

# Von der Kunst Kohle zu machen

>> Josef Gaßner und Harald Lesch

*Unser Menschenhirn, unser Leib und Gebein – Mosaiken seien sie, derselben Elementarteilchen, aus denen Sterne und Sternstaub, die dunklen, getriebenen Dunstwolken des interstellaren Raums, beständen ...*

*Das Leben, hervorgerufen aus dem Sein, wie dieses einst aus dem Nichts, das Leben, diese Blüte des Seins, es habe alle Grundstoffe mit der unbelebten Natur gemein, nicht einen habe es aufzuweisen, der nur ihm gehöre.*

*(Thomas Mann, »Bekenntnisse des Hochstaplers Felix Krull«)*

**B**licken wir hinaus ins Universum, sehen wir an chemischen Elementen in erster Linie Wasserstoff, Helium, Sauerstoff und Kohlenstoff. Wir bestehen ebenfalls aus Sauerstoff, Kohlenstoff und Wasserstoff, erblicken da draußen also gewissermaßen die materiellen Voraussetzungen unserer eigenen Existenz.

Woran liegt es, dass diese fundamentalen Bausteine des Lebens in der beobachteten Häufigkeit vorkommen – oder anders gefragt, welche Prozesse sind es, die diese Elemente entstehen lassen? Wäre intelligentes Leben auch auf der Basis einer anderen Elementzusammensetzung möglich?

Machen wir einen Schritt nach dem anderen und betrachten zunächst die Entstehung der chemischen Elemente durch die Kernfusion oder »Nukleosynthese«:

Hierbei haben wir es mit konkurrierenden Kräften zu tun, wie sie unterschiedlicher kaum sein könnten: Die elektromagnetische Kraft mit ihrer unendlichen Reichweite stößt die positiv geladenen Atomkerne voneinander ab, während die starke Kernkraft mit ihrer extrem kurzen Reichweite versucht, sie miteinander zu verschmelzen.

In gewisser Weise ist dies vergleichbar mit zwei Artisten hoch oben im Zirkuszelt. Einer, der Springer, wird

mit möglichst hoher Energie auf den anderen zuspringen, den Fänger. Fortwährend wird dabei die Erdanziehungskraft mit ihrer unendlichen Reichweite auf den Springer einwirken, und seine einzige Chance, den Fall zu verhindern, besteht darin, nahe genug an den Fänger heranzukommen, sodass die starken Arme der Artisten einander packen können. Fliegen sie zu weit aneinander vorbei, helfen auch die stärksten Muskeln nichts, es kommt keine dauerhafte Verbindung zu Stande.

Betrachten wir stattdessen zwei Protonen, die aufeinander zufliegen, so wächst die abstoßende Kraft sogar

quadratisch an, je geringer der Abstand zwischen ihnen wird. Sie benötigen also entsprechend mehr Bewegungsenergie, damit sie sich so nahe kommen, dass die »starken Arme« der Kernkraft, mit ihrer Reichweite von gerade mal dem Durchmesser eines Atomkerns, zupacken können.

»Ausreichende Energie« ist hier, bei der zufälligen Bewegungen in einem Gas, gleichbedeutend mit »ausreichend hoher Temperatur«. Erst bei einer Milliarde Grad verfügen die Teilchen im Durchschnitt über genügend kinetische Energie. Dies ist ein Temperaturwert, der selbst im Inneren unserer Sonne mit zehn Millionen Grad

beim besten Willen nicht erreicht wird, wenngleich dort offensichtlich Kernfusion stattfindet.

## Das Unmögliche möglich machen

Dass jeder einzelne Stoßpartner im günstigsten Fall des Frontalzusammenstoßes nur über die Hälfte der insgesamt notwendigen Energie verfügen muss, haben wir bei der Berechnung bereits miteinbezogen. Jetzt können wir noch darauf hoffen, dass die Geschwindigkeitsverteilung – gegeben durch die Maxwell-Boltzmann-Statistik, die berücksichtigt, dass sich eben nicht alle mit der Durchschnittsgeschwindigkeit bewegen, sondern man-

che langsamer und dafür andere schneller – ausreichend schnelle Protonen liefert. Der Beitrag ist jedoch fast null:  $e^{-1110}$ . Angesichts dieses Dilemmas wird Arthur Eddington (Foto S. 33) – ein Pionier auf diesem Gebiet – gerne zitiert mit: »We do not argue with the critic who urges that stars are not hot enough for this process; we tell him to go and find a hotter place.«

Die Rettung kommt schließlich von Seiten der Quantenmechanik. Auf Grund ihrer Winzigkeit unterliegen die Protonen nämlich dem quantenmechanischen Tunneleffekt. Dieser bewirkt, dass sie nicht scharf im Raum lokalisiert sind wie zwei Billardkugeln, >

## Kunstwerk aus Kohlenstoff

Der berühmte Pferdekopfnebel (Barnard 33) im Orion hebt sich mit seiner unverkennbaren Form gegen den leuchtenden Gasnebel LBN 954 ab, dessen Licht er wie Ruß verschluckt.



**Der Kohlensack** verdunkelt die Milchstraße im Kreuz des Südens. Solche Staubwolken enthalten Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Siliziumkarbid, Grafitteilchen und amorphen Kohlenstoff.

> die sich entweder berühren oder aneinander vorbeirollen. Sie sind vielmehr mit schwabbeligen Grützebällchen vergleichbar, die sich mit etwas Glück, wenn sie sich nur nahe genug kommen, durch ihr Wabbeln doch berühren können. Präzise ausgedrückt fasst man das Proton als Welle auf, die auch in räumliche Bereiche eindringen kann. Nach der konventionellen Physik würde sie diese niemals erreichen. Somit können die Protonen die Energiebarriere der elektromagnetischen Abstoßung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit »durchtunneln«. Wer bislang also die Quantenmechanik eher als Spielwiese der theoretischen Physik abgetan hat, der möge sich an dieser Stelle vergegenwärtigen, dass wir allesamt unsere Existenz dem quantenmechanischen Tunneleffekt verdanken.

So weit, so gut. Jetzt stellt sich natürlich die Frage: Wenn die Fusion geladener Teilchen derart aufwändig ist, wieso

greift die Natur dann nicht einfach auf Neutronen zurück? Die elektromagnetische Abstoßung wirkt ja nicht auf diese elektrisch neutralen Partikel.

#### Zu wenig standhaft

Dummerweise sind ungebundene, freie Neutronen als Fusionspartner in unserem Universum Mangelware, da sie innerhalb einer Viertelstunde zerfallen. Lediglich in Kernen können sie bestehen und das nur im Zusammenspiel mit Protonen – auch die Verbindung von zwei Neutronen allein, das Dineutron, zerfällt. Alle stabilen und damit in großer Menge verfügbaren Fusionspartner beinhalten also Protonen und sind somit elektrisch positiv geladen.

Eine ganz besondere Situation in unserem Universum, gewissermaßen das Eldorado der Nukleosynthese, haben wir allerdings bislang unterschlagen. In den ersten Minuten nach dem Urknall waren

freie Neutronen nämlich in Hülle und Fülle vorhanden, weil sie gerade erst gebildet worden waren und deshalb noch nicht ausreichend Zeit zum Zerfallen hatten. Darüber hinaus war auch die herrschende Temperatur hoch genug, um Nukleosynthese im gesamten Universum ablaufen zu lassen. Dementsprechend hoch waren die Fusionsraten, wodurch die Elementhäufigkeiten in unserem Universum maßgeblich bestimmt wurden. Es gab nur eine einzige derartige Fusionsparty, die primordiale Nukleosynthese, und sie hat nur wenige Minuten gedauert. Ihr Kehraus lieferte fast ausschließlich Protonen – also nichts anderes als Wasserstoffkerne – und Heliumkerne, weil die Elemente mit fünf und acht Partikel im Kern (Massenzahlen  $A=5$  und  $A=8$ ) instabil sind und unmittelbar nach ihrer Entstehung wieder zerfallen, lange bevor sie als Zwischenprodukte in weiteren Stoß- und Fusionsprozessen mitwirken könnten. Deshalb sind Wasserstoff und Helium mit Abstand die häufigsten Elemente im Universum.

Der Weg zu schwereren Elementen bleibt der primordialen Nukleosynthese somit versperrt und es wird noch eine beträchtliche Zeit vergehen, bis sie in unserem Universum – im wahrsten Sinn des Worts – »das Licht der Welt erblicken«, nämlich genau dort, wo dieses Licht seinen Ursprung hat: im Innern von Sternen.

Die Probleme der Nukleosynthese, insbesondere die Instabilitätslücken bei  $A=5$  und  $A=8$  wie sie in der frühen Phase des Universums auftreten, sind grundsätzlicher Natur und betreffen ebenso die stellare Kernfusion. Demnach werden auch zwei Heliumkerne, die im Innern eines Sterns zu Beryllium-8 verschmelzen, in rund einer zehnbilliardstel Sekunde wieder in die beiden Ausgangsprodukte zerfallen sein. Der grundlegende Unterschied besteht jedoch darin, dass die Heliumkerne hier so dicht gepackt sind, dass innerhalb dieser kurzen Zeit ein Stoß mit einem weiteren Heliumkern stattfinden kann. Die stellare Nukleosynthese gewinnt damit den Wettlauf und das Zwischenprodukt Beryllium fusioniert mit einem weiteren Heliumkern zu Kohlenstoff-12. Man nennt diese gesamte Reaktionskette den  $3\alpha$ - oder Tripel-Alpha-Prozess, da drei Heliumkerne – nach ihrem Vorkommen in radioaktiver Strahlung auch Alphateilchen genannt – darin verwickelt sind (Grafik rechts).

Während der primordialen Nukleosynthese war die Teilchendichte im Uni-

versum für diesen zweiten Stoß nicht groß genug. Bei der Fusion von Heliumkernen im Innern von Sternen ist sie jedoch so hoch, dass innerhalb besagter zehnbilliardster Sekunde nicht nur einer, sondern Millionen von Stößen stattfinden. Dies wäre in menschlichen Zeitmaßstäben damit vergleichbar, dass ein Berylliumkern mehrere Monate existiert und dabei jede Sekunde einen Stoß mit einem Heliumkern erleidet. Diesen extremen Bedingungen im Zentrum entsprechend heißer und dichter Sterne – den Roten Riesen – verdanken wir es also, dass die Fusion von drei Heliumkernen zu Kohlenstoff möglich wird.

#### Billard mit allen quantenmechanischen Tricks

Mit unseren Betrachtungen zur Kohlenstoffsynthese in Sternen wandeln wir gedanklich auf den Spuren von Fred Hoyle (Foto S. 33), der Anfang der 1950er Jahre erfolgreich versuchte, diese Fusionspro-

zesse im Detail zu verstehen. An genau diesem Punkt angelangt ergab sich jedoch bei seinen Berechnungen zum Tripel-Alpha-Prozess ein gravierendes Problem: Die beobachtete Häufigkeit von Kohlenstoff ließ sich einfach nicht erreichen. Schlimmer noch, seine Kalkulation lieferte so geringe Mengen, dass die Entstehung von Leben auf der Basis von Kohlenwasserstoffmolekülen im Universum kaum möglich schien.

Nun, Leben auf der Grundlage von Kohlenstoff, das musste es sehr wohl geben, davon konnte sich Fred Hoyle täglich im Spiegel vergewissern. Er löste das Problem kurzerhand, indem er eine fehlende Zutat in der Reaktionskette annahm, die den Prozess derart massiv unterstützt, dass die Produktion von Kohlenstoff um mehrere Zehnerpotenzen ansteigt. Diese so genannte Resonanz bei einer Energie von 7,65 MeV sollte seiner Vorhersage nach den Einfang des dritten Alphateilchens begünstigen. Sicherlich >

**Drei Heliumatome** fusionieren schrittweise im Triple-Alpha-Prozess. Nur wenn während der kurzen Lebensdauer des Berylliums ein drittes Alphateilchen eingefangen wird, entsteht ein Kohlenstoffkern.



**Massenzahl:** Gibt die Anzahl aus den in einem Atomkern vorhandenen Protonen und Neutronen an. So hat Kohlenstoff (»Carbon«) jeweils sechs und wird deshalb auch bezeichnet als Kohlenstoff-12 oder kurz  $^{12}\text{C}$ .

**Alphateilchen:** Historische Bezeichnung für Partikel, die bei einer bestimmten Art des radioaktiven Zerfalls erzeugt werden. Dabei handelt es sich um einen Zusammenschluss von je zwei Protonen und Neutronen, also um Kerne von Heliumatomen ( $^4\text{He}$ ).

**MeV:** Abkürzung für Megaelektronenvolt (eine Million Elektronenvolt), eine in der Kern- und Elementarteilchenphysik gebräuchliche Energieeinheit.

**Ruheenergie:** Nach der Formel  $E = m \cdot c^2$  das Äquivalent zur Masse eines unbewegten Teilchens. Für ein Elektron beträgt diese 0,511 MeV, bei einem Proton 938,3 MeV, und etwas mehr im Fall eines Neutrons, nämlich 939,6 MeV.



**Der Elefantenrüssel** IC 1396 hebt sich unweit von Herschels Granatstern im Kepheus gegen die Milchstraße ab – verziert mit zahlreichen Sternen und einer rot leuchtenden Region aus ionisiertem Wasserstoff.

> eine höchst selbstbewusste Art, seinen Berechnungen zum Erfolg zu verhelfen, nur: Die Resonanz wurde daraufhin tatsächlich experimentell bestätigt, und zwar bei genau 7,65 MeV!

Aber was müssen wir uns darunter vorstellen? Dass manche Kernreaktionen bei gewissen Energien effektiver ablaufen, war zu Hoyles Zeit bereits hinlänglich bekannt. Man wusste: Für bestimmte Gesamtenergien der Reaktionspartner – Ruheenergie plus kinetische Energie – wird die Reaktionswahrscheinlichkeit (ausgedrückt durch den Wirkungsquerschnitt) besonders groß wird. Nämlich genau dann, wenn der resultierende Atomkern diese Energie in seiner inneren Struktur optimal »verteilen« kann, in Portionen von einer Größe, die die Quantenmechanik vorgibt. Besteht andererseits ein Energieüberschuss, wird der Kern förmlich zu einer weiteren Reaktion benötigt, mit anderen Worten: Er zerfällt.

Addieren wir die Ruheenergie dreier Alphateilchen und ziehen die des entstandenen Kohlenstoffkerns ab, bleibt

ein Überschuss von 7,275 MeV. Die durchschnittliche Bewegungsenergie der drei Heliumkerne liefert bei einer Temperatur von rund 250 Millionen Grad nochmals fast 0,1 MeV. Insgesamt liegen die energetischen Bedingungen für einen erfolgreichen Tripel-Alpha-Prozess im Innern von Roten Riesen also weniger als vier Prozent vom theoretischen Optimum – 7,65 MeV – entfernt.

Diese Form der Punktlandung ist es also, der wir allesamt unsere Existenz verdanken. Wäre nämlich die Resonanz lediglich um ein Prozent höher, brähe die Fusionsrate schon auf 1/33 des Ist-Werts ein. Deshalb bezeichnen wir Kohlenstoff als wahren Glückspilz!

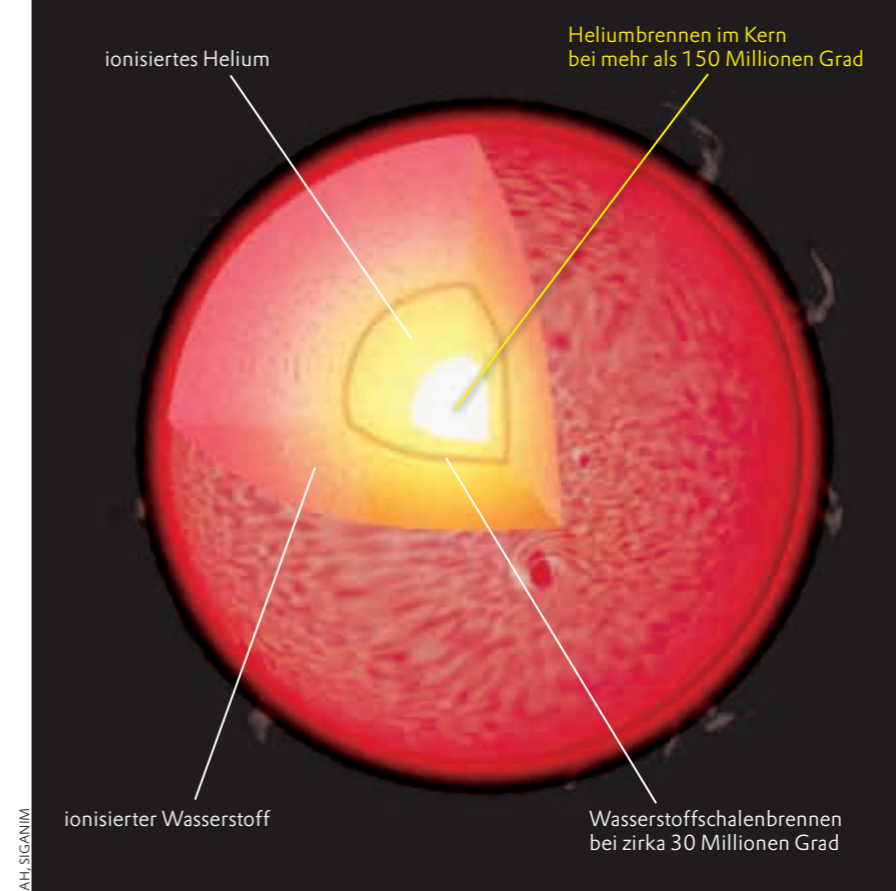
**»I will survive!«**

Aber damit nicht genug. In stellaren Fusionsprozessen wie beispielsweise der Reaktion von Helium-4 mit Kohlenstoff-12 zu Sauerstoff-16 plus einem Photon würde unser wertvolles Element größtenteils wieder vernichtet. Diese Reaktion verfügt ebenfalls über eine Resonanz, allerdings liegt sie knapp unterhalb der Differenz der Ruheenergien und kann deshalb durch Addition der Bewegungsenergie nicht erreicht werden. Auch andere »bedrohliche« Reaktionen, die Kohlenstoff zu Neon, Natrium oder Magnesium verarbeiten würden, leiden ebenfalls unter dem Fehlen einer passen-

den Resonanz, wodurch unser Protagonist alle weiteren stellaren Entwicklungen mit verhältnismäßig geringen Verlusten übersteht.

Doch der Kohlenstoff muss sein Glück noch mehr strapazieren, denn seine pure Existenz im Universum reicht noch nicht, solange dieser notwendige Lebensbaustein am Ende der Sternentwicklung lediglich in Form eines verdichteten Ascheklumpens vorliegt. Neben den Sternwinden sind es in erster Linie Supernovae, die den Kohlenstoff vor diesem äußerst langweiligen Schicksal bewahren. Der Ablauf einer Supernova steht nun wiederum auf sehr wackligen Beinen und weitere Glücksfälle müssen zusammentreffen, damit diese gewaltige Explosion stattfinden kann und Kohlenstoff – zusammen mit einer Reihe anderer schwerer Elemente – in das interstellare Medium hinausgeschleudert wird. Dort haben sie sich zu neuen Sternsystemen verdichtet – mit zumindest einem bislang bekannten – Leben tragenden Planeten.

Höchste Zeit, ein paar Vereinfachungen zu beichten: Mit der skizzierten Fusion von Beryllium-8 und Helium-4 erhalten wir genau genommen einen angeregten Zustand des Kohlenstoff-12, der im Anschluss noch durch Abgabe eines Lichtteilchens in den Grundzustand zerfallen muss. Tatsächlich beschreitet nur einer von zirka 2500 Kernen erfolgreich



**Rote-Riesen-Kohlenstoffmaschine** Ist in der Spätphase eines Sternlebens der ganze Wasserstoff im Kern zu Helium geworden, liegen dort Temperatur und Dichte vor, bei denen Kohlenstoff entstehen kann.

(CO<sub>2</sub>) problemlos auch einen gasförmigen Aggregatzustand annehmen. Silizium hingegen geht keine Doppelbindungen ein, die Folge sind Gitterstrukturen und somit in jedem Fall ein Festkörper. Zudem ist die Bindung von Kohlenstoff an Kohlenstoff im Vergleich zu Silizium an Silizium nahezu doppelt so stark. Das bedeutet, er hat bessere Voraussetzungen, lange und gleichzeitig stabile Molekülketten zu bilden. Die wiederum sind nötig für die Bildung intelligenter Lebewesen, schließlich haben wir gewaltige Datenmengen genetisch zu speichern.

Hat man sich erst einmal vergewöhnt, wie unabdingbar die Existenz von Kohlenstoff für die Entstehung von Leben einerseits ist und wie viele glückliche Umstände andererseits zur Entstehung dieses Element beitragen müssen, dann beginnt man das Universum und seine eigene Existenz mit völlig neuen Augen zu betrachten. Ein Universum ohne Kohlenstoff wäre auch ein Universum ohne uns. Demnach ist in Wirklichkeit nicht nur der Kohlenstoff der wahre Glückspilz sondern vielmehr wir alle – samt mit ihm! <<

diesen Weg, die anderen zerplatzen wieder in Heliumkerne. Das verringert zwar die Effizienz des Gesamtprozesses, unsere grundsätzliche Argumentation erleidet hierdurch allerdings keinen Schaden.

Schließlich stellt sich noch die Frage nach einer alternativen Kohlenstoffzeugung. Hier wäre beispielsweise Neutronenanlagerung bei Supernovae oder der Beschuss schwerer Kerne im interstellaren Medium durch hochenergetische Strahlung zu nennen. Kohlenstoff wäre jedoch, allein auf diesen Wegen entstanden, bestenfalls ein äußerst seltenes Element in unserem Universum – in jedem Fall zu selten für die Bildung von kohlenstoffbasiertem Leben.

Jetzt haben wir uns so viel Mühe gemacht mit der Entstehung von Kohlenstoff – hätte das Leben in unserem Uni-

versum nicht genauso gut auf Basis irgendeines anderen Elements entstehen können?

Intelligentes Leben ist eine komplexe Angelegenheit und Kohlenstoff mit seinen vier Valenzelektronen der klare Spitzenreiter unter allen denkbaren Kandidaten des Periodensystems, wenn es darum geht, komplexe Strukturen aufzubauen: Mit seiner Vierwertigkeit, das heißt, dem Vorhandensein von vier Elektronen, die als Andockstellen für Molekülbindungen zur Verfügung stehen, kann sonst nur noch Silizium mithalten. Doch damit nicht genug, Kohlenstoff hat weitere biologische Vorteile zu bieten – beispielsweise die Eigenschaft, Doppelbindungen einzugehen, wie etwa mit den zwei Valenzelektronen des Sauerstoffs. Dadurch kann es als Kohlendioxid

**»Englischer Hochadel der Astrophysik«**

**Sir Fred Hoyle (1915–2001, linkes Bild) und Sir Arthur Stanley Eddington (1882–1944, rechts)** trugen wesentlich zum Verständnis der Prozesse in Sternen bei.

*Wir haben an der Küste des Unbekannten einen seltsamen Fußabdruck gefunden. Wir haben tief sinnige Theorien aufgestellt, eine nach der anderen, das Wesen zu rekonstruieren, das den Abdruck hinterlassen hat. Und siehe da! – es ist unser eigener.*

(Arthur Eddington)



EDDINGTON: CORBIS; HOYLE: MIT FRDL. GEN. VON CHANDRA WICKRAMASINGHE, AUS: A JOURNEY WITH FRED HOYLE, 2005