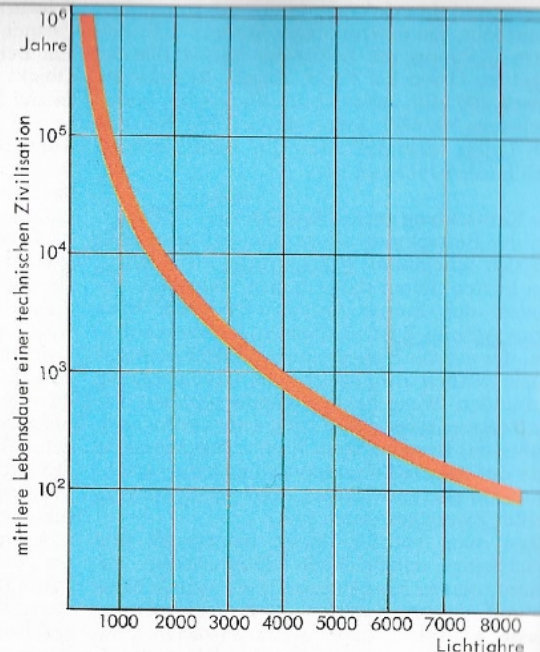
Folgende Voraussetzungen des Lebens gelten heute als nahezu unumstößlich:

1. Die Bindung organischen Lebens an hochkomplizierte molekulare Verbindungen (Eiweißmoleküle, Nukleinsäuren). Einfache Moleküle oder Einzelatome sind selbst bei primitiven Lebewesen nicht in der Lage, biochemische Reaktionen und Vorgänge (Nahrungsaufnahme, Stoffwechsel, Fortpflanzung, Vererbung usw.) zu steuern.

2. Aktives, organisches Leben ist an eine verhältnismäßig enge Temperaturgrenze gebunden. Oberhalb rund 100°C zerfallen die großen organischen Moleküle in kleinere und über einigen tausend Grad C sind nur noch Einzelatome exi-

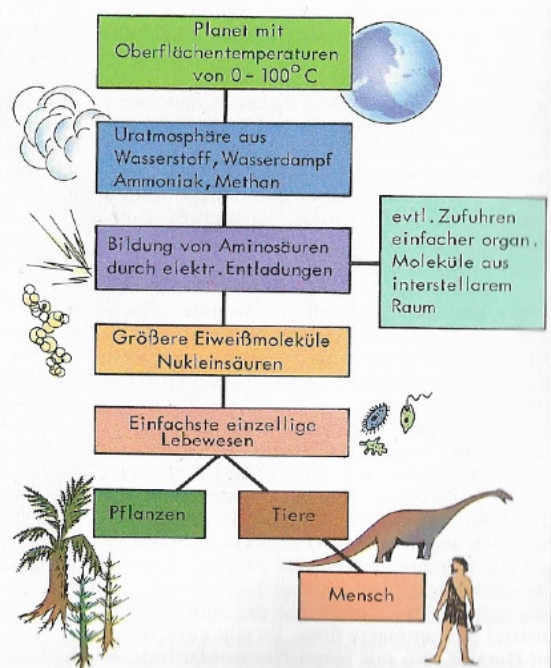


A Die Temperaturskala des Kosmos
Nur ein kleiner Bereich daraus ist für aktives organisches Leben geeignet



mittlere Lebensdauer einer technischen Zivilisation

B Abhängigkeit des mittleren Abstandes zweier gleichzeitig existierender technischer Zivilisationen von ihrer mittleren Lebensdauer



C Die Entstehung organischen Lebens (Schema)

stanzfähig. Wesentlich unter 0°C (Körpertemperatur) aber verlangsamten sich die biochemischen Reaktionen so stark, daß aktives Leben unmöglich ist. Das Leben kann allenfalls vorübergehend in latenter Form (in »eingefrorenem Zustand«) erhalten bleiben und wird erst nach entsprechender Erwärmung wieder aktiv. Die günstigsten Temperaturen zur Lebensentfaltung liegen zwischen etwa + 25° und + 45°C. Die meisten höher entwickelten Tiere sowie der Mensch haben daher gerade eine Körpertemperatur in diesem Bereich und versuchen, eine solche Temperatur durch komplizierte Temperaturregelsysteme oft um Bruchteile eines Grades genau einzuhalten.

Als keine unbedingte Voraussetzung gelten speziellere Umweltbedingungen wie eine sauerstoffreiche Atmosphäre, viel Wasser an der Oberfläche usw. Neuere Untersuchungen ergaben, daß zumindest bestimmte irdische Kleinlebewesen große Anpassungsfähigkeit zeigen.

Über die Entstehung des Lebens glaubt man seit den Experimenten von S. L. MILLER (1953) einen Weg gefunden zu haben, wie in einer »Uratmosfera« aus Wasserstoff, Wasserdampf, Methan und Ammoniak (so stellt man sich auch die ursprüngliche Erdatmosphäre vor) durch die Entwicklung elektrischer Entladungen oder energiereicher Ultraviolettstrahlung Aminosäuren, die Bausteine der Eiweißmoleküle, entstehen. Wie von hier aus der Weg zum ersten primitiven Organismus verläuft, ist zwar im einzelnen noch umstritten. Im Grundsatz besteht jedoch Einhelligkeit darüber, daß der weitere Aufbau von Aminosäuren zu größeren Molekülen und zur lebenden Substanz ein Vorgang ist, der unter geeigneten Bedingungen vielleicht auch auf anderen Planeten ablaufen kann.

In neuerer Zeit fand man im interstellaren Raum organische Moleküle (s. S. 169). Auch die Existenz von Aminosäuren in einigen Meteoriten wurde bestätigt. Offenbar stellt die Natur schon in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung von Planetensystemen grundsätzlich das Rohmaterial zur Verfügung, aus dem Organismen entstehen könnten. Tatsächlich kennen wir aber keinen einzigen anderen Himmelskörper in unserem Planetensystem, auf dem selbst niederste Lebensformen existieren. Unser Erwartungshorizont wurde in dieser Hinsicht stark eingengt. Zu Beginn des 20. Jh. war es selbst in seriösen wissenschaftlichen Kreisen eine fast ausgemachte Sache, daß es zumindest auf unseren Nachbarplaneten Mars und Venus Organismen, vielleicht sogar Menschen gibt.

So konzentrieren sich die neueren Überlegungen auf den Bereich außerhalb unseres Sonnensystems. Die Häufigkeit anderer Planetensysteme ist allerdings nicht exakt anzugeben. Man kann jedoch für eine überschlagsmäßige (und stark optimistische) Rechnung davon ausgehen: 100% aller Sterne besitzen Planeten. Ziehen wir davon zunächst die Doppelsterne ab. In diesen Fällen wären nämlich etwaige Planetenbahnen oft so gestaltet, daß die Distanzen zu den

beiden Zentralsonnen stark schwanken. Weiter müssen die roten Riesensterne und weißen Zwergsterne herausgenommen werden, da die vorausgegangene Expansionsphase dieser Sterne etwaiges Leben an einer Planetenoberfläche wegen des großen Temperaturanstiegs zum Erlöschen gebracht hätte. Von den »Hauptreihensternen« müssen weiterhin die Sterne hoher Masse und Leuchtkraft gestrichen werden. Ihre Entwicklungsdauer ist viel zu kurz, als daß sich an einer Planetenoberfläche auch nur primitives Leben hätte entwickeln können. Die extremen roten Zwergsterne wiederum leuchten so schwach, daß auch die ihnen zunächst stehenden Planeten an ihrer Oberfläche zu kalt wären. Es bleiben übrig die Sterne zwischen 2,5facher und 1/100 Sonnenleuchtkraft. Das wären einige Prozent aller Sterne. Nicht bei allen diesen Fällen wird nun gerade ein Planet in einer günstigen Temperaturzone, in der sogenannten Ökosphäre, liegen.

Außerdem besteht auf den hypothetischen Planeten nur eine Möglichkeit für organisches Leben. Ob es wirklich existiert, ist eine offene Frage. Vielleicht konnten sich dort nur Lebensformen wie Pflanzen oder einfache Tiere entwickeln. Dabei sei auch auf die mögliche Existenz von Fossilien primitiver Lebensformen in einem Marsmeteoriten verwiesen (s. S. 93). Die bisher neu entdeckten Planeten (s. S. 187) stimmen außerdem nicht genau mit den Verhältnissen in unserem Planetensystem überein. Man muß damit rechnen, daß es Systeme gibt, die in ihrer Struktur so stark von unserem abweichen, daß sich dort höheres Leben nicht entwickeln kann.

Fragt man nach der Häufigkeit intelligenten Lebens im Kosmos, so ergibt sich eine weitere drastische Einschränkung in der überschlagsmäßigen Wahrscheinlichkeitsrechnung. Auf unserer Erde trat der Mensch erst 4,5 Milliarden Jahre nach ihrer Entstehung auf. Und eine Funktechnik, auf die etwaige andere Zivilisationen aufmerksam werden könnten, gibt es erst seit wenigen Jahrzehnten! Es ist leicht einzusehen, daß die Häufigkeit technischer Zivilisationen im Kosmos und deren mittlere Entfernung voneinander stark abhängig ist von der Lebensdauer solcher Zivilisationen. Atomare Selbstvernichtung oder biologische Degeneration könnte diese Dauer stark beeinträchtigen. In anderen, günstiger gelagerten Fällen mag eine solche Zivilisation mehrere Millionen Jahre existieren. Ein brauchbarer statistischer Mittelwert wäre vielleicht 100000 Jahre (zum Vergleich: die technische Zivilisation auf der Erde dauert bisher nur knapp 100 Jahre). Dann wären solche Zivilisationen (sehr optimistisch betrachtet) im Mittel rund 800 Lichtjahre entfernt.

Im Rahmen des Projekts SETI (Abk. für Search for Extra-Terrestrial Intelligence) wurden schon Tausende von Sternen nach künstlichen Radiosignalen anderer Zivilisationen abgesucht. Neue Verfahren erlauben die gleichzeitige Suche auf Millionen Frequenzen.