

Greselius Gymnasium Bramsche

Ausarbeitung einer Facharbeit

Lehrkraft:Herrn Riemer

Die Entstehung der schweren Elemente im Universum

Jonas Volkmann, Jahrgang 12

Abgabetermin: 02.03.2026

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	3
2 Nukleosynthese wo kommen die Elemente her?.....	4
3 primordiale Nukleosynthese.....	4
4 Die Lebensdauer und Entstehung von Sternen.....	5
5 stellare Nukleosynthese.....	7
6 explosive Nukleosynthese.....	8
6.1 Der s-Prozess.....	8
6.2 Der r-Prozess.....	10
6.3 Der p-Prozess.....	12
6.3.1 Die Coulomb-Wall eines Atomkerns.....	13
6.3.2 Der quantenmechanische Tunneleffekt.....	13
6.4 Der v-Prozess.....	15
7 Können Menschen Elemente erschaffen?.....	15
8 Fazit.....	16
9 Literaturverzeichnis	17
9.1 Elektronische Quelle.....	17
9.2 Schriftliche Quellen.....	18
9.3 Bildliche Quellen.....	19

1 Einleitung

Das Universum ist riesig und es gibt unzählige Dinge, die in ihm zu finden sind und die es zu erforschen gibt, von denen wir vieles heutzutage immer noch nicht verstehen. Aber wie kann es dazu gekommen sein, dass es so eine Vielfalt an verschiedenen Elementen überall auf der Erde und in unserem Universum zu finden gibt und wie sind jene Elemente entstanden? Die Frage, wie die Erde entstanden ist, stellten sich schon die alten Griechen. Aber eine der ersten Personen, die auf die Idee kam, dass die „Natur“ sich mit der Zeit durch Anziehung und Abstoßung gebildet haben könnte, war der Philosoph Immanuel Kant, welcher in seinem Buch „Theorie des Himmels“ sagte: „die Natur ist sich selbst genugsam, die göttliche Regierung ist unnötig“. Diese Idee war der Anfang der Findung der Antwort darauf, wie die Erde wirklich entstanden ist. Und dann begann im Jahr 1920 die intensive Forschung daran, wie die Elemente entstanden sind.¹

Und genau das werde ich in dieser Facharbeit genauer ansprechen. Die Entstehung der schweren Elemente im Universum. Aber was ist denn überhaupt ein schweres Element? Hierzu gibt es zwei verschiedene Definitionen in der Physik:

¹ Lindner, K. (o. D.). *Theorie des Himmels – Geniestreich des jungen Kant* | Leipzig-Lese. Leipzig-Lese. <https://www.leipzig-lese.de/persoenlichkeiten/k/kant-immanuel/theorie-des-himmels-geniestreich-des-jungen-kant/>

1. Alle Elemente welche schwerer als Wasserstoff sind (bis Eisen)
2. Jedes Element schwerer als Eisen

Die beiden Gruppen unterscheiden sich in mehreren Weisen, aber der Hauptunterschied besteht darin, dass die erste Gruppe durch exotherme Fusionsreaktionen in Sternen, auch stellare Nukleosynthese genannt oder kurz nach dem Urknall, durch die primordiale Nukleosynthese, entstehen und entstanden sind. Während die zweite Gruppe hauptsächlich durch die explosive Nukleosynthese in Supernovae entsteht.

2 Nukleosynthese wo kommen die Elemente her?

Grundsätzlich sind die ersten zwei Elemente die entstanden sind Wasserstoff und Helium. Diese beiden Elemente sind direkt kurz nach dem Urknall entstanden und bilden den Grundbaustein für alle anderen Elemente. Der Fachbegriff für die Entstehung von Elementen aus anderen Elementen in Sternen ist Nukleosynthese. Nukleosynthese kommt von den Wörtern Nukleo, welches aus dem Lateinischen kommt und Kern heißt und dem Wort Synthese, welches altgriechisch ist und Aufbau heißt. Es gibt 3 Formen der Nukleosynthese. Es gibt die primordiale Nukleosynthese, die stellare Nukleosynthese und die explosive Nukleosynthese. Auf diese Formen werde ich nun genauer eingehen.

3 primordiale Nukleosynthese

Als Erstes kommt die Primordiale Nukleosynthese, welche direkt nach dem Urknall stattfand und bei ihr haben sich größtenteils Wasserstoff und Helium gebildet. Ungefähr 75 % der Elemente, die gebildet wurden waren Wasserstoff (H) und 25 % Helium ($\text{He}^4 + \text{He}^3$), wobei sich außerdem noch Spuren von Deuterium

(D oder H_2) und Lithium (Li) finden ließen. Diese Elemente entstanden durch die extreme Hitze und den großen Druck, die durch den Urknall verursacht wurden. Die Hitze und der Druck waren aber nicht stark genug um schwerere Elemente als Elemente mit der Massenzahl 4 zu erzeugen, weswegen nur diese Elemente entstanden und somit sind sie die ältesten Elemente in unserem Universum. Deshalb bilden sie dann auch den Grundsatz für alle schwereren Elemente, die wir kennen.²

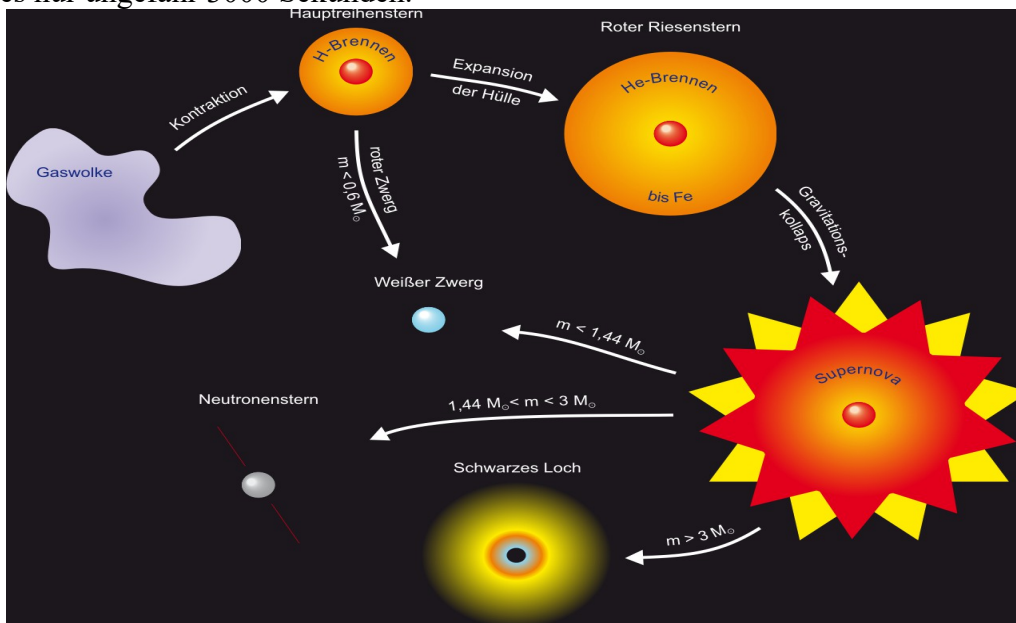
4 Die Lebensdauer und Entstehung von Sternen

Die zweite Form der Nukleosynthese ist die stellare Nukleosynthese. Wie man an dem Wort stellar schon erkennen kann steht sie mit Sternen wie unserer Sonne in Verbindung. Erst einmal muss man aber darauf eingehen, was Sterne überhaupt sind und wo sie herkommen. Sterne gibt es schon deutlich länger als es unsere Galaxie. Die ersten Sterne waren laut wissenschaftlichen Erkenntnissen mehrere Hunderte Male größer als unsere Sonne. Dadurch hatten sie aber auch eine kürzere Lebenszeit, da sie deutlich mehr Energie ausstrahlen. So strahlt ein Stern mit der zehnfachen Masse der Sonne mehr als das 3000-fache an Energie aus und brennt dadurch dann auch wesentlich schneller aus. Sterne die z. B. nur 1/10 der Sonnenmasse haben leben deutlich länger als die Sonne. Dies lässt sich mit der Formel: $D = M/L$

, berechnen wobei D die Lebensdauer, M die Masse und L die Leuchtkraft ist. Die Leuchtkraft ist aber ebenfalls von der Masse abhängig. Die Formel zu der Berechnung der Leuchtkraft lautet: $L = M^{3,5}$. Hierbei ist L wieder die Leuchtkraft und M ist die Masse. Somit würde ein Stern mit der 6-fachen Masse der Sonne ungefähr 529-mal so hell strahlen wie sie, aber hätte nur ungefähr 6/529 oder 1,13 % der Lebensdauer. Nun zurück zu der Frage wie Sterne entstehen. Sterne bilden sich in den Staubwolken, die es überall im Universum

2 Wehmeier, N. & Westfälische Wilhelms-Universität Münster (2008). Primordiale nukleosynthese. In *Seminar Zur Theorie der Teilchen und Felder*. <https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/archive/fileadmin/lehre/teilchen/ws0809/Nukleosynthese.pdf> Seite 3 (01.03.2026)

gibt. Obwohl jene Wolken nur ungefähr 2% unseres Universums bedecken, beinhalten sie ungefähr die Hälfte aller vorhandenen Atome im Universum. Damit aber überhaupt ein Stern entstehen kann braucht es eine große Kraft, die viele Atome zueinander zieht, welcher in Staubwolken gar nicht unter normalen Umständen vorkommen könnte, da der thermische Druck, der magnetische Druck und der Drehimpuls der Wolke gegen sie wirken. Die Kraft ist die Gravitationskraft, welche die Atome zusammenziehen soll. Doch durch viele verschiedene Prozesse die im Lauf der Zeit ablaufen werden die 3 Faktoren, die gegen die Gravitationskraft wirken soweit abgeschwächt, dass es ihr gelingt die vielen Atome und Moleküle in der Wolke zusammenzuziehen und es entsteht ein Stern. Die Länge dieses Prozesses ist dann abhängig von der Größe der Wolke, würde eine Wolke von der Größe unserer Sonne in sich zusammenfallen, bräuchte es nur ungefähr 3000 Sekunden.³



In dieser Abbildung wird der gesamte Lebenslauf eines Sterns noch einmal veranschaulicht. Sie beginnen als Gaswolke bis sie dann bei der Kontraktion zu einem Stern werden. In dem Stern kommt es dann zu Fusionen von Wasserstoff zu Helium, was auch Wasserstoffbrennen genannt wird und wenn dieser Vorgang schlussendlich aussetzt wird der Stern ,abhängig von der Masse seines Kerns entweder zu einem Weißen Zwerg oder einem Roten Riesen. Ein Roter Riese entsteht, weil der Kern sich unter seinem eigenen Gewicht zusammenzieht, aber seine Außenschichten durch Fusionsreaktionen aufgebläht werden. Wenn der Kern

³ Lesch, Harald, Müller, Jörn, Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt, GOLDMANN Verlag 14.03.2011 S. 86-109

eines Roten Riesen dann komplett aus Eisen besteht bricht er schließlich zusammen und es kommt zu einer Supernova-Explosion. Nach der Explosion wird der Stern wieder abhängig davon wie massenreich sein Kern war zu einem Weißen Zwerg, Neutronenstern oder zu einem Schwarzen Loch.⁴

5 stellare Nukleosynthese

Nach der Entstehung einer Sonne beginnt nun der Prozess der stellaren Nukleosynthese. In diesem Prozess entstehen die Elemente von Helium bis Eisen. Welche Elemente entstehen können ist abhängig von der Masse des Sterns und dem daraus resultierenden Druck und der Hitze. Unsere Sonne kann zum Beispiel während ihrer Lebenszeit nur Helium herstellen. Der Vorgang der Nukleosynthese ist außerdem der Grund für das Licht und die Wärme, die von Sternen ausgehen. Die Fusionen der verschiedenen Elementen zu neuen Elementen sind bei der stellaren Nukleosynthese exotherm. Es wird bei den Reaktionen also Energie freigesetzt. Die Reaktion wird begünstigt weil das entstehende Fusionsprodukt bzw. das neue Element energieärmer ist als die beiden Fusionspartner (Edukte). Dieser Prozess findet bis zum Element Eisen statt. Alle schwereren Elemente unterliegen einem endothermen Fusionsprozess und sind durch die stellare Nukleosynthese nicht herstellbar. Weil alle Elemente schwerer als Eisen nicht mehr in exothermen Reaktionen entstehen, sondern in endothermen Reaktionen und somit nicht mehr energetisch günstiger sind. Bei der Stellaren Nukleosynthese entstehen aus leichteren Elementen schwerere Elemente indem zwei Elemente miteinander fusionieren, wie zum Beispiel zwei Wasserstoffatome die fusionieren um ein Heliumatom zu erzeugen. Als Nebenprodukt bei diesen Reaktionen entstehen dann auch noch Energie und verschiedene Arten von radioaktiver Strahlung, wie Gammastrahlung oder Betastrahlung.⁵

4 *Astronomie.* (o. D.). <https://marvin.sn.schule.de/~erzkoll/projekte/astro1/sterne.html>
Bild+Informationen(01.03.2026)

5 TU Dresden entdecken. (2022, 5. Oktober). *Wie sind die Elemente entstanden? | Kurze Frage an Teilchenphysiker Dominik Koll* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=fSLxuimBweg>

6 explosive Nukleosynthese

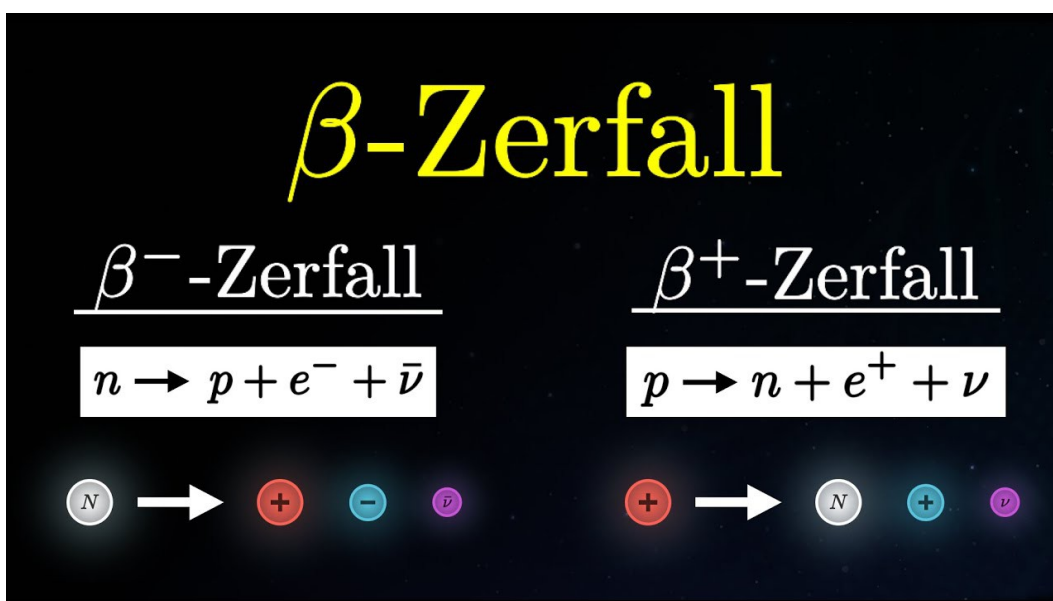
Um Elemente einer höheren Ordnungszahl als Eisen herzustellen bedarf es härteren Bedingungen als die stellare Nukleosynthese sie aufweist. Diese Bedingungen werden bei der explosiven Nukleosynthese erreicht. Wenn ein Stern einen Großteil der Atome fusioniert bzw. seinen „Brennstoff“ aufgebraucht hat dehnt er sich stark aus. Sinkt der Fusionsdruck noch weiter ab „fällt“ aufgrund der Gravitation die äußere Hülle des Sterns in den Kern. Es kommt zur Explosion. Diese Explosion ist die 3. Form der Nukleosynthese, die explosive Nukleosynthese oder auch Supernova genannt. Bei einer Supernova werden die Bedingungen erreicht, die nötig sind um Elemente herzustellen, die schwerer als Eisen sind. Die explosive Nukleosynthese kann in mehrere Prozesse unterteilt werden: Den r-,s-,v-,p- und rp-Prozess. Je nach Prozess werden unterschiedliche Elemente hergestellt. Die Prozesse laufen in unterschiedlichen Phasen der explosiven Nukleosynthese ab. Welcher Prozess stattfindet ist abhängig von den vorherrschenden Bedingungen (Druck, Temperatur, Reaktionsgeschwindigkeit).⁶

6.1 Der s-Prozess

Beim s-Prozess oder slow-Prozess, der hauptsächlich in den Helium brennenden Schichten eines Roten Riesens zu finden ist, verschmilzt im Normalfall zum Anfang ein Heliumkern mit Neon, welches vorher in durch die stellare Nukleosynthese entstanden ist und leitet damit den Start des Prozesses ein. Durch die Verschmelzung werden rund 100 Millionen Protonen auf einen Kubikzentimeter zusammengedrängt. Zusammen mit der Temperatur von ca. 300 Millionen Kelvin braucht es ein ein Jahr bis ein stabiler Saatkern ein Neutron fängt. Ein Saatkern ist hierbei ein Kern, in diesem Fall Helium, der sich mit dem

⁶ Lesch, Harald, Müller, Jörn, Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt, GOLDMANN Verlag 14.03.2011 S.194-200 1990APJ. . . 356..272W page 272(o. D.). <https://adsabs.harvard.edu/full/1990ApJ...356..272W#~:text=SAO/NASA%20ADS%20Astronomy%20Abstract,in%20nature%20to%20this%20process>. (01.03.2026)

Neutron verbindet. Durch die Aufnahme des Neutrons wandelt sich der Atomkern dann in ein instabiles Isotop um. Die lange Dauer des Prozesses gibt ihm seinen Namen (slow) Er ist der langsamste der Prozesse. Prinzipiell würde dieser Prozess so weiterlaufen. Allerdings gibt es einen konkurrierenden Vorgang, der den Prozess unterbricht. Dieser Vorgang ist der sogenannte Betazerfall. Der Betazerfall passiert nach der sogenannten Halbwertszeit, welche die Zeit beschreibt die es Braucht bis die Hälfte der Atomkerne des Isotops durch Aussendung von Protonen oder Elektronen zerfallen sind. Diese Halbwertszeit beträgt, im Vergleich zu der Zeit die der Saatkern benötigt um ein weiteres Neutron aufzufangen, nur ein paar Tage, weswegen sie viel früher eintritt, als das ein neues Proton aufgenommen werden könnte. Und nachdem die Halbwertszeit erreicht ist erfolgt nun der Betazerfall. Beim Betazerfall wird ein Neutron in ein Proton und ein Elektron aufgetrennt. Dies passiert, weil der Atomkern durch das zusätzlich Neutron instabil geworden ist und sich selbst wieder ausgleichen möchte. Das Neutron, welches hierfür verwendet wird, stammt aus dem Kern des Atoms und es wird in 3 Teile aufgeteilt. Zwei Teil davon sind ein Proton und ein Elektron, aber man hat später herausgefunden, dass die Energie die aus dem Neutron entsteht größer ist, als die Energie von Proton und Elektron und somit ist man darauf gekommen, dass es ein drittes Teilchen geben muss. Dieses Teilchen ist das sogenannte Antineutrino. Das Antineutrino verkörpert die zusätzliche Energie und sorgt dafür, dass der Drehimpuls des Atomkerns erhalten bleibt.



In dieser Abbildung wird der Betazerfall nochmal dargestellt. Es gibt ihn außerdem in 2 Formen. Die eine ist der normale Betazerfall und der andere ist der Beta-Plus-Zerfall, welcher wichtig für den p-Prozess ist. Der Betazerfall verändert den Atomkern grundlegend denn, nachdem das Elektron und Antineutrino abgegeben wurden bleibt der Atomkern mit einem zusätzlichen Proton zurück, welches dafür sorgt, dass die Ordnungszahl des Atomkerns um eins nach oben geht. Die Ordnungszahl symbolisiert die Anzahl und Protonen in einem Atomkern und gibt an um welches Element es sich handelt. Dadurch, dass sich die Ordnungszahl um eins erhöht hat ist aus dem Atomkern also ein neues Element geworden. So wird Helium mit einer Ordnungszahl von zwei zu Lithium mit einer Ordnungszahl von drei. Dieser Prozess findet dann immer wieder statt bis der Rote Riese zu einer Supernovae wird und explodiert oder bis das Element Wismut mit der Ordnungszahl 83 erreicht ist, weil sich der Atomkern dann zu Helium und einem Element mit einer niedrigeren Ordnungszahl als Wismut aufteilen würde. Dieser Vorgang, wo ein Heliumteilchen abgespalten wird, wird auch Alphazerfall genannt.⁸

6.2 Der r-Prozess

Der r-Prozess oder auch rapid-Prozess ist ein weiterer Prozess bei dem schwere Elemente entstehen. Er ist sehr ähnlich wie der s-Prozess, weil bei ihm auch Neutronen von Atomkernen aufgenommen werden und sich der Atomkern infolge dessen mithilfe des Betazerfalls verändert. Doch dieser Prozess läuft wesentlich schneller an als der s-Prozess, weswegen er auch rapid-Prozess heißt. Der rapid-Prozess dauert nicht mal mehrere Sekunden. Neutronen werden also wesentlich schneller vom Atomkern aufgenommen. Dies liegt an den Prozessbedingungen. Der rapid-Prozess findet hinter der Schockwelle der Supernova des Typs 2 statt. Einer Supernovae des Typs 2. Supernovae Explosionen werden in mehrere Typen unterteilt. Eine Supernovae vom Typ 2 kommt vor, wenn es sich um einen massenhaften Stern mit 8 oder mehr Sonnenmassen handelt. Außerdem besteht

7

Think Logic.(2022,22. Dezember).Beta Zerfall einfach erklärt Radioaktivität, Betastrahlung (Physik) [Video]. YouTube.<https://www.youtube.com/watch?v=zdIMFuaynxw>

8 Lesch, Harald, Müller, Jörn, Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt, GOLDMANN Verlag 14.03.2011 S.194-196

die Außenhülle des vorhandenen Sterns immer noch zu einem großen Anteil aus Wasserstoff, obwohl der Kern des Sterns schon in Eisen umgewandelt ist. Im Gegensatz dazu sind bei Supernovae Explosionen des Typ I keine Wasserstofflinien auffindbar. Wenn eine Supernova-Explosion des Typen II abläuft kann in folge dieser Explosion ein Schwarzes Loch oder ein Neutronenstern entstehen. Bei der Supernovae Explosion vom Typ zwei werden dann die Bedingungen für den Prozess erfüllt. Bei ihnen handelt es sich um eine Elektronendichte von 10^{20-23} Protonen und einer Hitze von 2 Milliarden Kelvin. Diese Bedingungen sind direkt hinter der Schockwelle der Explosion gegeben und sie kürzen den Prozess ein Neutron aufzunehmen um einiges herunter. Nun dauert es nämlich nur noch ein paar Millisekunden bis ein Atomkern ein Neutron aufnehmen kann und so liegt diese Zeit weit unter der Halbwertszeit. Deshalb kann der Atomkern in kurzer Zeit immer mehr Neutronen aufnehmen, wodurch er aber auch immer instabiler wird. Ab einer bestimmten Anzahl an Neutronen können Atomkerne keine weiteren Neutronen mehr aufnehmen und für jedes neue Neutron, welches dazu kommt wird ein anderes wieder abgegeben. So entsteht über Zeit ein Gleichgewicht zwischen Annahme und Abgabe von Neutronen. In diesem Zustand kann ein Atomkern bis zu 20 Neutronen aufgenommen haben und wenn der Neutronenfluss schlussendlich versiegt folgt eine Reihe von aufeinanderfolgenden Betazerfällen bis der Atomkern wieder stabil ist. Durch diesen Prozess entstehen viele der sehr schweren Elemente wie Uran oder Thorium. Aber nicht alle uns bekannten Elemente entstehen durch den s- oder r-Prozess. Deshalb gibt es noch weitere Prozesse. Einer dieser Prozesse ist der p-Prozess.⁹

9 Lesch, Harald, Müller, Jörn, Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt, GOLDMANN Verlag 14.03.2011 S.196-198

Jørgensen, A. (o. D.). Supernovae – großes Finale und Neuanfang. In *Sterne und Weltraum* [Journal-article].
[https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/Zentrales%20WIS-Dokument%20-%20MS_OS%20-%2012_2023.8056170.pdf#:~:text=Aber%20wieso%20%C3%BCberhaupt%20Typ%20II?%20Diese%20Bezeichnung.Der%20Stern%20hat%20zwar%20seinen%20Kern%20in\(01.03.2026\)](https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/Zentrales%20WIS-Dokument%20-%20MS_OS%20-%2012_2023.8056170.pdf#:~:text=Aber%20wieso%20%C3%BCberhaupt%20Typ%20II?%20Diese%20Bezeichnung.Der%20Stern%20hat%20zwar%20seinen%20Kern%20in(01.03.2026))

6.3 Der p-Prozess

Der p-Prozess oder auch Gamma-Prozess ist der Prozess bei dem 32 weitere Elemente entstehen, die auch p-Kerne genannt werden. Zu diesen Elementen gehören z.B. Ruthenium oder auch Quecksilber. Er gleicht dem r-Prozess, weil er ebenfalls direkt hinter der Schockwelle einer Supernovae Explosion des Typs 2 abläuft, da er eine Temperatur von mehreren Milliarden Kelvin benötigt. Aber er ist deutlich seltener als die vorherigen Prozesse. Der entscheidende Unterschied zum r-Prozess besteht darin, dass beim p-Prozess Protonen aufgenommen werden und keine Neutronen. Dies kann dank den hohen Temperaturen geschehen, weil bei ihnen manche Protonen sehr hohe kinetische Energie haben und es ihnen so entweder gelingt die Coulomb-Wall zu dringen, welche verhindern würde, dass sie durchkommen oder durch den quantenmechanischen Tunneleffekt durch jene Wand hin durchschlüpfen können. Aber wie verändert sich ein Atomkern wenn er nur Protonen aufnimmt und keine Neutronen aufnimmt. Durch die Aufnahme von Protonen wird der Atomkern ebenfalls immer instabiler. Dies passiert besonders beim rp-Prozess oder auch rapid-proton-capture-process, bei dem Protonen noch schneller als normal aufgenommen werden. Um wieder stabil zu werden kommt es dann wieder zu einem Zerfall, aber dieser Zerfall ist etwas anders als der Betazerfall, da nur positive Energie aufgenommen wird und keine negative. Was passiert ist der sogenannte Beta-Plus-Zerfall (siehe Abbildung Seite 10). Diese Art des Zerfalls ähnelt dem Betazerfall sehr stark, der unterschied ist nur, dass aus dem Edukt dem Proton als Produkt ein Neutron, Positron und ein Elektron-Neutrino entstehen. Ein Positron ist die positive Form des Elektrons. So bleibt dann die Massenzahl des Kerns erhalten, aber die Ordnungszahl sinkt um eins. Aber es ist beim p-Prozess nicht zwingend nötig, dass es zum Beta-Plus-Zerfall kommt, da auch protonenreiche stabile Isotope entstehen. Und so entstehen dann die Elemente die sehr protonenreich sind wie Quecksilber oder Ruthenium.¹⁰

¹⁰ Lesch, Harald, Müller, Jörn, Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt, GOLDMANN Verlag 14.03.2011 S.198
Think Logic.(2022,22. Dezember).Beta Zerfall einfach erklärt Radioaktivität, Betastrahlung (Physik) [Video].
YouTube.<https://www.youtube.com/watch?v=zdIMFuaynxw>

6.3.1 Die Coulomb-Wall eines Atomkerns

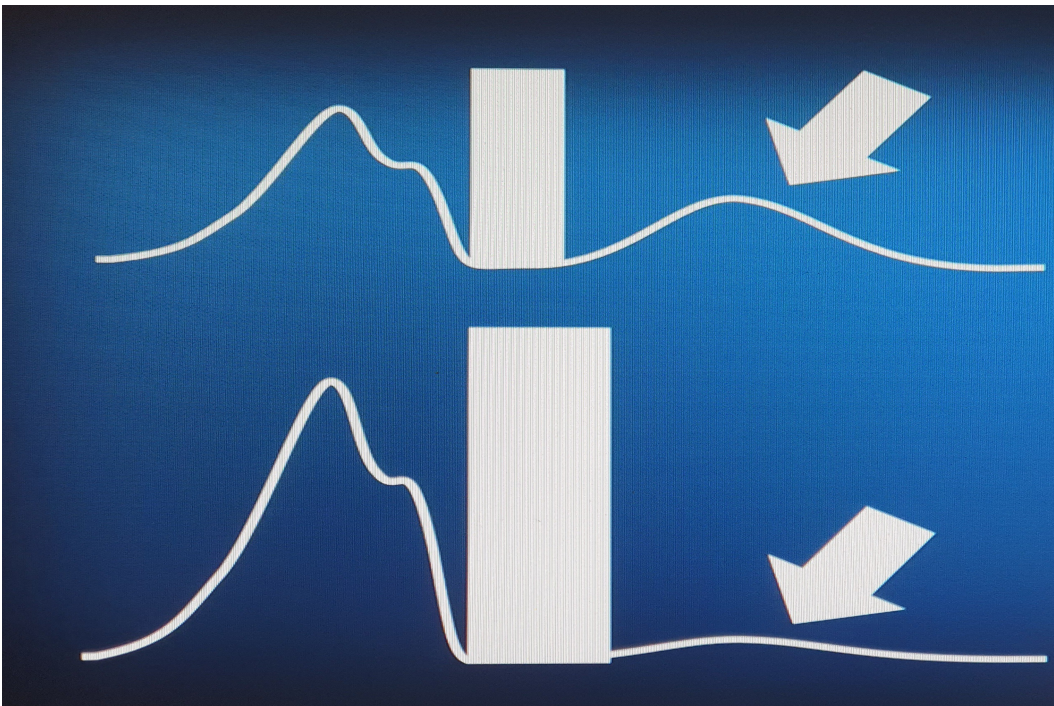
Die Coulomb-Wall ist das abstoßende Potenzial, welches verhindert, dass ein positiv geladenes Teilchen, wie ein Proton, in einen schon positiv geladenen Atomkern eindringen kann. Aus dem Physikunterricht kennt man schon, dass sich gleich geladene Gegenstände abstoßen. So benötigt man eine gewisse Kraft, um zwei gleich geladene Metallstücke aufeinander zu bewegen. Die Kraft steigt, je näher die Metallstücke sich kommen. Aber woher kommt diese Kraft? Diese Kraft ist auch als Coulombkraft bekannt und sie ist ebenfalls dafür verantwortlich, dass zwei Elemente nicht einfach so, bei niedrigen Temperaturen fusionieren können. Sie steht im Gegensatz mit der Kernkraft, weil die Kernkraft dafür sorgt, dass Protonen oder andere gleich geladene Teilchen die sich sehr nahe stehen nicht voneinander abgestoßen werden, sondern sich anziehen. Ob sich zwei gleich geladene Teilchen voneinander abstoßen ist also abhängig davon wie nahe sie sich stehen, weil dies entscheidet ob die Coulombkraft oder die Kernkraft stärker ist. So entsteht auch die große Menge an Energie bei einer Kernspaltung, weil sich die Protonen in einem Kern ab einer bestimmten Distanz voneinander abstoßen und da sie sich so nahe sind ist die Coulombkraft entsprechend groß und so die kinetische Energie, die die Protonen aus dem Kern erreichen. So lässt sich dann auch erklären wie es beim p-Prozess gelingen kann das Protonen, die eigentlich abgestoßen werden würden, aufgenommen werden können. Sie haben nämlich durch die hohe Hitze nach der Supernovae genug Energie bekommen um stärker zu sein als die Coulomb Kraft und nachdem sie nahe genug gekommen sind werden sie nicht mehr abgestoßen, sondern durch die Kernkraft von anderen Protonen angezogen.¹¹

6.3.2 Der quantenmechanische Tunneleffekt

Der quantenmechanische Tunneleffekt beschreibt wie ein sehr kleines Teilchen eine Barriere durchdringen kann, obwohl es eigentlich nicht genug Energie dafür hat. Dieser Effekt wurde mithilfe von Forschungsergebnissen von Louis de Broglie entdeckt. De Broglie fand heraus, dass allen Teilchen auch

¹¹ GbR, G. H. I. D. M. L. A. (o. D.). *Coulombwall (Kernphysik)*. <https://www.rhetos.de/html/lex/coulombwall.htm>

Welleneigenschaften zugeordnet werden können. Mit Hilfe dieser Information lässt sich die Wahrscheinlichkeitsdichte Ψ^2 , welche die Wahrscheinlichkeit ein Teilchen an einer bestimmten Stelle anzutreffen angibt bestimmen. Über diese Wahrscheinlichkeitsdichte lässt sich nun herausfinden, dass es eine kleine Wahrscheinlichkeit gibt, dass ein Teilchen durch besagte Barriere hindurchdringt. Die Wahrscheinlichkeit ist abhängig von der Barriere und vom Teilchen welches durch besagte Barriere hindurch möchte. Desto größer die Barriere desto unwahrscheinlicher ist es, dass ein Teilchen durchkommt. Doch die Wahrscheinlichkeit ist egal wie groß das besagte Objekt ist niemals 0. So könnte man theoretisch einfach so durch eine Wand laufen. Die Wahrscheinlichkeit das es klappt ist nur so gering, dass es noch keinem Menschen passiert ist.



In dieser Darstellung lässt sich nochmal genauer erkennen in welcher Form die Größe und Breite der Barriere die Wahrscheinlichkeit des Durchdringens beeinflusst. Man kann erkennen dass die Kurve bei der größeren Barriere deutlich flacher, als bei der kleineren ist, was zeigt dass die Wahrscheinlichkeit ebenfalls sinkt. Auf diese Art und Weise schaffen es Protonen kurz nach einer Supernova in

Atomkerne einzudringen obwohl sie zu wenig kinetische Energie besitzen um die Coulomb-Wall zu überwinden. Dank dem quantenmechanischen Tunneleffekt können sie einfach durch die Coulomb-Wall hindurchdringen und so in den Atomkern gelangen, wo sie dann von der Kernenergie festgehalten werden. Aber der quantenmechanische Tunneleffekt kann auch in die entgegengesetzte Richtung wirken. Schwere Kerne senden von Zeit zu Zeit Heliumkerne oder Alphateilchen aus. Man spricht auch vom Alpha-Zerfall. Diese Art des Zerfalls kann nicht ohne den Tunneleffekt stattfinden und die Zeit des Zerfalls variiert bei verschiedenen Atomkernen. Sie hängt mit der Breite der Potenzialbarriere der verschiedenen Atomkerne zusammen, da dadurch die Wahrscheinlichkeit des Tunneleffekts beeinflusst wird.¹²

6.4 Der v-Prozess

Der v-Prozess ist der vierte Prozess der explosiven Nukleosynthese. Im Gegensatz zu den anderen Formen ist dieser Prozess bisher nur eine Theorie. Falls er existiert, würde er viele Fragen beantworten, die sich mit anderen Prozesse nicht erklären lassen. Diese Form der Nukleosynthese soll mit Neutrinos in Verbindung stehen, die die Kerne in den verschiedenen Schalen eines Roten Riesen beeinflussen und so die Reaktion beeinflussen. Bisher ist aber noch nicht viel über den Prozess bekannt.¹³

7 Können Menschen Elemente erschaffen?

Wenn man anfängt über die Entstehung von Elementen und ihre Veränderungen nachzudenken kommt man irgendwann zu der Frage, ob Menschen auch in der Lage sind Elemente zu erzeugen? Und die Antwort auf diese Frage ist ja.

12 Apolins Physik-Universum. (2023, 9. April). *Quantenmechanik 12: Tunneleffekt* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QOUc102ZLNl>

13 *1990APJ...356..272W page 272*(o. D.). <https://adsabs.harvard.edu/full/1990ApJ...356..272W#:~:text=SAO/NASA%20ADS%20Astronomy%20Abstract,in%20nature%20to%20this%20process.> (01.03.2026)

Menschen sind in der Lage aus Elementen neue Elemente zu erschaffen. Die Menge der neu entstandenen Elemente ist nur so gering, dass sie unser alltägliches Leben nicht beeinflusst und viele der entstandenen Elemente zerfallen sehr schnell. Die Art und Weise, wie Menschen neue Elemente entstehen lassen, ist in einem Teilchenbeschleuniger. In ihn werden Atomkerne hineingepackt und dann immer weiter beschleunigt, bis man den Atomkern auf einen anderen Atomkern draufschießen lässt und die beiden Kerne, durch die hohe kinetische Energie, fusionieren. So entstehen dann neue Elemente, doch fast alle dieser so entstandenen Elemente, die auch synthetische Elemente genannt werden, sind sehr radioaktiv und instabil, sodass die meisten nicht mal mehrere Sekunden existieren, bevor ihre Halbwertszeit um ist und sie wieder zerfallen. Aus diesem Grund ist bei allen Teilchenbeschleunigern eine dicke Betonmauer drum herum, sodass die entstehende Strahlung beim Zerfall keine Menschen treffen kann. Die wirklich gefährliche Strahlung hierbei ist Gammastrahlung. Sie dringt am einfachsten durch Gegenstände durch und man benötigt deshalb eine dicke Betonwand. Alphastrahlung hingegen kommt nicht mal durch Papier und Betastrahlung lässt sich durch Aluminium aufhalten.

8 Fazit

Abschließend lässt sich sagen, dass es viele verschiedene Wege gibt, wie die Elemente im Universum entstanden sind und sich über die Zeit verändert haben. Die ersten Elemente entstanden schon mehrere Minuten, nachdem das Universum überhaupt entstanden ist und mit der Zeit haben sich mithilfe der verschiedenen Formen der Nukleosynthese immer mehr Elemente mit verschiedenen Eigenschaften gebildet. Die größte Rolle bei der Entstehung der schweren Elemente spielten und spielen immer noch die Sterne, die mindestens acht Sonnenmassen besitzen und somit beim Sterben zu einer Supernovae vom Typ II werden können und so die enorme Hitze und die große Dichte durch Druck erzeugen zu können, um die vielen schweren Elemente erzeugen zu können, die wir heutzutage im Universum finden können. Direkt hinter der Schockwelle

erfolgen dann der r -, p - und rp -Prozess wodurch viele Atomkerne komplett verändert werden und sie sich dann von radioaktiven und instabilen Isotopen, mithilfe des Beta-Zerfalls oder des Beta-Plus-Zerfall, zu wieder stabilen entweder schwereren oder leichteren Atomkernen umwandeln. Diese Prozesse der Nukleosynthese, die in Sternen oder in Supernovae ablaufen, sind so wichtig für unser Leben, da es uns ohne sie erstmal gar nicht gäbe und wir auf der Erde ohne die Prozesse die in der Sonne ablaufen gar nicht überleben könnten. Doch es gibt noch vieles über die Entstehung von schweren Elementen und generell über die Elemente herauszufinden, wie ob es den v -Prozess wirklich gibt und die Forschungen der Wissenschaft mithilfe des Teilchenbeschleunigers oder auf andere Wege sind noch lange nicht abgeschlossen. Im Ganzen lässt sich also sagen, dass obwohl wir schon so viel herausgefunden haben, wir nur einen Bruchteil der Geheimnisse um die schweren Elemente kennen und die Forschung noch lange nicht zu Ende ist.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Elektronische Quelle

1. *Astronomie*(o. D.). <https://marvin.sn.schule.de/~erzkoll/projekte/astro1/sterne.html> Bild+Informationen Stand: 01.03.2026
2. Apolins Physik-Universum. (2023, 9. April). *Quantenmechanik 12: Tunneleffekt* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QOUc102ZLNI>
3. GbR, G. H. I. D. M. L. A. (o. D.). *Coulombwall (Kernphysik)*. <https://www.rhetos.de/html/lex/coulombwall.htm> Stand:01.03.2026

4. Lindner, K. (o. D.). *Theorie des Himmels – Geniestreich des jungen Kant* | Leipzig-Lese. Leipzig-Lese. <https://www.leipzig-lese.de/persoentlichkeiten/k/kant-immanuel/theorie-des-himmels-geniestreich-des-jungen-kant/> Stand: 01.03.2026
5. Jørgensen, A. (o. D.). Supernovae – großes Finale und Neuanfang. In *Sterne und Weltraum* [Journal-article]. [https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/Zentrales%20WIS-Dokument%20-%20MS_OS%20-%2012_2023.8056170.pdf#:~:text=Aber%20wieso%20%C3%BCberhaupt%20Typ%20II?%20Diese%20Bezeichnung,Der%20Stern%20hat%20zwar%20seinen%20Kern%20in\(01.03.2026\)](https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/Zentrales%20WIS-Dokument%20-%20MS_OS%20-%2012_2023.8056170.pdf#:~:text=Aber%20wieso%20%C3%BCberhaupt%20Typ%20II?%20Diese%20Bezeichnung,Der%20Stern%20hat%20zwar%20seinen%20Kern%20in(01.03.2026)) Stand: 01.03.2026
6. Think Logic.(2022,22. Dezember).*Beta Zerfall einfach erklärt Radioaktivität, Betastrahlung (Physik)* [Video]. YouTube.<https://www.youtube.com/watch?v=zdlMFuaynxw>
7. Wehmeier, N. & Westfälische Wilhelms-Universität Münster (2008).Primordiale nukleosynthese. In *Seminar Zur Theorie der Teilchen und Felder*. <https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/archive/fileadmin/lehre/teilchen/ws0809/Nukleosynthese.pdf> Seite 3 Stand: 01.03.2026
8. *1990APJ. . .356..272W page 272*(o. D.). <https://adsabs.harvard.edu/full/1990ApJ...356..272W#:~:text=SAO/NASA%20ADS%20Astronomy%20Abstract,in%20nature%20to%20this%20process.> Stand :01.03.2026

9.2 Schriftliche Quellen

1. Lesch, Harald, Müller, Jörn, Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt, GOLDMANN Verlag 14.03.2011 S. 86-109
2. Lesch, Harald, Müller, Jörn, Sterne. Wie das Licht in die Welt kommt, GOLDMANN Verlag 14.03.2011 S. 194-200

9.3 Bildliche Quellen

1. *Astronomie* (o. D.). <https://marvin.sn.schule.de/~erzkoll/projekte/astro1/sterne.html> Stand: 01.03.2026
2. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=zdIMFuaynxw>
3. Apolins Physik-Universum. (2023, 9. April). *Quantenmechanik 12: Tunneleffekt* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QOUc102ZLNI>

Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers