

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für  
das Lehramt an Gymnasien im Fach Physik, eingereicht dem  
Landesschulamt - Prüfungsstelle Frankfurt am Main - .

# Didaktische Rekonstruktion der Nukleosynthese schwerer Elemente

Verfasser: Albert Teichrew  
Niddagastr. 5  
60489 Frankfurt am Main

Gutachter: Prof. Dr. Roger Erb  
Institut für Didaktik der Physik  
Max-von-Laue-Str. 1  
60438 Frankfurt am Main

Abgabedatum: 14.12.2015

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Motivation .....	2
2.1	Gegenwartsbedeutung .....	2
2.2	Zukunftsbedeutung.....	3
2.3	Exemplarische Bedeutung .....	3
3	Forschungsumfeld .....	4
3.1	Unterrichtsvorschläge .....	4
3.1.1	WIS-Beitrag .....	5
3.1.2	Marble Nuclei Project.....	7
3.2	Schulbücher .....	8
3.3	Schülervorstellungen und Interessen.....	10
3.3.1	Radioaktivität, Strahlung und Zerfall .....	11
3.3.2	Atomvorstellungen .....	13
3.3.3	Interessen .....	14
4	Vorgehensweise .....	15
4.1	Didaktische Rekonstruktion.....	16
4.2	Kontextstrukturierung.....	17
5	Sachstruktur .....	19
5.1	Begriffsentwicklung .....	21
5.2	Primordiale Nukleosynthese .....	22
5.3	Stellare Brennphasen.....	25
5.3.1	Wasserstoffbrennen .....	28
5.3.2	Heliumbrennen.....	29
5.3.3	Bindungsenergie pro Nukleon.....	30
5.3.4	Statistisches Gleichgewicht.....	31
5.4	Neutroneneinfang .....	32
5.4.1	s-Prozess .....	34
5.4.2	r-Prozess.....	35
6	Befragung .....	37
6.1	Fragebogen.....	37
6.2	Ergebnisse .....	39
6.2.1	Atom- und Kerndarstellungen.....	39
6.2.2	Grundvorstellungen .....	44
6.2.3	Interessen .....	49
6.2.4	Inhaltliche Aussagen.....	51

---

7	Didaktische Strukturierung.....	52
7.1	Leitlinien.....	52
7.2	Unterrichtselemente.....	56
7.2.1	Kurzfilm.....	56
7.2.2	Lernspiel.....	58
7.2.3	Modellierung.....	60
8	Unterrichtsversuch.....	64
8.1	Vorbereitung.....	65
8.2	Versuchsmaterial.....	66
8.3	Ergebnisse.....	68
9	Zusammenfassung.....	73
10	Literaturverzeichnis.....	75
	Anhang.....	80
1	Fragebogen.....	80
2	Spielfeld.....	82
3	Bausteine.....	83
4	Unterstützung der Planungsphase.....	83
5	Skript.....	84
1.	Woher weiß man das alles so genau?.....	84
2.	Was macht die Elemente so interessant?.....	84
3.	Woher kommt die Energie für den Brennprozess?.....	86
4.	Wieso hört die Fusion bei Eisen auf?.....	87
5.	Wie entstehen schwerere Elemente?.....	88
6.	Wie viele Neutronen können eingefangen werden?.....	90
6	Überblick über die Entstehungsprozesse.....	92
7	Relative Häufigkeiten.....	92
8	Lebensdauer von Sternen.....	93
9	Kosmischer Materiekreislauf.....	93
10	Fragen zum Film.....	96
11	Feedback.....	99
12	Schülerergebnisse und Aufgabe 1.....	100
13	Nuklidkarte und Aufgabe 2.....	100

# 1 Einleitung

Nukleosynthese bezeichnet einen Vorgang, der unmittelbar nach dem Urknall einsetzte und solange andauern wird, bis die letzten Sterne ausgebrannt sind. Er umfasst Prozesse zwischen Teilchen der Größenordnung  $10^{-15}$  m, die sich in Objekten der Größenordnung  $10^{12}$  m abspielen.<sup>1</sup> Die Temperaturen und Dichten, bei denen sie stattfinden, übersteigen jedwede Vorstellungskraft. Dennoch versucht der Mensch der Frage nach dem Ursprung der Materie auf den Grund zu gehen. In der Nuklearen Astrophysik werden dazu die Erkenntnisse des Mikro- und Makrokosmos vereint. *Connecting Quarks with the Cosmos* ist der Titel des Buches des National Research Council der USA, um elf physikalische Fragen des neuen Jahrhunderts zusammenzufassen. Bei einer davon handelt es sich um die Nukleosynthese schwerer Elemente von Eisen bis Uran (vgl. National Research Council 2003, S. 4, S. 121).

Inhaltliche Voraussetzungen, um physikalische Prozesse der Nukleosynthese zu behandeln, sind am Ende der Oberstufe in den Themenfeldern Kern- und Astrophysik gegeben. Es bietet sich an, die Entstehung der Elemente in Sternen als übergeordneten Kontext im Vorfeld einzuführen und anhand dieser Fragestellung den Unterricht zu gestalten. Wichtige kern- und astrophysikalische Inhalte können durch das Ziel motiviert werden, verschiedene Entstehungsprozesse zu verstehen.

Mit diesem Zugang soll nicht nur ein Thema der modernen Physik in die Schule Einzug finden. Es fördert darüber hinaus eine erweiterte physikalische Sicht auf die Radioaktivität. In empirischen Studien finden sich Hinweise, dass Schülervorstellungen zum radioaktiven Zerfall mit der Aussendung ionisierender Strahlung zusammenhängen. Dass sich der Atomkern verändert und Materie durch kernphysikalische Prozesse eine andere Form annehmen kann, könnte als Folge unerkannt bleiben. Auch die Kernfusion in den Sternen tritt im Unterricht mehr als Energiequelle auf und nicht als Quelle der Elemente, aus denen wir bestehen. Die Auseinandersetzung mit der Nukleosynthese soll bei den angehenden Abiturienten eine differenziertere Sicht auf die Struktur der Materie und unsere Existenz aufbauen.

---

<sup>1</sup> Durchmesser der Kernbausteine und Roter Überriesen.

## 2 Motivation

Der Umfang dieser Arbeit erlaubt keinen vollständigen Unterrichtsplan über zwei Themenfelder und ein ganzes Halbjahr zu entwerfen. Es wird schwerpunktmäßig der Unterrichtsinhalt der Nukleosynthese schwerer Elemente im theoretischen Rahmen des Modells der Didaktischen Rekonstruktion aufgearbeitet (vgl. Kattmann, Duit, Gropengießer & Komorek 1997). Lernen wird darin als aktive Modifizierung etablierter Vorstellungen und Konzepte verstanden. Der Unterricht entwickelt sich aus dem Vergleich von wissenschaftlicher Anschauung und Schülervorstellungen. Zum Vorgehen gehören Literaturrecherche, Schülerbefragungen und Unterrichtsversuche. In dieser Arbeit werden, aufbauend auf einer Analyse der Sachstruktur und einer Befragung, Leitlinien sowie Unterrichtselemente für ein kontextstrukturiertes Vorgehen vorgestellt, dessen Kernelemente in einem kurzen Unterrichtsversuch erprobt wurden. Damit soll gezeigt werden, inwieweit sich Nukleosynthese schwerer Elemente im Physikunterricht der Oberstufe ansiedeln lässt.

Zunächst wird erörtert, welche Gründe für die Behandlung des Themas im Physikunterricht sprechen. Die Kriterien richten sich an der Begründungsproblematik, die Wolfgang Klafki an den Anfang der Unterrichtsplanung stellt (vgl. Klafki 2007, S. 270f).

### 2.1 Gegenwartsbedeutung

Die Gegenwartsbedeutung der Nukleosynthese schwerer Elemente für Schülerinnen und Schüler der Oberstufe kann auf den ersten Blick angezweifelt werden. Themen der Kern- und Astrophysik sind ohnehin fern der jugendlichen Alltagswelt und können im Sinne eines schülerorientierten Unterrichts, der an den gegenwärtigen Bedürfnissen ausgerichtet ist, kaum Anschluss finden. An anderer Stelle warnt Klafki jedoch vor einer kompromisslosen Lebensorientierung, die dazu führen kann, dass Schülerinnen und Schüler sich im Alltag und den durch Massenmedien vermittelten Interessen verlieren. Er befürwortet ein Maß an Wissenschaftsorientierung des Unterrichts, die darauf abzielt, die „subjektiven Horizontbegrenzungen aufzuklären [...] und Anregungen zur Horizont<sup>erweiterung</sup> zu geben“ (ebd., S. 166). Die fast schon philosophische Frage nach der Herkunft der Elemente, die noch vor der Evolution unsere Existenz begrün-

det, rückt damit in einen Bereich der Unterrichtsinhalte, die über die übliche Gegenwartsbedeutung hinaus einen Bildungswert besitzen. Von jeher beschäftigt sich die Menschheit mit der Frage „Wo kommen wir her?“. Obwohl kommende Generationen da keine Ausnahme sein sollten, kann eine Erhebung des Interesses an der Entstehung der Elemente Aufschluss darüber geben, welche Bedeutung dem Thema zugeschrieben wird (vgl. 6.2.3). Dadurch können passende Handlungsmuster zur Motivationssteigerung gewählt werden, sodass die Lernenden für den physikalischen Inhalt aufgeschlossener sind.

## 2.2 Zukunftsbedeutung

Die vermutete Zukunftsbedeutung hingegen wird vor dem sozialen und intellektuellen Hintergrund unterschiedlich ausfallen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Schülerinnen und Schüler, selbst wenn sie einem Leistungskurs angehören, eine Karriere in der Physik anstreben und vertiefte kernphysikalische Themen benötigen. Trotz allem wird sich die Mehrheit den Herausforderungen einer Informationsgesellschaft und der fortschreitenden Technisierung der Arbeitswelt stellen müssen. Die Verwendung von radioaktiven Isotopen ist aus vielen Bereichen nicht mehr wegzudenken und sowohl Gefahren als auch Chancen können nur mit fundierten Kenntnissen sinnvoll eingeschätzt werden. Außerdem erfordert die Kernforschung immer modernere Beschleunigeranlagen, um die Geheimnisse des Universums zu erklären. Die Finanzierung solcher Vorhaben hängt nicht allein von den Entscheidungsträgern in Forschung und Politik ab, sondern auch vom gesellschaftlichen Konsens. Durch die gemeinsame Erörterung der Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung solcher Themen können unterschiedliche Perspektiven diskutiert und bewusst gemacht werden, was zu differenzierteren Handlungsmöglichkeiten der Schülerinnen und Schüler führen soll (vgl. ebd., S. 274f).

## 2.3 Exemplarische Bedeutung

Die exemplarische Bedeutung zeigt sich in den Lernzielen einer Unterrichtseinheit. Es muss geprüft werden, ob sich anhand des Themas allgemeinere Zusammenhänge, Gesetzmäßigkeiten und Strukturen erarbeiten lassen. Klafki weist darauf hin, dass für die Beantwortung dieser Frage ein „Lernziel-Hierarchiesystem“ entwickelt werden müsste, was aus allgemeinen, überfachlichen, bereichsspezifischen und fachlichen Ebenen besteht (vgl. ebd., S. 276ff). Ein solches System liegt in Form des Kerncurriculums des Hessischen Kultusministeriums

für die gymnasiale Oberstufe vor (Entwurfssfassung). Anstatt von Lernzielen werden die zu erwerbenden Kompetenzen formuliert. Die vier vorgeschlagenen Ebenen finden sich wieder als

- pädagogisch-didaktisches Konzept der Selbstbestimmung und sozialen Verantwortung,
- überfachliche Kompetenzen,
- Kompetenzbereiche der naturwissenschaftlichen Fächer und
- Bildungsstandards für physikalische Unterrichtsinhalte (vgl. Hessisches Kultusministerium 2014, S. 4ff).

Eine Ausführung der exemplarischen Bedeutung auf den allgemeinsten Ebenen kann nicht für jeden konkreten Unterrichtsinhalt gefordert werden, sie bleiben als Orientierungshorizont erhalten (vgl. Klafki 2007, S. 278). Bei der Ausarbeitung der Leitlinien und Unterrichtselemente muss darauf geachtet werden, dass die verschiedenen Kompetenzbereiche gefördert und die in den Themenfeldern vorgesehenen Unterrichtsinhalte umgesetzt werden (vgl. Kap. 7). Außerdem verleitet das Thema dazu, den Schwerpunkt bei der Modellierung von physikalischen Vorgängen und dem wissenschaftlichen Erkenntnisprozess zu setzen. Mit diesem wissenschaftspropädeutischen Ansatz lässt sich die exemplarische Bedeutung der Nukleosynthese schwerer Elemente sicherstellen.

### 3 Forschungsumfeld

Der Arbeit an der Didaktischen Rekonstruktion ging eine Sichtung des bestehenden Angebots an themenrelevanten Unterrichtsvorschlägen und Projekten in Zeitschriften und Internetportalen voraus. Aktuelle Schulbücher geben einen Überblick über etablierte Unterrichtsinhalte und ihre Strukturierung. Darüber hinaus liefern vorliegende Studien zu Schülervorstellungen und Interessen erste Hinweise über Lernvoraussetzungen.

#### 3.1 Unterrichtsvorschläge

Nach einer intensiven Recherche konnten nur wenige Unterrichtsvorschläge gefunden werden, die das Thema der Elemententstehung aufgreifen oder erwähnen. Es fehlt vor allem an Vorschlägen, die kernphysikalische Prozesse über die Fusion hinaus detailliert behandeln. Aus astrophysikalischer Sicht gibt es eine größere Zahl an Beiträgen, die der Sternentwicklung gewidmet sind. Der

Schwerpunkt liegt bei der Beschreibung der Sterne nach Zustandsgrößen und ihrer Klassifikation im Hertzsprung-Russel-Diagramm (vgl. Zimmermann 1985, Klein 1993, Fischer N. 2007; Scorza 2011). Die Kernfusion wird zwar als Energiequelle und bei der Aufrechterhaltung des Gleichgewichtszustandes behandelt, aber nicht explizit in dem Zusammenhang der Entstehung der Elemente. Cecilia Scorza beschreibt in ihrem ausführlichen Beitrag für die Mittelstufe den Entwicklungsweg massereicher Sterne und erwähnt die „Bildung schwerer Elemente (Silizium, Schwefel, Kalzium)“ (Scorza 2011, S. 13) sowie den Stopp der Fusion bei Eisen, „weil Eisen sehr stabil ist und nicht mehr weiter zu schwereren Elementen fusionieren kann“ (ebd.). Der Hinweis auf die Entstehung schwererer Elemente in Roten Riesen oder während einer Supernova folgt jedoch nicht. Trotzdem bieten die Beiträge genügend Anregungen für den Teil der astrophysikalischen Unterrichtsinhalte. Dasselbe gilt für die Spektroskopie des Sonnen- und Sternenlichts, womit die chemische Zusammensetzung der Sterne bestimmt wird (u.a. bei Gerhardus, Küsters, Stinner 2009; Falk 2011). Im Idealfall sollten Absorptionslinien in der Q3 als Anwendung des Bohr'schen Atommodells thematisiert werden.

Aufgrund der Fülle an Vorschlägen und einschlägiger Kapitel aktueller Physikbücher zum Themenfeld der Astrophysik (vgl. 3.2) liegt der weitere Fokus auf kernphysikalischen Inhalten, die direkt mit der Nukleosynthese zu tun haben. Dazu werden ein Unterrichtsvorschlag und ein Projekt aus den USA analysiert.

### 3.1.1 WIS-Beitrag

Olaf Fischer verfolgt in seinem Beitrag für die Oberstufe *Supernova und ihre Überreste – Makroskopische Ereignisse mit mikroskopischem Hintergrund* das Ziel, nicht nur allgemeine Vorstellungen für das Geschehen bei einer Supernova zu entwickeln, sondern auch aus kernphysikalischer Sicht zu erklären (vgl. Fischer O. 2005). Für den ersten Teil greift er auf textunterstützte Animationen zurück. Zunächst werden die Brennphasen eines massereichen Sterns und der Kollaps des Eisenkerns, der zur Supernova vom Typ II führt, schrittweise präsentiert (vgl. Welsch & Partner 2005). Danach wird die animierte Supernova des Typ Ia aus derselben Quelle besprochen. Als kernphysikalische Anknüpfungspunkte spielen der radioaktive Zerfall und die Kernbindungsenergie eine Rolle. Zwei lineare Bereiche während des Abklingens der Lichtkurve einer Supernova vom Typ I kann mit dem radioaktiven Zerfall von  $^{56}\text{Ni}$  zu  $^{56}\text{Co}$  und weiter zu



$^{56}\text{Fe}$  erklärt werden. Vorstellungen zum Zerfallsgesetz und Halbwertszeit werden anhand eines Analogieexperiments hergeleitet. Anschließend können reale Messdaten ausgewertet und mit den Halbwertszeiten von  $^{56}\text{Ni}$  und  $^{56}\text{Co}$  verglichen werden. Als Nächstes wird das „eiserne Stabilitätstal“ durchwandert. Durch exemplarische Berechnungen des Massendefekts und der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon für Kohlenstoff, Eisen und Gold soll sich jeder die Aufteilung der Kerne in links und rechts von Eisen selbst erschließen (vgl. Fischer O. 2005, S. 11). Damit wird die Entstehung der Elemente bis Eisen aus dem vorhandenen Wasserstoff und Helium nach dem Urknall erklärt. Für die restlichen Elemente bleibt zumindest der Hinweis auf Kollisionen mit freien Neutronen „oder manchmal auch Protonen“ während einer Supernova (vgl. ebd.). Den thematischen Abschluss bilden eine Auswertung der Größe und Ausbreitungsgeschwindigkeit des Krebsnebels anhand von Aufnahmen und ein Beobachtungsauftrag für den nächtlichen Himmel.

Der gewählte Ansatz, die astro- und kernphysikalischen Inhalte in Verbindung zu bringen und solche Themen wie Radioaktivität und Kernbindungsenergie in einem spannenden Kontext zu behandeln, scheint nach eigener Auffassung Erfolg versprechend zu sein. Der Einstieg greift zunächst auf animierte Darstellungen zurück, die den astrophysikalischen Vorgang der Supernova näherbringen. Das Zwischenziel der Unterrichtseinheit – die Auswertung der Lichtkurve einer Supernova – wirkt auf diese Weise logisch motiviert und bietet die Grundlage für die Beschäftigung mit dem Zerfallsgesetz. Die Frage nach dem Grund für das abrupte Ende der Sternentwicklung in einer Supernova kann ebenfalls mit kernphysikalischen Methoden erklärt werden. Die Berechnung der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon erscheint in dem Beitrag jedoch übereilt und unmotiviert. Es könnte den Schülerinnen und Schülern nicht deutlich werden, wieso gerade diese Größen berechnet werden müssen. Besonders die Phasen vor einem Arbeitsauftrag, der auf das Eintippen von Zahlen in den Taschenrechner hinausläuft, müssen gut durchdacht sein und die nachfolgenden Aktivität begründen.

Dennoch kann die prinzipielle Herangehensweise als Beispiel dienen. Die Sternentwicklung bis zur Supernova vom Typ II motiviert kernphysikalische Inhalte und bietet sich als Einstieg für eine längere Unterrichtseinheit mit dem Schwerpunkt der Nukleosynthese an (vgl. 7.1).

### 3.1.2 Marble Nuclei Project

Das Joint Institute for Nuclear Astrophysics - Center for the Evolution of the Elements (JINA-CEE) verbindet Institutionen vier amerikanischer Universitäten und zahlreiche internationale Partner rund um die Erforschung der Eigenschaften und Herkunft der Materie. Mit dem Ziel ihre Wissenschaft einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, werden Materialien für Lehrende und Lernende zusammengetragen und bereitgestellt.

Das *Marble Nuclei Project* von Zach Constan und der Michigan State University bietet einen Zugang zu Anleitungen und Skripten für eine Unterrichtseinheit, die auf einem enaktiven Zugang mit einem Kernmodell aus Murmeln basiert (vgl. Constan 2013). Grüne und gelbe metallische Murmeln repräsentieren Neutronen und Protonen, die von einem



**Abb. 1:** Kern aus Murmeln (Constan 2013).

kugelförmigen Neodym-Magneten in der Mitte zusammengehalten werden. Dieser soll die starke Wechselwirkung repräsentieren, die den Kern zusammenhält (siehe Abb. 1). Nach einer Einführung des Modells können Schülerinnen und Schüler ab der siebten Schulstufe in Partnerarbeit einen vierteiligen Kurs selbstständig oder unter Anleitung durcharbeiten. Die Inhalte gliedern sich in die Teile „Kerne benennen“, „Wie liest man die Nuklidkarte (und was sie bedeutet)“, „Kernreaktionen“ und „Was untersuchen Kernphysiker“. Neben dem Kern aus Murmeln ist ein aufbereiteter Ausschnitt der Nuklidkarte für die ersten acht Elemente ein wichtiger Bestandteil des Kurses. Die Begründung für den gewählten Ausschnitt liegt in der didaktischen Absicht, alle Zerfallsarten und Kernreaktionen mit einer sinnvollen Anzahl an Murmeln nachbauen und parallel in der Nuklidkarte nachverfolgen zu können.

Bereits nach der Begriffsklärung wird auf stabile und instabile Nuklide aufgrund energetischer Unterschiede hingewiesen. Daraus lassen sich auf einem elementaren Niveau Zerfallsarten und unterschiedliche Halbwertszeiten ableiten. Die ikonischen Repräsentationen in der Anleitung werden mit der Aufforderung begleitet die jeweilige Zerfallsart im Modell nachzustellen und den entstandenen Kern mithilfe der Nuklidkarte zu benennen. Das in der Mathematikdidaktik auf Jerome Bruner zurückgeführte EIS-Prinzip (enaktiv, ikonisch, symbolisch), welches den lernförderlichen Wechsel zwischen den Repräsentationsebenen einer

Sache beschreibt, wird erfüllt. Dadurch lernen Schülerinnen und Schüler Radioaktivität als Kernumwandlung zur Reduzierung der Energie kennen, und nicht in erster Linie als Quelle gefährlicher Strahlung. Davon ausgehend können Neutroneneinfänge und nachfolgende  $\beta$ -Zerfälle sowie Fusionsprozesse in Sternen gut behandelt werden.

Der Reiz dieses Zugangs besteht vor allem in der Modellierung des Kerns als greifbaren Gegenstand, wobei die Gefahr der Überinterpretation seitens der Lernenden besteht. Die Grenzen des Modells müssen sowohl zu Beginn als auch in einer Abschlussdiskussion angesprochen werden. Das Konzept ermöglicht zahlreiche einprägsame, spielerische Aktivitäten, wie den Zusammenstoß von Kernen oder eine Simulation der Nukleosynthese nach dem Urknall aus dem Verhältnis von Protonen und Neutronen. In einem Nukleosynthese-Spiel werden nach gewürfelten Regeln Kernreaktionen durchgeführt. Es dient jedoch nur der Verinnerlichung verschiedener Kernumwandlungen und keinem Realkontext.

### 3.2 Schulbücher

Kern- und Astrophysik machen in den meisten Physikbüchern, zusammen mit der Relativitätstheorie, die letzten Kapitel aus. Die Reihenfolge der Kapitel und Unterkapitel spiegelt in der Regel nicht nur den Lehrplan wider. Dahinter verbirgt sich vielmehr eine bevorzugte Abfolge aus aufeinander aufbauenden Inhalten, historischen Exkursen, Grundlagen und Vertiefungen (siehe Tab. 1).

<b>Dorn / Bader Physik SEK II</b>	
<b>Kernphysik</b> .....	361
Grundlagen .....	362
$\alpha$ -Strahlung .....	364
⋮	
Der Atomkern .....	388
$\alpha$ -Zerfall.....	394
<b>Metzler Physik SII</b>	
<b>13 Kernphysik</b> .....	480
13.1 Radioaktivität.....	480
13.1.1 Die ionisierende Wirkung radioaktiver Strahlung .....	480
13.1.2 Strahlungsarten.....	482
⋮	
13.1.5 Arten der Kernumwandlung.....	486
⋮	
13.3 Aufbau und Energie der Kerne.....	498
13.3.1 Masse und Massendefekt.....	498

Physik Oberstufe	
<b>Quantenobjekte und Struktur der Materie</b> .....	262
⋮	
11 Kerne und Elementarteilchen .....	372
11.1 Radioaktivität .....	372
11.1.1 Nachweis radioaktiver Strahlung .....	372
11.1.2 Arten radioaktiver Strahlung .....	374
⋮	
11.2 Aufbau der Atomkerne .....	386
11.2.1 Kernbausteine .....	386
11.1.1 Massendefekt und Bindungsenergie .....	388
⋮	
11.3 Kernumwandlungen .....	392
Fokus Physik Sekundarstufe II	
<b>Struktur der Materie</b> .....	316
⋮	
16 Atomkerne .....	384
16.1 Aufbau von Kernen .....	384
16.2 <b>Technik</b> Nachweis ionisierender Strahlung .....	386
16.3 Massendefekt und Bindungsenergie .....	388
16.4 Starke Wechselwirkung und Tröpfchenmodell .....	390
16.5 <b>Meilenstein</b> Becquerel, die Curies und die Entdeckung der Radioaktivität .....	392
16.6 Radioaktive Strahlung .....	394

**Tab. 1:** Strukturierung der Inhalte zur Kernphysik in aktuellen Schulbüchern für die Oberstufe (vgl. Dorn & Bader 2010; Grehn & Krause 2007; Diehl u. a. 2008; Breuer u. a. 2014).

Tabelle 1 gibt Ausschnitte aus den Inhaltverzeichnissen von vier aktuellen Schulbüchern für die Oberstufe wieder. In den ersten drei Beispielen wird deutlich, dass Kernphysik mit Radioaktivität eingeführt wird und unmittelbar mit Strahlung zusammenhängt. Das ist nicht verwunderlich, da die Entdeckung der Radioaktivität aus historischer Sicht den Beginn der modernen Kernforschung ausmacht. Obendrein machen sich Kernzerfälle zunächst nur über ihre Strahlung bemerkbar, was die Reihenfolge erkenntnistheoretisch begründet. Erst später folgen Ausführungen zum Atomkern, seinem Aufbau und den Eigenschaften, die zum Zerfall und anderen Kernumwandlungen führen.

Die Orientierung an dieser Struktur birgt die Gefahr, dass in den Köpfen der Schülerinnen und Schüler Kernphysik mit Radioaktivität und Radioaktivität mit Strahlung gleichgesetzt wird. Studien bezüglich der Vorstellungen zur Strahlung belegen bereits in der Sekundarstufe I diese Entwicklung (vgl. 3.3.1). Das letzte und aktuellste Schulbuch dieser Auswahl folgt einer umgekehrten Strategie. Es werden zunächst solche Inhalte wie Aufbau, Massendefekt, Bindungsenergie und Tröpfchenmodell des Atomkerns behandelt. Radioaktivität, die „mit der Umwandlung von Atomkernen und daher meistens auch mit der Umwandlung

chemischer Elemente einhergeht“ (Breuer u. a. 2014, S. 394), wird erst im Nachhinein in diesen „theoretischen Vorbau“ eingliedert. Die *Technik* und *Meilenstein* Kapitel sind als experimentelle und historische Exkurse aufgebaut, die an dieser Stelle der Entdeckung der Radioaktivität Rechnung tragen, aber nicht die Kernphysik darum zentrieren. Dieser Zugang findet sich im *Marble Nuclei Project* der amerikanischen Forscher wieder. Auf dem Weg zur Nukleosynthese schwerer Elemente geht die Reihenfolge der Inhalte ebenfalls von der Beschreibung des Atomkerns und nicht der Strahlung aus. Trotzdem können einzelne Kapitel der aktuellen Schulbücher an entsprechender Stelle als Informations- und Aufgabenquelle dienen.

Dasselbe gilt für Kapitel bezüglich der Astrophysik. Zustandsgrößen, Aufbau und Einordnung in das Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sonne und anderer Fixsterne wird in allen vier vorgestellten Büchern behandelt. Bei der Entwicklung massereicher Sterne werden stellare Brennprozesse und Entstehung entsprechender Elemente angesprochen. Allerdings unterscheidet sich die Informationstiefe, was die Nukleosynthese schwererer Elemente als Eisen angeht. In den ersten beiden Büchern beschränkten sich die Autoren auf den Hinweis, dass Elemente mit schwereren Kernen „während einer Supernova“ oder „bei Sternexplosionen“ entstanden sind (vgl. Dorn & Bader 2010, S. 438f; Grehn & Krause 2007, S. 556ff). In *Physik Oberstufe* wird ansatzweise auf den Entstehungsprozess eingegangen und es heißt, dass beim Kollaps Neutronen in großer Zahl entstehen und durch Neutroneneinfänge Massenzahlen über 56 erreicht werden (vgl. Diehl u. a. 2008, S. 466ff). Lediglich in *Fokus Physik Sekundarstufe II* findet darüber hinaus eine Differenzierung in s- und r-Prozess mit Erwähnung der  $\beta$ -Zerfälle statt. Darstellungen der Entstehungswege in der Nuklidkarte sind nicht vorhanden.

### 3.3 Schülervorstellungen und Interessen

Eines der Kennzeichen erfolgreichen Unterrichts ist die Einbeziehung bestehender Schülervorstellungen in die Unterrichtsplanung und in den Unterricht (vgl. Duit 2004, S. 4). Sie können von Lerngruppe zu Lerngruppe unterschiedliche Ausprägungen haben und jede Lehrperson sollte in der Lage sein, sie im konkreten Lernprozess offenzulegen. Jedoch sind allgemeine Konzepte möglicher Vorstellungen als Richtlinien bei der Planung von Lernprozessen anzusehen.

### 3.3.1 Radioaktivität, Strahlung und Zerfall

In der Oberstufe wird nicht mehr von Alltagsvorstellungen oder Präkonzepten gesprochen. Die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler sind gerade im Bereich der Kernphysik vom Physikunterricht der Sekundarstufe I geprägt. Dieser beschäftigt sich laut den geltenden Bildungsstandards im Inhaltsfeld *Physik in Verantwortung* mit Zerfallsprozessen, ionisierender Strahlung sowie Nutzen und Schaden der Radioaktivität für die Menschheit (vgl. Hessisches Kultusministerium 2010, S. 27). Der Zerfall radioaktiver Nuklide ist ein essenzieller Schritt bei der Nukleosynthese schwerer Elemente. Die einprägsamen Begriffe Zerfall und Halbwertszeit geben jedoch keinen Hinweis darauf, dass dieser natürliche Prozess ausschlaggebend ist für den Aufbau eines Teils der uns umgebende Materie. Im Gegenteil, der gesamte Themenbereich ist eher negativ belastet.

Susanne Neumann und Michael Hopf beschäftigen sich mit den Vorstellungen zum Begriff *Strahlung*. In einer der Studien wurden die Motive von 509 Schülerinnen und Schülern der vierten bis sechsten Schulstufe analysiert, die sie zu diesem Begriff zeichnen sollten. Der Anteil der Motive, die mit Radioaktivität in Verbindung gebracht werden können, steigt „von 2,7% in der vierten Schulstufe auf 15,2% in der sechsten Schulstufe“ (Neumann & Hopf 2011, S. 168). In fast allen Interviews wurden als Informationsquelle Familiengespräche über den Unfall von Tschernobyl oder Diskussionen über den Bau von Kernkraftwerken angegeben. Jungen wählten das Motiv der Radioaktivität signifikant häufiger als Mädchen, was die Autoren mit größerem Interesse an Katastrophen und Kriegsfilmern erklären (vgl. ebd., S. 172f).

Die Dominanz der Radioaktivität in den Vorstellungen verstärkt sich zu 58% in weiteren Interviews mit 50 österreichischen Schülerinnen und Schülern am Ende der neunten Schulstufe, wobei 20% keine weitere Strahlungsmöglichkeit erwähnten. Über die Hälfte der Befragten gaben negative Gefühle an, wenn sie auf Strahlung angesprochen wurden. Lediglich eine Minderheit derjenigen, die Radioaktivität nicht als Strahlungsquelle erwähnten, hatte eine positive Einstellung (vgl. Neumann & Hopf 2012, S. 829). Die Autoren formulierten aus den Interviews Konzepte in Bezug auf Strahlung. Eines davon, das für viele Fehlvorstellungen verantwortlich sein soll, setzt Strahlung mit strahlenden Teilchen gleich (vgl. ebd., S. 830). Da Radioaktivität seit der Kindheit mit Unfällen und Gefahr verbunden wird, erklärt es die größtenteils ablehnende Haltung gegenüber allem,

was mit Strahlung zu tun hat. Durch die mediale Präsenz der Gefahren, die mit der technologischen oder militärischen Anwendung radioaktiver Nuklide zusammenhängen, wird Strahlung zu einem künstlichen Phänomen. Wärme oder Licht und die natürlich vorkommende Radioaktivität werden nur selten wahrgenommen.

Nach der Nuklearkatastrophe von Fukushima wurden beide Studien unter ähnlichen Bedingungen wiederholt. Die beschriebenen Ergebnisse haben sich nochmals verschärft. Der Anteil der Zeichnungen, die Radioaktivität darstellen sollten, hat sich verdoppelt (siehe Abb. 2). Die Prozentzahl derjenigen, die beim Interview den Begriff Strahlung ausschließlich mit Radioaktivität in Verbindung brachten, hat sich verdreifacht (vgl. Neumann 2014, S. 168).

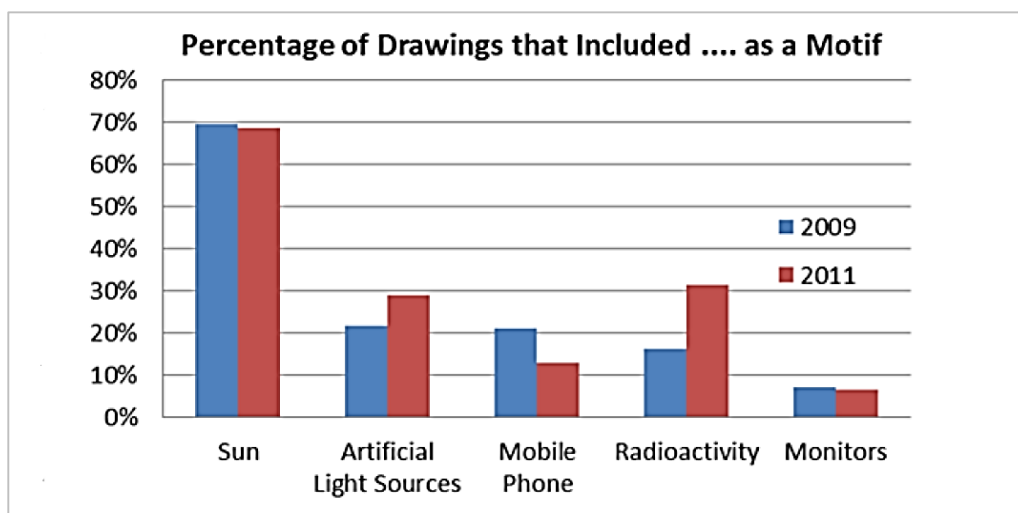


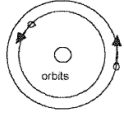

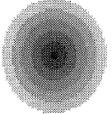
Abb. 2: Veränderung der Assoziationen zu Strahlung nach Fukushima (Neumann 2014, S. 167).

Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, muss der Physikunterricht nicht nur natürliche Aspekte der Radioaktivität sowie die nicht ionisierenden Strahlungsarten stärker hervorheben. Das Konzept der Radioaktivität, die vorwiegend mit *Zerfall* und ionisierender *Strahlung* gleichgesetzt wird, bedarf einem Wechsel, oder besser gesagt, einer Erweiterung in Richtung des neutralen Begriffs der *Kernumwandlung*. Das verschärfte Bewusstsein für das *Ergebnis* eines  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfalls – ein anderes Element entsteht – führt nicht nur zu einem ausgewogenerem Bild der Radioaktivität. Es vermeidet die folgenschwere Gleichsetzung von Strahlung und strahlendem Teilchen. Die Nukleosynthese schwerer Elemente eignet sich als Thema für diesen Konzeptwechsel. Verschiedene Arten der Kernumwandlungen sind im Vordergrund und nicht die ausgesendete Strahlung. Durch eine Anknüpfung an den in der Mittelstufe präsenten *Zerfall* kann eine Entwicklung hin zur *Entstehung* durchgemacht werden.

### 3.3.2 Atomvorstellungen

Die Eigenschaften des Atomkerns und seine potentielle Umwandlung lassen sich nicht ohne eine vorhandene Vorstellung zum Atom entwickeln. Lernende erweitern und überarbeiten ihre Vorstellungen mehrmals während ihrer Schullaufbahn. Als Erklärung für verschiedene Aggregatzustände reicht ein Modell, bei dem alle Stoffe aus Kugeln bestehen, die Teilchen genannt werden. Im Chemieunterricht werden Moleküle eingebracht, die als mehrere miteinander verbundene Kugeln dargestellt werden, wobei einzelne Kugeln Atome heißen. Dennoch wird gerne auf das Bild der Teilchen zurückgegriffen, wenn es darum geht, das Schmelzen eines Eisblocks und das Verdampfen von Wasser zu erklären. Verschiedene Modellvorstellungen oder Konzepte können je nach Situation ihre Gültigkeit in „Schichtenstrukturen“ mit unterschiedlichem Status und kognitiver Stärke behalten, vorausgesetzt ein tiefgreifender Konzeptwechsel ist im Grundsatz gelungen (vgl. Taber 2000, S. 399; Petri & Niedderer 2001, S. 66).

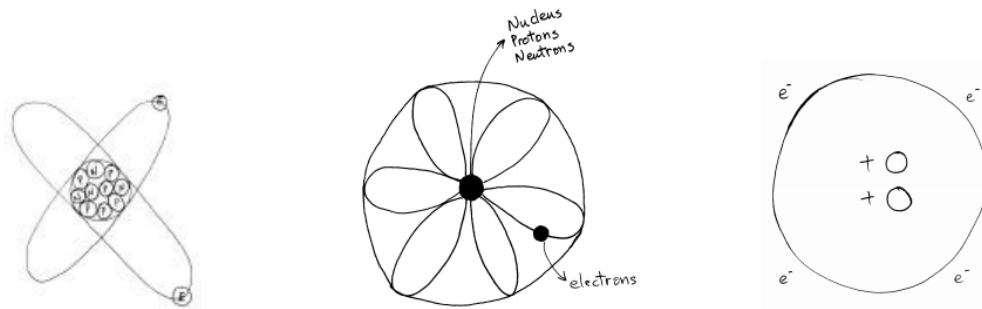
Jürgen Petri und Hans Niedderer haben die kognitiven Schichtenstrukturen in der Atomphysik in Interviews mit Oberstufenschülern untersucht. Der Schüler Carl beschreibt das „kognitive Element Atom“ zunächst im Planetenmodell mit Elektronen, die den Kern in Bahnen umkreisen. Die Bewegung ist für ihn im Rahmen des Aufenthaltswahrscheinlichkeitsmodells unbestimmt und die Aufenthaltsbereiche werden zu Orbitalen. Der Teilchencharakter des Elektrons im Atom und seine Bewegung lösen sich im Rahmen des Ladungswolkenmodells schließlich ganz auf (vgl. Petri & Niedderer 2001, S. 58f). Er dient als Beispiel für einen gelungenen Konzeptwechsel in Richtung einer quantenmechanischen Vorstellung. Die verschiedenen Schichten werden klar abgetrennt und unterscheiden sich hinsichtlich ihres Status (siehe Abb. 3).

Kognitive Schicht	Planetenmodell	Aufenthaltswahrscheinlichkeit	Ladungswolke
Schüler			
Carl	hohe Stärke geringer Status	mittlere Stärke mittlerer Status	mittlere Stärke sehr hoher Status
authentische Konfliktlösung, hohe Trennschärfe, reflektierter Umgang gelungener Konzeptwechsel			

**Abb. 3:** Schichtenstruktur zur Atomphysik im Vergleich (Petri & Niedderer 2001, S. 65).



Der Atomkern spielt in den zur Atomphysik entwickelten Vorstellungen üblicherweise eine Nebenrolle. In den hier verwendeten Darstellungen ist der Atomkern als kleine Kugel ohne weitere Struktur gezeichnet. Das ist verständlich, da in erster Linie die Interpretation der Elektronenhülle für verschiedene „Erscheinungsbilder“ des Atoms sorgt. Trotzdem versuchen Schülerinnen und Schüler in Studien zu Atomvorstellungen, dem Atomkern ein „Gesicht“ zu geben, vorausgesetzt sie kennen seine Bestandteile (siehe Abb. 4).



**Abb. 4:** Verschiedene Schülerdarstellungen eines Atoms (Unal & Zollman 1999, S. 13).

Diese kleine Auswahl macht deutlich, wie unterschiedlich die Vorstellungen zum Atom und Atomkern sein können. Bei der Befragung nahmen Schülerinnen und Schüler der USA zwischen 14 und 18 Jahren teil (9th Grade bis 12th Grade). Die Darstellungen deutscher Oberstufenschüler sind mit Sicherheit nicht weniger vielfältig. Insbesondere kann der Vergleich von getrennten Zeichnungen eines Atoms und eines Atomkerns Hinweise bezüglich der kognitiven Schichtenstrukturen liefern (vgl. 6.2.1).

### 3.3.3 Interessen

Bezüglich der Interessen zu naturwissenschaftlichen Inhalten und Kontexten liegen Ergebnisse der internationalen Studie ROSE vor (The Relevance of Science Education). In Deutschland und Österreich wurden 1247 Schülerinnen und Schüler am Ende der Sekundarstufe I befragt (vgl. Elster 2007). Die Ergebnisse lassen auf ein hohes Interesse beider Geschlechter an *Astrophysik* schließen. Der Mittelwert der 4-stufigen Likert-Skala (1: „nicht interessiert“ – 4: „sehr interessiert“) grenzt bei Jungen zusammen mit den Werten für *Technologie* und *Energie* an 3,0. Während die zuletzt genannten Themen bei Mädchen deutlich abgeschlagen sind, ist bei ihnen das Interesse an astrophysikalischen Inhalten nur geringfügig niedriger als bei Jungen. Der Wert liegt zwischen den erwartungsgemäß hohen Werten für *Zoologie* und *Humanbiologie*. Was Kontexte angeht, ist

im Gegensatz zur zehn Jahre älteren IPN-Interessensstudie geschlechterunabhängig ein erstaunlich niedriges Interesse an *Alltagsnutzen* festgestellt worden. Aktuell ist *Spektakuläres* bei Jungen auf Platz eins und bei Mädchen ist *Mystik, Wunder* zusammen mit den Kontexten *Gesundheit, Fitness und Jugend* führend (vgl. ebd., S. 5). Werden konkrete Themen betrachtet, gehört „Phänomene, die Wissenschaftler bisher nicht erklären konnten“ bei beiden Geschlechtern zu den zehn interessantesten. „Schwarze Löcher, Supernovae und andere spektakuläre Phänomene im Weltall“ ist ebenso im oberen Bereich, findet bei Jungen jedoch ein größeres Interesse als bei Mädchen. Bemerkenswert ist, dass bei Jungen „Wie eine Atombombe funktioniert“ auf Platz eins ist, während „Atome und Moleküle“ bei Mädchen zusammen mit „Wie eine Atomkraftanlage funktioniert“ zu den untersten Rängen gehört (ebd., S. 6).

Obwohl Interessenstudien nur den Trend der jeweiligen Generation repräsentieren, scheint die Ausgangslage für ein astrophysikalisches Thema, das mit der zum Teil unvollständigen Entstehungsgeschichte des Universums zu tun hat, vielversprechend zu sein. Das vordergründige Interesse an spektakulären Phänomenen erlaubt es, die Aufmerksamkeit mit der Thematisierung einer Supernova zu bündeln. Die Qualität der Verknüpfung der astrophysikalischen Inhalte mit den kernphysikalischen wird ausschlaggebend sein, ob das Interesse auf lange Sicht gehalten werden kann. Der Unterricht sollte so ausgelegt sein, dass die Fragen vorkommen, die die Schülerinnen und Schüler interessieren. Welche Fragen das sind, und inwieweit die Entstehung der Elemente mit astrophysikalischen Vorgängen konkurrieren kann, wurde in dieser Arbeit untersucht (vgl. 8.3 & 6.2.3).

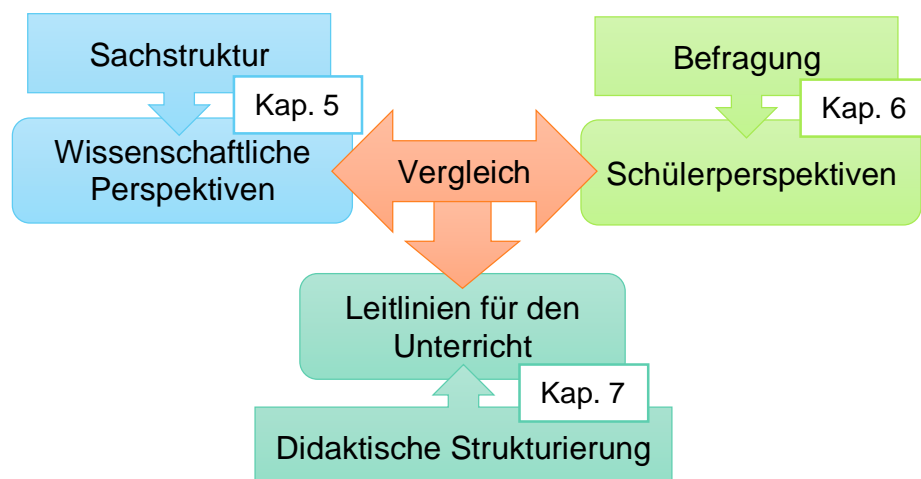
## 4 Vorgehensweise

Aus den beschriebenen Vorüberlegungen und Recherchen gestaltete sich folgende Vorgehensweise. Mithilfe eines Fragebogens wurde an einem Gymnasium in allen Physikkursen der Q3 Schülervorstellungen, Interessen und Vorkenntnisse erhoben. Die Ergebnisse wurden zur Präzisierung und Erweiterung der im Vorfeld angenommenen Lernvoraussetzungen herangezogen, um Schülerperspektiven herauszuarbeiten. Durch ihren Vergleich mit der wissenschaftlichen Perspektive sind gemäß des Modells der Didaktischen Rekonstruktion Leitlinien für den Unterricht festgelegt worden. Bei der Unterrichtsgestaltung sorgt

ein kontextstrukturiertes Vorgehen für die nötige Motivation und ein Lernspiel für Eigentätigkeit. In einem zur Verfügung gestellten Kurs der Einführungsphase konnten Potential des gewählten Kontextes und des entwickelten Lernspiels erprobt werden. Die gewonnenen Erfahrungen, Lösungen und Kommentare dienen der Weiterentwicklung der Unterrichtseinheit um die Nukleosynthese schwerer Elemente. Einzelne Bestandteile des Vorgehens werden im Folgenden erläutert.

#### 4.1 Didaktische Rekonstruktion

Das konstruktivistische Modell der Didaktischen Rekonstruktion wurde in Zusammenarbeit zweier Arbeitsgruppen in Oldenburg und Kiel entwickelt (vgl. Duit, Komorek & Wilbers 1997, S. 20). Es beinhaltet drei wechselwirkende Teilaufgaben, die als fachdidaktisches Triplet bezeichnet werden: fachliche Klärung, Erfassung von Schülervorstellungen und didaktische Strukturierung (vgl. Kattmann, Duit, Gropengießer & Komorek 1997, S. 4). Aus methodologischer Sicht wird von Analyse der Sachstruktur, empirischer Untersuchung und Konstruktion von Unterricht gesprochen (vgl. ebd., S.10). In dieser Arbeit befinden sich die analytischen, empirischen und konstruktivistischen Komponenten in den Kapiteln zur Sachstruktur, Befragung und didaktischer Strukturierung (siehe Abb. 5).



**Abb. 5:** Komponenten der Didaktischen Rekonstruktion.

Da Lernen von den Autoren als aktive Modifizierung oder „Rekonstruktion“ vorunterrichtlicher Vorstellungen oder erworbener Konzepte angesehen wird, werden wissenschaftliche Perspektiven und Schülervorstellungen als gleichwertig behandelt. Sie werden als „persönliche Konstrukte der jeweiligen Personen bzw. Personengruppen“ wahrgenommen (Kattmann 2005, S.168). Die Instruktion einer allgemeingültigen Sachstruktur gemäß dem Bild des „Nürnberger

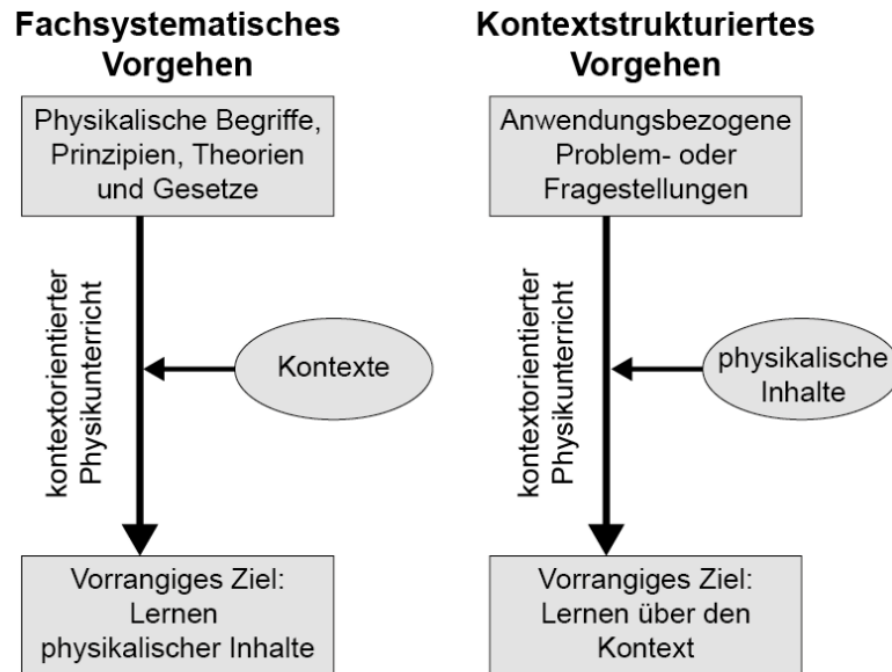
Trichters“ ohne individuelle Zusammenhänge beim fachlichen Lernen einzubeziehen, steht im direkten Gegensatz dazu (vgl. ebd., S. 166). Ebenso ist von einem strikten Ersatz von „falschen“ Konzepten gegen „richtige“ keine Rede. Alltagsanschauungen und Vorkonzepte behalten oft ihre Gültigkeit und sind im jeweiligen Kontext hilfreich. Das Unterrichtsziel ist es, die Erkenntnis hervorzurufen, dass die wissenschaftliche Perspektive für gewisse Kontexte fruchtbarer ist (vgl. Kattmann, Duit, Gropengießer & Komorek 1997, S. 6):

*„Lernen bedeutet [...] in diesem Zusammenhang die Bildung neuer, fachlich orientierter Vorstellungen, die Strukturierung und Bewertung verfügbarer Vorstellungen und deren angemessene Anwendung“ (ebd.).*

Es gilt im Rahmen der fachlichen Klärung „unter Vermittlungsabsicht“ (ebd., S. 10) und mittels empirischer Untersuchungen beide Sichtweisen zu identifizieren und während der Konstruktion von Unterricht in Beziehung zu setzen. Aus dem Vergleich der Ansichten werden Leitlinien für den Unterricht entwickelt, die „interessante Beziehungen, Verknüpfungen oder Korrespondenzen zwischen dem fachlichen Wissen und den individuellen Lernbedingungen“ der Schülerinnen und Schüler beinhalten (vgl. Kattmann 2005, S. 168).

## 4.2 Kontextstrukturierung

Dass „Lernen im sinnstiftenden Kontext“ (Muckenfuß 1995) stattfinden muss und Physikunterricht keine „synthetische Wirklichkeit“ (Müller 2006) ohne Bezug zur Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler zeichnen darf, gilt als unumstritten. Allerdings ist Kontextorientierung nicht mit der Einbettung von Rechenaufgaben in eine konstruierte Geschichte zu verwechseln. Es geht um die Absicht, Konzepte und Fähigkeiten auf einen Realkontext zu beziehen und anzuwenden. Kontexteinbindung kann auf der einen Seite als methodische Anreicherung eines fachsystematischen Physikunterrichts verstanden werden, der an der Sachstruktur des Fachs ausgerichtet ist (vgl. Nawrath 2010, S. 19). Die Struktur des Unterrichts wird daraufhin von physikalischen Begriffen, Prinzipien, Theorien und Gesetzen vorgegeben. Beim *Marble Nuclei Project* beispielsweise lässt sich ein fachsystematisches Vorgehen erkennen, das Realkontexte aus der Astrophysik als Anwendungsbeispiele einbezieht. Auf der anderen Seite können anwendungsbezogene Problem- oder Fragestellungen die Strukturierung des Unterrichts vorantreiben (siehe Abb. 6).

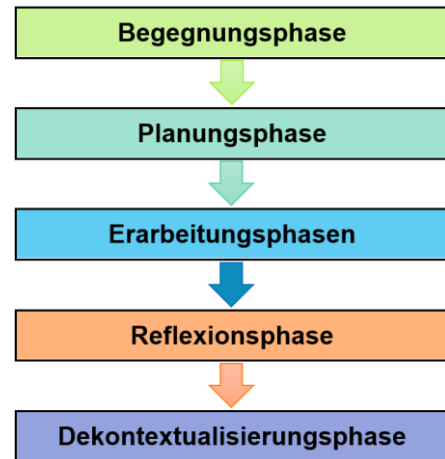


**Abb. 6:** Kontextorientierter Unterricht zwischen Fachsystematik und Kontextstrukturierung (Nawrath 2010, S. 21).

Bei diesem Zugang stellt sich das Lernen über den Kontext und nicht über die Physik als vorrangiges Ziel ein. Lernprozesse sollen durch „den Bezug zu Anwendungen, Technik- oder Alltagssituationen bzw. gesellschaftlichen Problemsituationen“ (ebd.) nachhaltig unterstützt werden. Die Erklärung naher und ferner Naturphänomene kann die Anwendung physikalischer Methoden ebenfalls motivieren. Die Aneignung physikalischer Inhalte wird bei dieser Art des Unterrichts zur Notwendigkeit beim Erreichen des vorrangigen Ziels und nicht zum Ziel selbst, welches durch vorgehaltenen Kontext „schmackhaft“ gemacht wird. Interessenstudien können bei der Wahl eines passenden Kontextes für beide Geschlechter herangezogen werden.

Die Unterrichtsgestaltung zielt darauf ab, dass der Lernprozess von den Schülerinnen und Schülern durch die Auseinandersetzung mit dem Kontext getragen wird. Ausgehend von Schülerfragen müssen Einzelaspekte des Kontextbereichs die Untergliederung in Sinneinheiten ermöglichen (vgl. Gabriel & Backhaus 2011, S. 3). Für die Umsetzung einer kontextstrukturierten Unterrichtseinheit haben die beiden Didaktiker einen Phasenplan entworfen (siehe Abb. 7). Dieser sieht eine Problemstellung vor, die in der *Begegnungsphase* ersichtlich wird. In der *Planungsphase* müssen einzelne Aspekte herausgearbeitet, formuliert und strukturiert werden, die zur Lösung des Problems beitragen sollen. Daraus leiten

sich verschiedene *Erarbeitungsphasen* ab, in denen Lernziele erreicht werden können. Die Konzeptbildung ergibt sich innerhalb des Problemlösungsprozesses auf natürliche und sinnstiftende Art. In der *Reflexionsphase* sollten Lernprodukte diskutiert werden, um die Strategie, die zur Lösung geführt hat, bewusst zu machen. *Dekontextualisierungsphasen* dienen dazu, die erworbenen Fähigkeiten in anderen Zusammenhängen anzuwenden.



**Abb. 7:** Strukturierungsmodell für kontextstrukturierte Vorhaben (nach Gabriel & Backhaus 2011, S. 3).

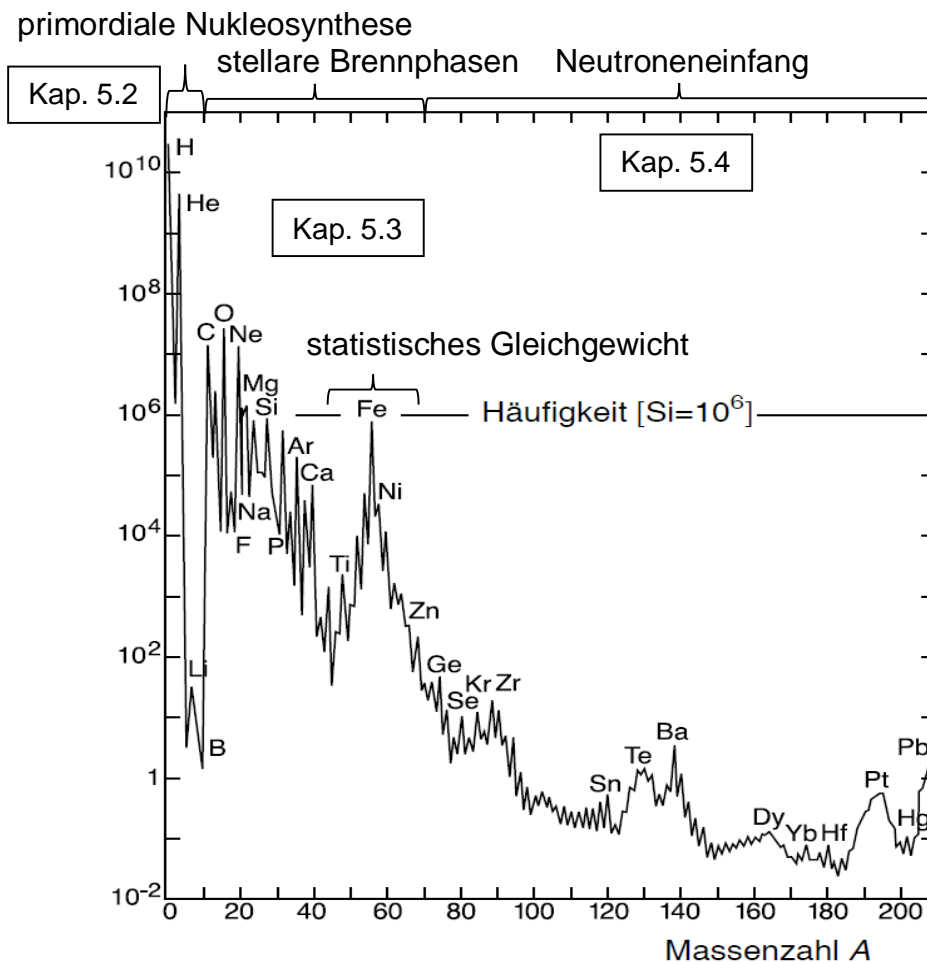
## 5 Sachstruktur

Bereits in der Antike versuchten Philosophen alles, was uns umgibt, auf elementare Einheiten zurückzuführen. Die Auffassung, dass die Welt aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Erde und Luft zusammengesetzt ist, hatte bis ins 17. Jahrhundert Bestand (vgl. Böhme & Böhme 2010, S. 131). Die moderne Wissenschaft ist in dieser Hinsicht stark vorangeschritten. Mittlerweile zählen weder Atome noch Kernbausteine zu den *Elementarteilchen*. Dennoch hängt die äußere Beschaffenheit unserer unmittelbaren Umwelt in erster Linie von den im jeweiligen Körper vorkommenden Atomsorten ab, den sogenannten *chemischen Elementen*.

Die Frage nach der Zusammensetzung der Welt hört nicht bei der Erdkruste auf. Fritz Heide schrieb 1957 in seine *Kleine Meteoritenkunde*, dass die „Häufigkeit der Elemente in den Meteoriten denselben Gesetzmäßigkeiten gehorcht, wie wir sie für die Erde kennen“ (Heide 1957, S. 88) und „noch kein chemisches Element gefunden worden ist, das nicht auf der Erde vorhanden ist“ (ebd., S. 84). Die Meteoritengruppe der sogenannten *kohligen Chondrite* repräsentiert die Urmaterie in der frühen Bildungsphase unseres Sonnensystems (vgl. Okrusch & Matthes 2010, S. 552). Die Menschheit kommt der Milliarden von Jahren zurückliegenden Entstehungsgeschichte des Sonnensystems und der Erde durch die Erforschung der Zusammensetzung der uns umgebenden Materie näher.

Die Strahlung, die uns erreicht, enthält ebenfalls Hinweise auf die Zusammensetzung der sichtbaren Materie im Universum. Wird das Licht unserer Sonne

spektral aufgelöst, zeigen sich viele dunkle Absorptionslinien auf dem kontinuierlichen Untergrund, was Joseph von Fraunhofer 1814 beobachtete (vgl. Demtröder 2014, S.317, S. 498). Erst im Bohr'schen Atommodell rund hundert Jahre später ließen sich die diskreten Linien auf die Absorption diskreter Energieportionen in der Photosphäre der Sonne deuten. Die Weiterentwicklung der Instrumente und Quantentheorien erlaubt es heutzutage, Verteilung und relative Häufigkeit der Elemente in der Sonne, anderen Sternen und interstellarer Materie abzuschätzen. Als Ergebnis von Massenspektroskopie und Spektralanalyse wird die relative Häufigkeit der Elemente im gesamten Sonnensystem als Funktion der Massenzahl  $A$  angegeben (siehe Abb. 8).



**Abb. 8:** Relative Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem als Funktion der Massenzahl  $A$ . Häufigkeit des Siliziums wurde auf  $10^6$  normiert (Povh, Rith, Scholz & Zetsche 2009, S. 16).

Anhand des groben Verlaufs wird deutlich, dass die Häufigkeit der Atomsorten bis auf einige Ausnahmen mit zunehmender Massenzahl abnimmt. Die Häufigkeit einzelner Elemente mit geraden Massenzahlen ist höher als die der direkten Nachbarn, was zum charakteristischen Zickzack-Muster führt. Das lässt sich mithilfe von Kernmodellen auf die unterschiedliche Stabilität der Nuklide bei

geraden und ungeraden Anzahlen der Kernbausteine zurückführen. Diese Beobachtung spiegelt ein elementares Prinzip der Kernphysik wider: Kernreaktionen, die zu stabileren Kernen führen, haben eine höhere Reaktionswahrscheinlichkeit (Wirkungsquerschnitt). Stabiler Kerne haben dementsprechend eine niedrigere Wahrscheinlichkeit weitere Kernumwandlungen durchzuführen, was sich in den relativen Häufigkeiten bemerkbar macht. Exemplarisch wird in dieser Frage die fächerübergreifende Zusammenarbeit beim Erkenntnisprozess deutlich: Astrophysikalische Beobachtungen werden mit Theorien der Kernphysik interpretiert und mithilfe von Experimenten auf ihre Konsistenz überprüft.

Der restliche Verlauf der relativen Häufigkeiten hängt direkt mit den verschiedenen Entstehungsprozessen zusammen, die in drei Unterkapiteln behandelt werden. Zuvor wird in Anbetracht der Vermittlungsabsicht auf die Bedeutung und Entwicklung einiger Fachbegriffe eingegangen.

## 5.1 Begriffsentwicklung

Im Zuge der fachlichen Klärung im Modell der Didaktischen Rekonstruktion gilt es elementare wissenschaftliche Sichtweisen herauszuarbeiten, die das Thema innehat. Sie stützen sich auf Fachbegriffe, die mit bestimmten Vorstellungen aus vorherigen Unterrichtseinheiten verbunden sind.

Die Begriffe Atom, Atomkern, Element, Isotop, Radioaktivität, Zerfall und Kernumwandlung sind für die Erarbeitung der Nukleosynthese erforderlich und sind teilweise aus der Mittelstufe bekannt. Das Beziehungsgefüge zwischen den Begriffen lässt sich auf zwei Grundaussagen reduzieren (siehe blauer und grüner Kasten in Abb. 9). In zwei miteinander verbundenen Entwicklungssträngen werden die Vorstellungen schrittweise aufgebaut. Die erste Aussage zielt auf die Bedeutung der Elemente für die Zusammensetzung chemischer Stoffe und begründet das Interesse an ihrer Entstehung. Aus physikalischer Sicht steht dahinter die Frage nach Prozessen, die letztendlich die Protonenzahl erhöhen. Die zweite Aussage zielt auf die Möglichkeit der Umwandlung von Kernen aufgrund von energetisch ungünstigen Verhältnissen, was sich durch austretende Strahlung bemerkbar macht. Die Entwicklung und Festigung dieser Vorstellungen ist eines der Unterrichtsziele der Nukleosynthese schwerer Elemente. Die Gleichsetzung von „radioaktiver Strahlung“ mit „radioaktiven Nukliden“ wird dadurch vermieden.



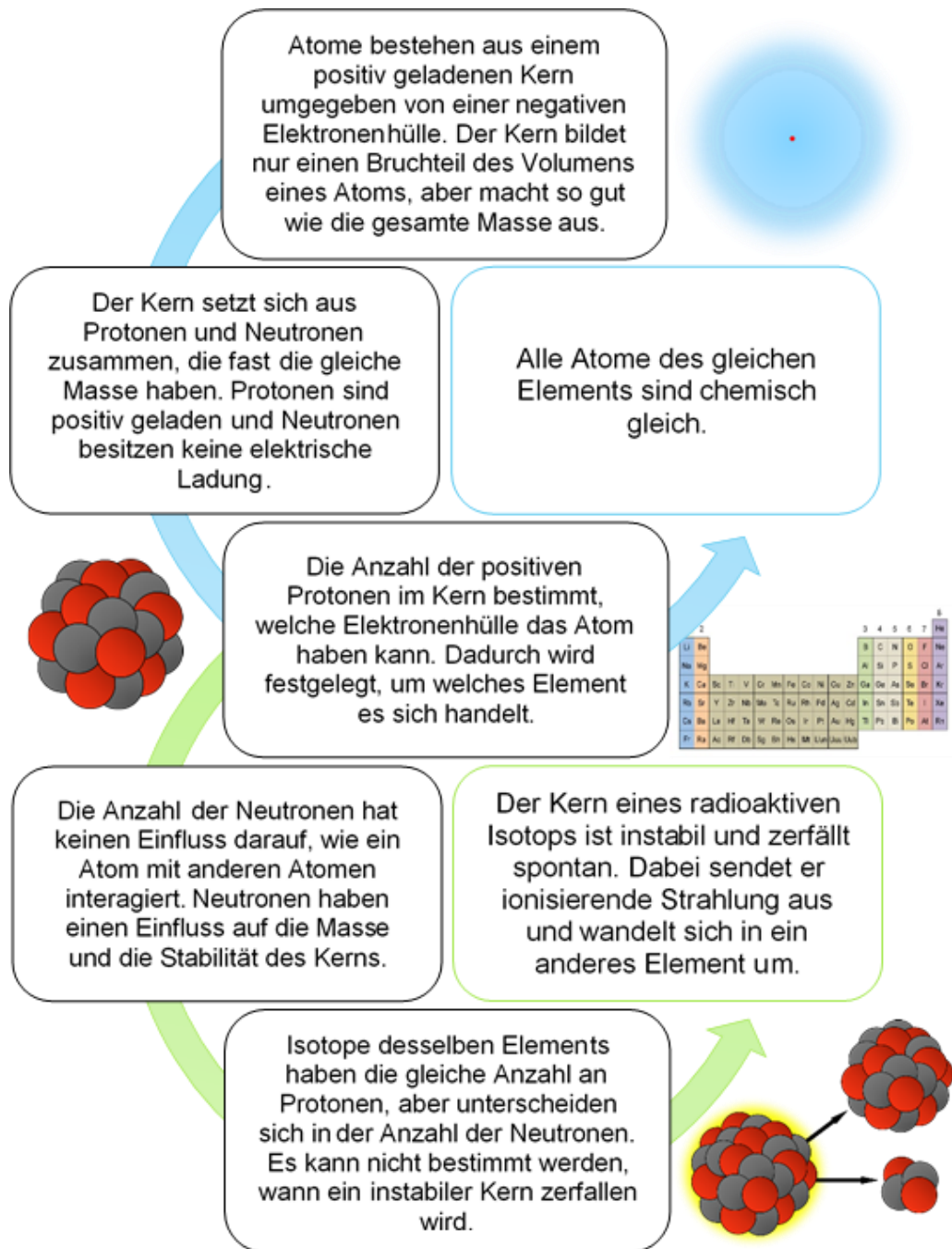


Abb. 9: Begriffsentwicklungsschema.

## 5.2 Primordiale Nukleosynthese

Die primordiale Nukleosynthese beschreibt die Entstehung der ersten Atomkerne. Sie hängt unmittelbar mit der Urknall-Theorie im Rahmen des *Standard-Modells des Universums* zusammen. 1929 entdeckte Edwin Powell Hubble die Rotverschiebung der Wellenlängen von Spektrallinien entfernter Galaxien, die er mit dem Dopplereffekt als Fortbewegung aller Galaxien von uns weg deutete (vgl. Demtröder 2014, S. 383). Zusammen mit der Überlegung, dass wir in einem unendlich ausgedehnten, sternerfüllten Universum keinen dunklen Nach-

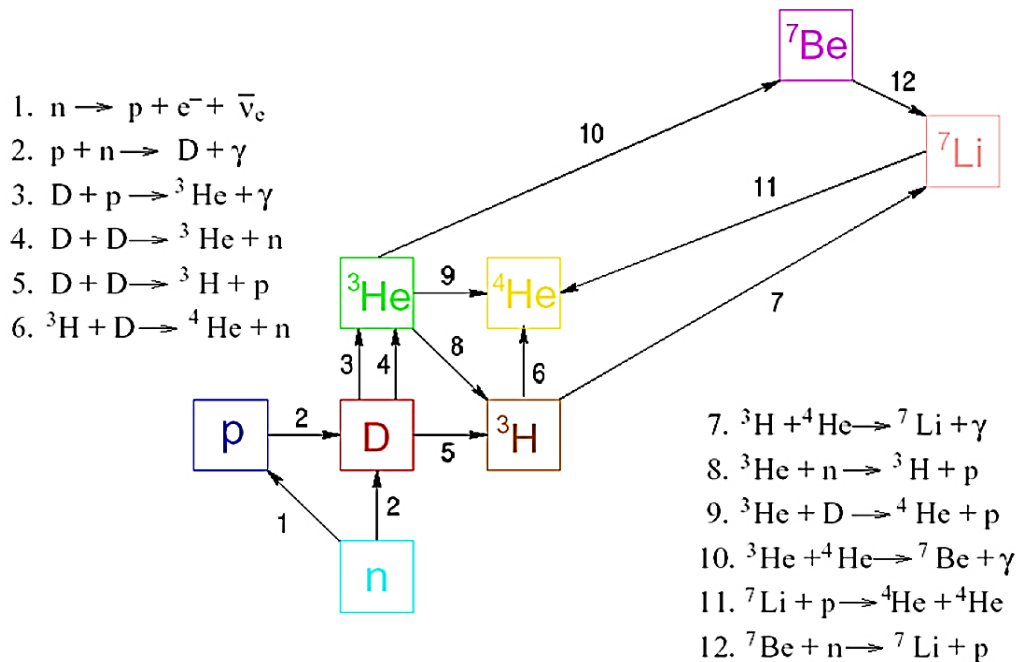
himmel hätten (*Olber'sches Paradoxon*), lässt sich von einem endlichen und expandierenden Universum ausgehen (vgl. ebd., S. 384). Das heißt im Umkehrschluss, dass sich das Universum zu Beginn in einem extrem dichten und heißen Stadium befand und wir es bis zur Gültigkeit bekannter physikalischer Gesetze zurückverfolgen können. Aus der heute gemessenen Strahlungstemperatur von 2,7 K lassen sich Temperaturen und Vorgänge bis kurz nach dem Urknall (Planck-Zeit von  $5,4 \cdot 10^{-44}$  s) angeben (siehe Tab. 2).

Zeitabschnitt	Zeit/s	Temperatur in K	Zustand
Planck-Ära	$t = 0$	?	Urknall. Alle vier Wechselwirkungen sind vereinigt.
GUT-Ära	$t = 10^{-43}$	$T = 10^{32}$	Gravitation entkoppelt.
Inflationäre Phase	$t = 10^{-35}$	$T = 10^{28}$	Starke und elektroschwache Wechselwirkungen separieren.
Quark-Ära	$t = 10^{-32}$	$T = 10^{25}$	Quark-Gluon-Plasma aus Quarks, Leptonen und Photonen.
Hadronen-Ära	$t = 10^{-12}$		Protonen, Neutronen und ihre Antiteilchen bilden sich. Neutrinos entkoppeln.
Leptonen-Ära	$t = 10^{-7}$	$T = 10^{12}$	Elektronen und Positronen zerstrahlen. Myonen zerfallen.
Nukleosynthese	$t = 1$ $t = 10$ $t = 3 \text{ min}$	$T = 3 \cdot 10^9$ $T = 10^9$	He-, D-, und Li-Kerne werden gebildet.

**Tab. 2:** Zeittafel der ersten drei Minuten des frühen Universums (nach Demtröder 2014, S.393).

Die primordiale Nukleosynthese setzt dort an, wo bei einer Temperatur von ca.  $10^{12}$  K Quarks und Antiquarks sich zu Protonen und Neutronen verbunden haben. Die hohe Dichte und Temperatur hält ein thermisches Gleichgewicht aufrecht, bei dem Protonen und Neutronen über Reaktionen mit Elektronen, Neutrinos und den entsprechenden Antiteilchen gleichwahrscheinlich ineinander übergehen. Die stetige Expansion des Universums lässt die Temperatur weiter bis auf  $9 \cdot 10^9$  K fallen, sodass sich der Massenunterschied bemerkbar macht und das Verhältnis zugunsten der Protonen kippt. Ab hier zerfallen freie Neutronen effektiv gemäß dem  $\beta^-$ -Zerfall mit einer Halbwertszeit von 887 s und werden nicht mehr neu gebildet (vgl. Gaßner 2008, S. 5). Das Verhältnis von Neutronen zu Protonen beträgt zu dieser Zeit ungefähr 0,14 oder eins zu sieben (vgl. Demtröder 2014, S. 396). Bis zu einer Temperatur von  $3 \cdot 10^9$  K zerfallen die aus einem Proton und einem Neutron fusionierten Deuteriumkerne (D) größtenteils durch die Anregung energiereicher Photonen. Sobald genügend Deuteriumkerne zur Verfügung stehen, werden  $^3\text{He}$ -Kerne und Tritiumkerne ( $^3\text{H}$ ) durch Fusion mit einem weiteren Proton oder Neutron gebildet (vgl. Gaßner 2008, S. 6). Ab

hier ist der Weg zu den stabileren  ${}^4\text{He}$ -Kernen sowie den leichten Elementen  ${}^7\text{Be}$  und  ${}^7\text{Li}$  über ein Netz aus Fusionsreaktionen offen (siehe Abb. 10).



**Abb. 10:** Wesentliche Kernreaktionen der primordialen Nukleosynthese (Gaßner 2008, S. 9).

Die Entstehung der leichten Elemente geht bis etwa 20 min nach dem Urknall weiter, solange die Temperaturen für Fusionen günstig sind. Es entstehen keine schwereren Elemente, da für die Massenzahlen fünf und acht keine stabilen Elemente existieren. Auch die instabilen Isotope  ${}^3\text{H}$  und  ${}^7\text{Be}$  zerfallen im Anschluss. Das Ergebnis der primordialen Nukleosynthese wird angegeben als:

$$Y_p = 0,2482$$

$$(D/H)_p = 2,54 \cdot 10^{-5}$$

$$({}^3\text{He}/H)_p = 1,04 \cdot 10^{-5}$$

$$({}^7\text{Li}/H)_p = 4,57 \cdot 10^{-10},$$

wobei  $Y_p$  das Verhältnis von  ${}^4\text{He}$  zu den restlichen Atomkernen angibt und die anderen Werte die Verhältnisse zu der Anzahl der Protonen darstellen (vgl. ebd., S. 7). Die primordiale Nukleosynthese sagt damit einen relativen Massenanteil von 25% Helium zur Gesamtmasse im Universum voraus, was den beobachteten Häufigkeiten entspricht (vgl. Demtröder 2014, S. 396).

Das elementare Prinzip während der Nukleosynthese nach dem Urknall liegt in der „Kondensation“ der Materie aus dem thermischen Gleichgewicht im Zuge der Expansion des Universums. Wie sich Wasser an den Wänden absetzt, wenn

die Duschkabine geöffnet wird und mehr Wasserdampf kondensiert als verdunstet, so ist auch die Materie aus Energie in der heißen Phase des Urknalls kondensiert und nicht „aus dem Nichts“ entstanden.<sup>2</sup>

Weitere Abkühlung des Universums führte zur Vereinigung der Atomkerne und Elektronen zu neutralen Atomen. Photonen wechselwirkten nicht mehr mit freien Elektronen und Protonen, sodass 380.000 Jahre nach dem Urknall von einer „Entkopplung von Strahlung und Materie“ (ebd.) gesprochen werden kann. Wir beobachten die zu dieser Zeit freiwerdende Strahlung als *kosmische Hintergrundstrahlung*, die uns nahezu homogen aus allen Richtungen erreicht. Die geringen Abweichungen deuten auf Materiedichteschwankungen in dieser frühen Phase des Universums hin. Für diese und spätere Strukturbildung wird die *dunkle Materie* verantwortlich gemacht, die nur über Gravitation mit der sichtbaren Materie wechselwirkt (vgl. ebd., S. 397).

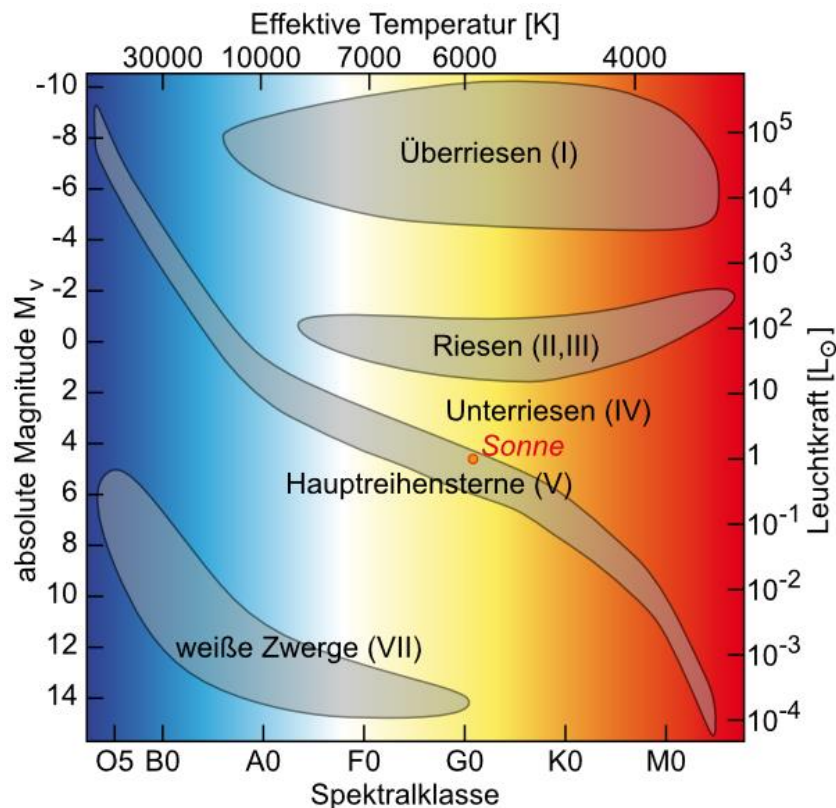
### 5.3 Stellare Brennphasen

Nach diesem sogenannten *Dunklen Zeitalter* kam Licht in das Universum, als die großen Gaswolken aus Wasserstoff und Helium unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabierten und in den aufgeheizten *Protosternen* die Kernfusion zündete. In Sternhaufen sind sie gleich alt, mit gleicher Zusammensetzung aber verschiedenen Massen, was sie zu Laboren für die Erforschung der Sternentwicklung macht (vgl. Röser & Schilbach 2011, S. 32). Die ersten Sterne waren Modellrechnungen zufolge viel massereicher (100 bis 1000 Sonnenmassen) und leuchtkräftiger als die Sonne. Dadurch sind sie wesentlich kurzlebiger (3 Millionen Jahre vs. 10 Milliarden Jahre) und explodieren am Ende ihres Lebens als *Supernovae* (vgl. Larson & Bromm 2002).

Der thermische Druck der Kernfusion wirkt der Kontraktion durch die Schwerkraft entgegen. In diesem stabilen Zustand fusioniert im Kern Wasserstoff zu Helium. Ein Stern verweilt in diesem Gleichgewichtszustand am längsten und wird *Hauptreihenstern* genannt. Der Begriff kommt aus der Einordnung der beobachteten Sterne im sogenannten *Hertzsprung-Russell-Diagramm*, wo sich die Mehrheit der Sterne auf einer Linie befindet (siehe Abb. 11).

---

<sup>2</sup> Analogie mit Wasserdampf und Nebeltröpfchen zu finden bei Weiss 2006.



**Abb. 11:** Schematische Darstellung des Hertzsprung-Russell-Diagramms (Henne & Kiehlmann 2011).

Ein Stern entfernt sich von der Hauptreihe in den oberen, rötlich hellen Bereich, sobald der gesamte Wasserstoff im Kern zu Helium fusioniert wurde. „Da nun kein nach außen gerichteter Strahlungsdruck mehr existiert, stürzen die äußeren Hüllen in Richtung des Kerns. Infolgedessen verdichten sich die inneren Bereiche und heizen sich so extrem auf, dass die Fusion nun in jener Schicht zündet, die den Kern umgibt“ (Maugeri, 2007, S. 33). Der Stern bläht sich auf und wird zu einem *Roten Riesen*. Die Wasserstoff brennende Schale läuft nach außen, während der Heliumkern anwächst. Bei einer kritischen Masse des Kerns von 0,45 Sonnenmassen beginnt die Heliumfusion (vgl. Henne & Kiehlmann 2011).

Abhängig von der Gesamtmasse können weitere *stellare Brennphasen* auftreten. Rote Riesen mit einer Masse kleiner als acht Sonnenmassen haben nicht die nötige Temperatur und Dichte, um im Kern die Fusion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu zünden. Die Fusion von Helium und Wasserstoff geht in den Schalen weiter, während sich der Stern mehrmals ausdehnt und zusammenzieht. Im Laufe der Zeit gehen große Anteile der Sternhülle verloren. Das abgestoßene Gas ist als *planetarischer Nebel* sichtbar, der Teil der interstellaren Materie wird. Übrig bleibt ein dichter, heißer Stern mit einer geringen Leuchtkraft, der als *weißer Zwerg* bezeichnet wird, indem keine Fusionsprozesse mehr stattfinden. Die

Entartung des Elektronengases – ein quantenmechanischer Effekt, der auf dem Pauli-Prinzip basiert und im sogenannten Fermi-Druck resultiert – hält den Stern stabil, solange die *Chandrasekhar-Grenze* von 1,44 Sonnenmassen nicht überschritten wird (vgl. ebd.).

Sterne mit einer Masse größer als acht Sonnenmassen erleben alle stellaren Brennphasen bis zum Eisenkern. Der Kern kollabiert, sobald die Fusion aufhört und kein Strahlungsdruck mehr dem Gravitationspotential entgegenwirkt. Die äußeren Schichten stürzen nach innen und der Kern implodiert unter dem enormen Druck (vgl. Maugeri 2007, S. 34). „Doch schon nach wenigen Bruchteilen einer Sekunde organisiert er sich in einer extrem dichten Packung neu und hört auf zu schrumpfen“ (ebd.). Die Verdichtung führt zur Erzeugung von Neutronen aus Protonen und Elektronen. Es entsteht ein Neutronengas, das weiteres auf den Kern einstürzendes Material reflektiert. „Ein riesiger Rückstoß entsteht, der das gesamte Material der äußeren Schichten ins All katapultiert – eine gigantische Explosion und eines der beeindruckendsten Schauspiele im Universum“ (ebd.). In dieser *Supernova* entstehen schwerere Elemente als Eisen. Sie reichern wiederum die interstellare Materie an, aus der neue, mit schweren Elementen angereicherte Sterne wie unsere Sonne entstehen.

Das innere wird während der Implosion zu einem *Neutronenstern*. Er hat bei einem Radius von 10 km eine Masse von bis zu drei Sonnenmassen. Es handelt sich im Wesentlichen um ein extrem dichtes Neutronengas. Überschreitet die Masse des Supernova-Überrestes etwa drei Sonnenmassen, kann dem Gravitationspotential keine kompensierende Kraft mehr entgegen gesetzt werden. Das Objekt kollabiert noch weiter und wird zu einem *Schwarzen Loch*. Innerhalb eines bestimmten Abstandes (dem *Ereignishorizont*) kann selbst Licht nicht mehr entweichen (vgl. Henne & Kiehlmann 2011).

Diese reduzierte Zusammenfassung hat keinen hohen astrophysikalischen Anspruch. Sie dient der knappen Beschreibung des *kosmischen Materiekreislaufs*, der mit dem Satz „Wir sind alle aus Sternenstaub“ abgekürzt werden kann. Unser Sonnensystem mit all seinen Elementen ist aus der interstellaren Materie entstanden, wohin die Überreste vieler Generationen ausgebrannter Sterne eingegangen sind (siehe Abb. 12).

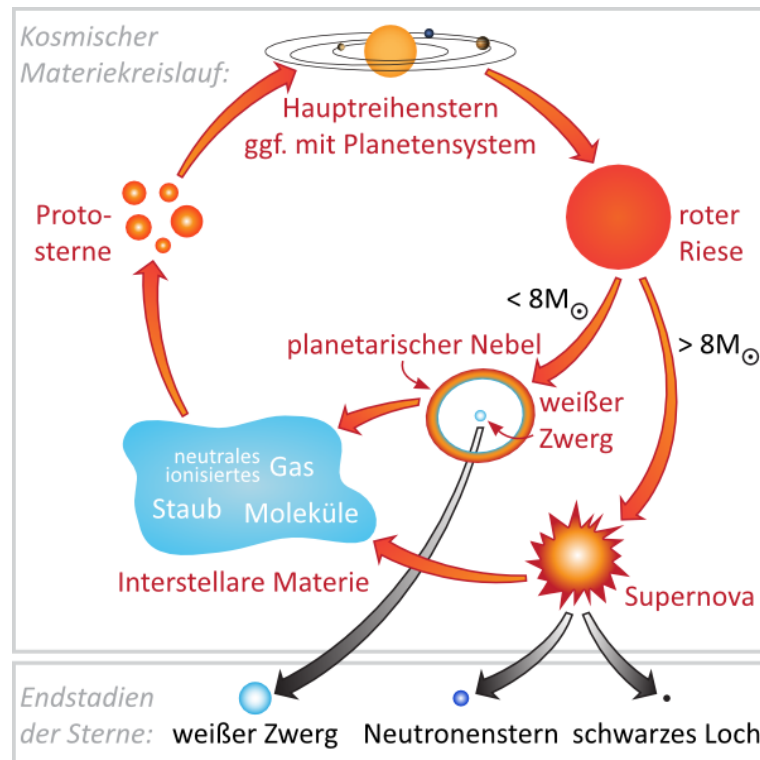
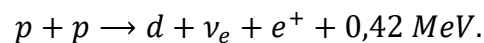


Abb. 12: Kosmischer Materiekreislauf (Henne & Kiehlmann 2011).

In folgenden Unterkapiteln werden kernphysikalische Aspekte, die zum Verständnis der Prozesse in den Sternen führen, erläutert.

### 5.3.1 Wasserstoffbrennen

Über die Energiequelle der Sonne gab es bis ins Jahr 1938 viele Spekulationen. Ernest Rutherford führte 1904 den radioaktiven Zerfall an und bezog erstmals die von ihm zu dieser Zeit erforschten Kernumwandlungen auf Sterne. Energiegewinnung durch Fusion von Protonen zu  $\alpha$ -Teilchen wurde plausibel, als Francis William Aston 1919 den Massendefekt bei Helium entdeckte. Rund 20 Jahre später rechnete Hans Bethe die *p-p-Reaktion* vor (vgl. Bleck-Neuhaus 2013, S. 335f):



Das ist die erste Reaktion der p-p-Kette (siehe Abb. 13), die effektiv vier Protonen zu einem Heliumkern, zwei Positronen und zwei Neutrinos fusionieren lässt.

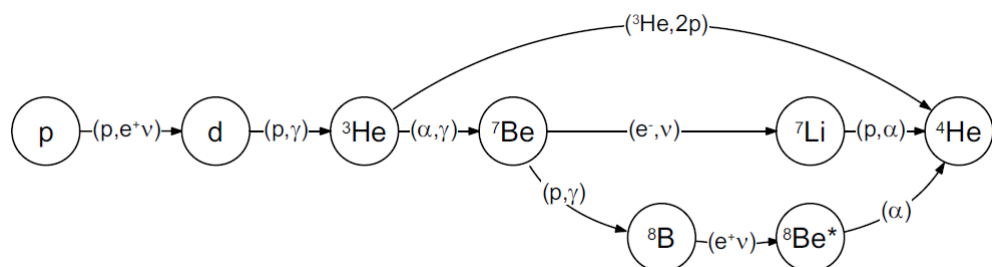
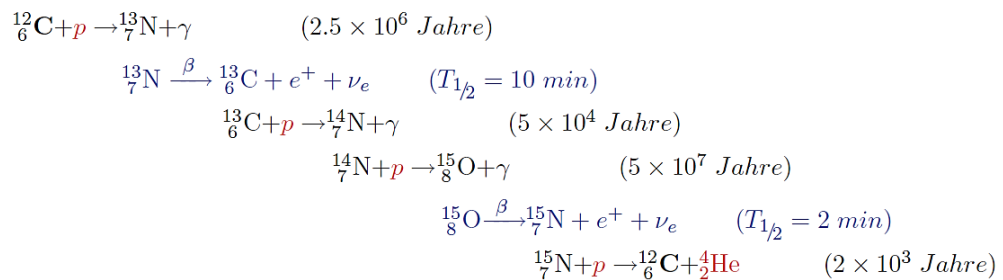


Abb. 13: Die p-p-Kette (Fey 2004, S. 30).

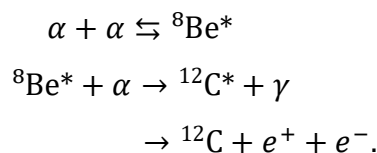
Damit eine Fusion stattfindet, muss nicht nur die Coulomb-Barriere mithilfe des Tunneleffekts überwunden werden, es erfordert auch das Mitwirken der schwachen Wechselwirkung, die ein Proton in ein Neutron umwandelt (vgl. Bleck-Neuhaus 2013, S. 366). Der Wirkungsquerschnitt für diese Reaktion ist somit äußerst gering, was die lange Lebenszeit unserer Sonne garantiert. In massereichen Sternen mit einer höheren Zentraltemperatur und vorhandener Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff Kerne gewinnt der sogenannte *CNO-Zyklus* mehr an Bedeutung. Die „schweren“ Elemente beschleunigen als Katalysator das Wasserstoffbrennen (siehe Abb. 14). Das ist einer der Gründe, weshalb Sterne mit größerer Masse eine kürzere Lebenszeit haben (vgl. ebd., S. 369).



**Abb. 14:** Der CNO-Zyklus. C, N und O bleiben in ihren Gleichgewichtskonzentrationen erhalten und katalysieren die Brutto-Reaktion  $4p \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 26,2 \text{ MeV}$  (vgl. Bleck-Neuhaus 2013, S. 368).

### 5.3.2 Heliumbrennen

Das Wasserstoffbrennen bringt noch keine neuen Elemente hervor. George Gamov ging nach der Urknall-Hypothese aus dem Jahre 1946 zunächst davon aus, dass alle Elemente aus dem heißen Plasma durch Expansion und Abkühlung in ihrer jetzigen Verteilung „eingefroren“ wurden. Dem widerspricht jedoch die Beobachtung von Sternen ohne schwere Elemente und ein schrittweiser Aufbau musste begründet werden (vgl. ebd., S.371f). 1953 wurde der *Tripel-Alpha-Prozess* vorgestellt, bei dem zeitgleich drei Heliumkerne aufeinandertreffen:

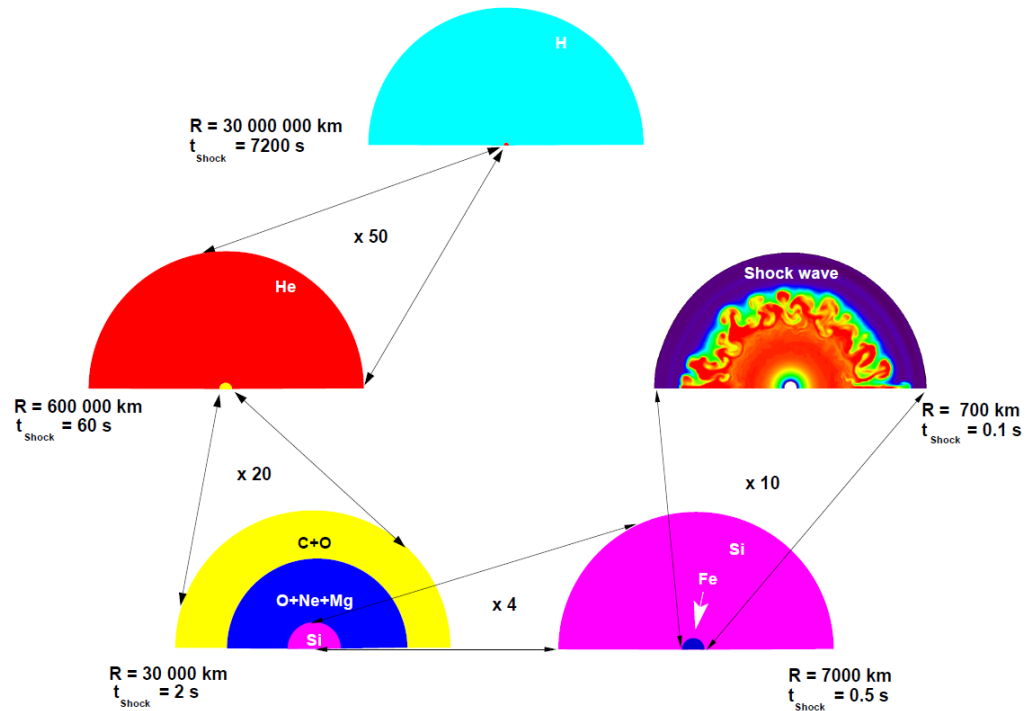


Das  ${}^8\text{Be}^*$  nimmt im ersten Schritt einen metastabilen Zustand an, der es dem dritten Heliumkern erlaubt  ${}^{12}\text{C}^*$  zu bilden, das sich in einem Resonanzzustand mit erhöhter Lebensdauer befindet. Das Heliumbrennen beginnt, nachdem sich im Zentrum eines Sterns genügend Helium angesammelt hat und Temperatur und Dichte für diesen Prozess hoch genug sind. Das setzt eine Sternmasse um die Hälfte der Sonnenmasse voraus. Bei diesen Temperaturen ist nachfolgend die



Reaktion  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  aber nicht mehr  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  möglich, sodass die Asche des Heliumbrennens aus  $^{12}\text{C}$  und  $^{16}\text{O}$  besteht (vgl. Fey 2004, S. 31f).

Fusionsprozesse, bei denen nacheinander Kohlenstoff, Neon, Sauerstoff und Silizium fusionieren, finden in immer kürzeren Brennphasen statt, solange die Temperaturen im Zentrum ausreichen. Die freiwerdende Energie erhöht die Temperatur in den Schalen, die sich nach außen schieben und eine „Zwiebelschalenstruktur“ ausbilden (vgl. Demtröder 2014, S. 350, siehe Abb. 15).



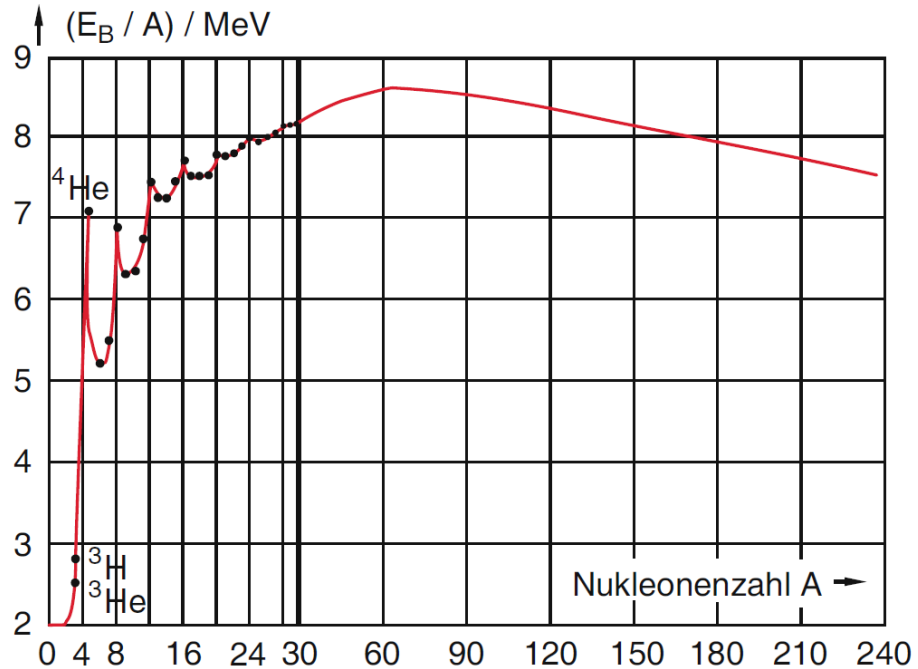
**Abb. 15:** Zwiebelschalenstruktur eines massereichen Sterns nach Erlöschen der letzten Fusionsenergiequelle mit Radien und Ankunftszeiten der Schockwelle während einer Supernova eines Sterns mit 15 Sonnenmassen (Kifondis 2000, S. 24).

Darüber hinaus findet keine Fusion mehr statt, da ab dem Bereich um 60 Nukleonen bei der Verschmelzung der Kerne keine Energie mehr frei wird. Das liegt daran, dass die Stärke der Kernbindung dort ihr Maximum erreicht.

### 5.3.3 Bindungsenergie pro Nukleon

Wird die Kernmasse aus den Messungen der Ionenmasse im Massenspektrometer bestimmt und mit der Summe der Neutronen- und Protonenmassen einzelner Nukleonen verglichen, kann ein systematischer *Massendefekt* festgestellt werden. 1920 war das der erste sichtbare Nachweis der Einstein'schen Gleichung  $\Delta E = \Delta mc^2$  aus dem Jahre 1905 (vgl. Bleck-Neuhaus 2013, S. 75). Die gegenüber ungebundenen Nukleonen fehlende Masse ist in die Bindungsenergie des gebundenen Kerns übergegangen. Dieselbe Energie muss dementsprechend auf-

gewandt werden, um einen Kern in seine Einzelteile zu zerlegen. Die Bindungsenergie steigt mit der Massenzahl an, weil mehr Nukleonen an der Bindung beteiligt sind. Erst bei der Betrachtung der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon wird die Stärke der Bindung offenbart (siehe Abb. 16).



**Abb. 16:** Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon als Funktion der Nucleonenzahl (Massenzahl A) (Demtröder 2014, S. 27).

Der Wert steigt zunächst mit steigender Nucleonenzahl unregelmäßig an und fällt ab dem Bereich um  $A = 60$ . Je größer die Bindungsenergie pro Nucleon ist, desto stärker ist jedes einzelne Nucleon an diesen Kern gebunden. Entsteht bei der Verschmelzung leichter Kerne ein stabilerer Kern, ist der Massendefekt dieses Kerns größer und die Differenz wird in Form von Strahlung frei. Umgekehrt wird in Kernkraftwerken durch Spaltung schwerer Kerne in leichtere Bruchteile Energie erzeugt.

Die Kernfusion in den Sternen ist damit in zweierlei Hinsicht für unsere Existenz verantwortlich: Sie ist die Energiequelle unserer Sonne und gleichzeitig für den Aufbau der Elemente zuständig, aus denen wir bestehen. Die Ausbildung beider Vorstellungen macht die fachliche Perspektive hinter den stellaren Brennphasen und der Sternentwicklung aus.

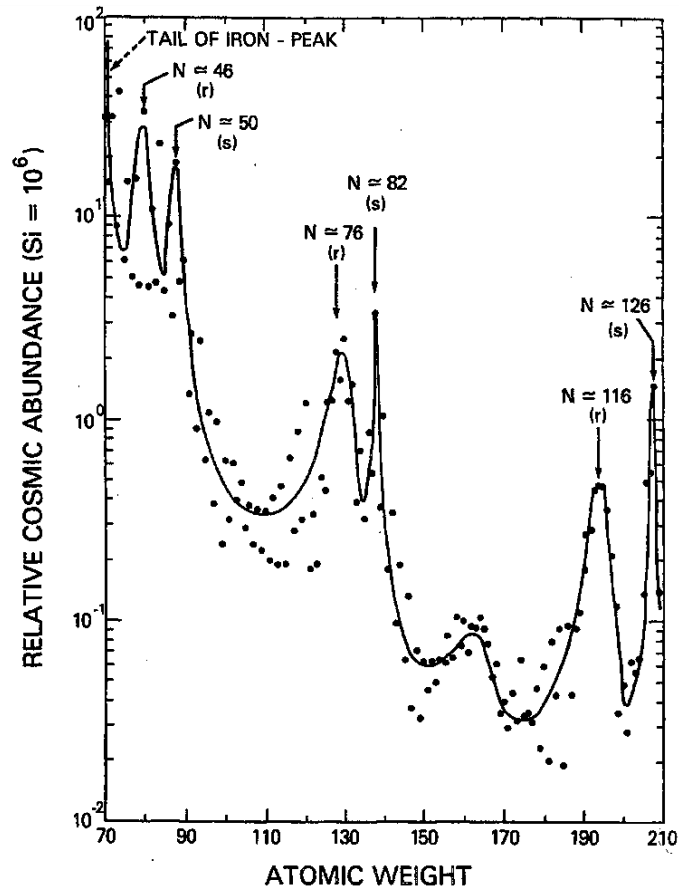
#### 5.3.4 Statistisches Gleichgewicht

Die Abnahme der Häufigkeit der Elemente, die in stellaren Brennphasen erzeugt werden, erklärt sich mit der Zunahme der Coulomb-Barriere für die Fusion der

nächsten Stufe. Die Häufigkeiten rund um Eisen bilden hingegen eine symmetrische Spitze (iron peak  $\approx 50 \leq A \leq 70$ ). Der Grund hierfür liegt in einem statistischen Gleichgewicht zwischen zwei gegensätzlichen Prozessen, die stabilere Kerne bevorzugen. Die Rede ist von der *Photodesintegration* während des Siliciumbrennens (vgl. Fowler 1988, S. 428). Druck und Temperatur sind in dieser Brennphase so hoch, dass neu gebildete Kerne mit niedrigen Bindungsenergien pro Nukleon durch energiereiche Photonen zum Zerfall angeregt werden. Sie senden  $\alpha$ -Teilchen, Protonen und Neutronen aus, die sich mit anderen Kernen verbinden können. In diesem Prozess der Vor- und Rückreaktionen werden Kerne mit höheren Bindungsenergien pro Nukleon häufiger gebildet und sie zerfallen seltener. Der Verlauf der relativen Häufigkeiten rund um Eisen (siehe Abb. 8) bildet den Verlauf der Bindungsenergien pro Nukleon in diesem Bereich nach (siehe Abb. 16). Hinter der Eisenspitze fängt ein langer Bereich an, der keinen starken Abfall der relativen Häufigkeiten mehr aufweist. Das zeugt von einem Entstehungsprozess, der nicht mehr von der Überwindung der größer werdenden Coulomb-Barriere abhängt. Einzelne Spitzen deuten auf Kernkonfigurationen hin, die von dem jeweiligen Entstehungsprozess bevorzugt werden, und die Nukleosynthese in diesen Bereichen „aufläuft“.

#### 5.4 Neutroneneinfang

Die auffälligen Doppelspitzen befinden sich bei Massenzahlen mit stabilen Kernen, deren Neutronenzahlen bei 50, 82 und 126 liegen. Bei diesen sogenannten *magischen Zahlen* haben die Separationsenergien für ein Neutron Maxima, ähnlich der Ionisationsenergien bei abgeschlossenen Elektronenschalen. Das führte 1950 Maria Goppert-Mayer und J. Hans D. Jensen zu einem Schalenmodell zur Erklärung der Kernstruktur (vgl. Demtröder 2014, S. 131f; Bleck-Neuhaus 2013, S. 320). Das verhalf 1957 Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, Willam Fowler und Fred Hoyle in ihrer Arbeit zur Synthese der Elemente in Sternen (bekannt als B<sup>2</sup>FH) den sukzessiven Neutroneneinfang und nachfolgende  $\beta$ -Zerfälle für die Entstehung der schweren Elemente vorzuschlagen. Die Spitzen der relativen Häufigkeiten (markiert mit r und s) deuteten auf zwei grundlegende Prozesse hin (siehe Abb. 17).



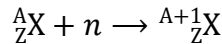
**Abb. 17:** Relative Häufigkeiten der schweren Elemente als Funktion der Massenzahl (Fowler 1988, S. 450).

Für diesen Ansatz sprechen mehrere Gründe (vgl. Fowler 1988, S. 451):

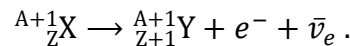
1. Wenige Saatnuklide aus der Eisenspitze reichen aus, um die Entstehung fast aller Elemente zu erklären.
2. In Sternen sind Phasen mit hohen Neutronenproduktionen durch die Reaktionen  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  und  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  möglich. Für die erste Reaktion sind hohe Temperaturen am Ende des Helium-Brennens nötig, die es nur in massereichen Sternen gibt. Die zweite benötigt  $^{13}\text{C}$  Kerne, die nur durch Vermischung der Wasserstoffschale mit den Gebieten des Heliumbrennens entstehen können. Diese komplexen Prozesse sind allerdings noch nicht vollständig beschrieben (vgl. Boyd 2008, S. 270f; Weiss 2012, S. 88).
3. Die Wirkungsquerschnitte für Neutroneneinfänge durch stabile Elemente steigen mit höheren Massenzahlen und haben Einschnitte bei den magischen Zahlen, was zu der flachen Häufigkeitsverteilung mit einzelnen Spitzen passt.
4. Das radioaktive Element Technetium ( $_{43}\text{Tc}$ ) kommt auf der Erde nicht mehr natürlich vor, da es vollständig zerfallen ist. Der Nachweis dieses Elements in Roten Riesen demonstriert, dass der Prozess der Nukleosynthese schwerer Elemente kontinuierlich weiterläuft und neues Technetium entsteht.

### 5.4.1 s-Prozess

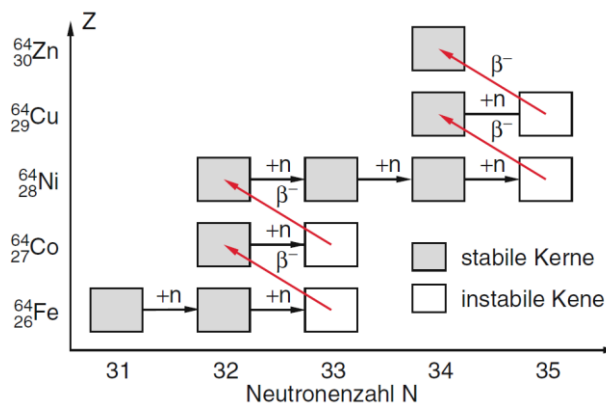
Bei einem Neutroneneinfang erhöht sich zunächst nur die Massenzahl



und es entsteht ein schwereres Isotop desselben Elements. Elemente können mehrere stabile Isotope haben, sodass weitere Neutroneneinfänge folgen können. Ist  ${}^{A+1}X$  instabil, liegt es in der Regel an einem relativen Neutronenüberschuss. Der energetisch günstigere Zustand wird daraufhin durch einen  $\beta^-$ -Zerfall erreicht, indem ein Neutron in ein Proton unter Abgabe eines Elektrons und eines Antineutrinos umgewandelt wird



Es entsteht ein neues Element mit einer um eins erhöhten Protonenzahl (siehe Abb. 18). Diese eindeutige Abfolge spielt sich nur in dem Fall ab, wenn die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Neutroneneinfängen viel größer ist als die Halbwertszeiten der erzeugten  $\beta$ -instabilen Nuklide. Das entspricht dem niedrigen Neutronenfluss während der Brennphasen in Roten Riesen und wird der *s-Prozess* genannt (slow). Durch den s-Prozess können keine stabilen Kerne mit mehr als 209 Nukleonen entstehen, da er aufgrund von  $\alpha$ -Zerfällen stets auf ein  ${}^{206}\text{Pb}$  zurückfällt (siehe Abb. 19).



**Abb. 18:** Aufbau der schweren Elemente durch den s-Prozess (Demtröder 2014, S. 434).

Po-208 $\alpha$ 2,9 a 261,249 pJ	Po-209 $\alpha$ 102,1 a 262,365 pJ	Po-210 $\alpha$ 138,4 d 263,592 pJ	Po-211 $\alpha$ 516 ms 264,321 pJ
Bi-207 $\beta^+$ 32,92 a 260,495 pJ	Bi-208 $\beta^-$ $3,1 \cdot 10^5$ a 261,598 pJ	Bi-209 $\alpha$ $1,90 \cdot 10^{19}$ a 262,794 pJ	Bi-210 $\beta^-$ 5,012 d 263,531 pJ
Pb-206 stabil 259,925 pJ	Pb-207 stabil 261,004 pJ	Pb-208 stabil 262,185 pJ	Pb-209 $\beta^-$ 3,253 h 262,816 pJ
Tl-205 stabil 258,763 pJ	Tl-206 $\beta^-$ 4,2 m 259,805 pJ	Tl-207 $\beta^-$ 4,77 m 260,903 pJ	Tl-208 $\beta^-$ 3,053 m 261,509 pJ
Hg-204 stabil 257,734 pJ	Hg-205 $\beta^-$ 5,2 m 258,643 pJ	Hg-206 $\beta^-$ 8,15 m 259,721 pJ	Hg-207 $\beta^-$ 174 s 260,256 pJ

**Abb. 19:** Ende des s-Prozesses (Rupp 2012, S.15).

Kennzeichnend für den s-Prozess ist seine Selbstregulierung, sodass über lange Zeiträume bei gleicher Temperatur und konstantem Neutronenfluss die Änderungsrate der absoluten Häufigkeit  $N_A$  null ist:

$$\frac{dN_A}{dt} = \sigma_{A-1}N_{A-1} - \sigma_A N_A = 0.$$

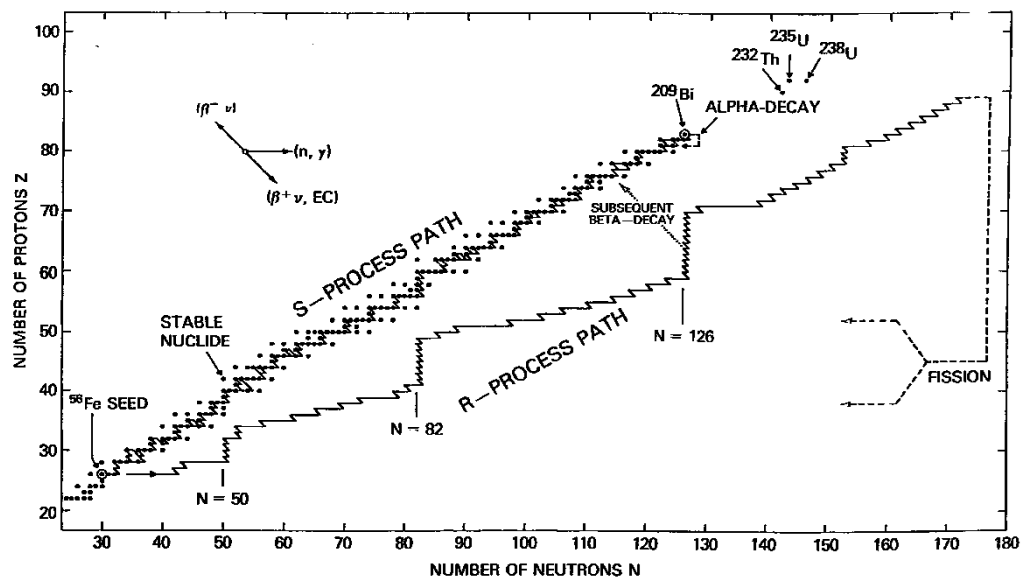
Die Produkte aus Wirkungsquerschnitt für einen Neutroneneinfang  $\sigma$  und Häufigkeit des Kerns sind für A und A - 1 in diesem Fall gleich:

$$\sigma_A N_A = \sigma_{A-1} N_{A-1} = \text{kontant.}$$

Das hat zur Folge, dass die Häufigkeit hauptsächlich von den Wirkungsquerschnitten für Neutroneneinfänge abhängt. Zwischen den magischen Zahlen lässt sich dieser Zusammenhang am besten beobachten, was den Syntheseprozess identifiziert (vgl. Fowler 1988, S. 463).

#### 5.4.2 r-Prozess

Die Entstehung vieler Nuklide bleibt mit dem s-Prozess allein unerklärt. Die 27 stabilen Nuklide unterhalb des „Tals der Stabilität“, die durch den s-Prozess nicht erreicht werden können, und auch diejenigen, die schwerer sind als  $^{209}\text{Bi}$ , werden dem *r-Prozess* zugeschrieben. Hier tritt der Fall ein, dass die Zeiten zwischen den Neutroneneinfängen wesentlich kürzer sind, als die Halbwertszeit der instabilen Nuklide. Vorstellbar ist solch ein hoher Neutronenfluss in der explosiven Umgebung einer Supernova. Der Entstehungsweg führt mit vielen aufeinanderfolgenden Neutroneneinfängen weit in den instabilen Bereich der Nuklidkarte (siehe Abb. 20).



**Abb. 20:** Entstehungswege des s- und r-Prozesses in der Nuklidkarte (Fowler 1988, S. 472).

Entstehende Nuklide erreichen den Randbereich, wo Neutroneneinfang ( $n, \gamma$ ) und Photodesintegration ( $\gamma, n$ ) im Gleichgewicht sind und eine Kette von  $\beta$ -Zerfällen einsetzt. In den Neutronenspalten der magischen Zahlen 50, 82 und 126 sind die Wirkungsquerschnitte für Neutroneneinfänge niedrig, sodass sich Wartestellen ausbilden. Bei nachfolgenden  $\beta$ -Zerfällen aus diesen Spalten entstehen größeren Häufigkeiten der stabilen Nuklide. Die Spitzen des r-Prozesses haben

aufgrund von kleineren Protonenzahlen in den Wartepunkten im Endeffekt kleinere Massenzahlen und eine breitere Verteilung als im s-Prozess, was mit den Beobachtungen übereinstimmt (vgl. Fowler 1988, S. 473; siehe Abb. 17).

Beide Prozesse überlagern sich. Einige Nuklide werden allerdings auf ihrem Entstehungsweg von anderen „abgeschirmt“, sodass ihre Häufigkeiten vom besonderen Interesse sind. Aus der Differenz der Beobachtungsdaten mit der berechneten Häufigkeit der *s-Kerne* wird eine Häufigkeitsverteilung für den r-Prozess abgeleitet, was als Rahmen für Modellierungen genommen wird (ebd., S. 469). Trotz allem gibt es noch viele unbekannte Faktoren, die Gegenstand aktueller Forschung bleiben. „Nahezu alle Kerne auf dem r-Prozesspfad sind so extrem neutronenreich, dass sie sich bislang nicht im Labor herstellen ließen und ihre Eigenschaften, verbunden mit inakzeptablen Unsicherheiten, theoretisch abgeschätzt werden mussten“ (Langke & Stöcker 2010, S. 45). In der neuartigen Beschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt werden diese Kerne in Zukunft hergestellt und untersucht. Die Daten werden unter anderem helfen die Bedingungen für astrophysikalische Umgebungen als potentielle Entstehungsorte einzuschränken (vgl. ebd.).

Darüber hinaus befinden sich auf der Nuklidkarte oberhalb des Stabilitätstals sogenannte *p-Kerne*, deren Häufigkeit um Größenordnungen niedriger ist als die der s- und r-Kerne. Es wird von einem ganzen Reaktionsnetzwerk aus Protoneneinfängen ( $p, \gamma$ ) und Neutronenemissionen ( $\gamma, n$ ) ausgegangen (vgl. Rapp 2004, S. 3). Gesicherte Vorstellungen der Entstehungsprozesse der p-Kerne hängen von den Forschungsergebnissen der anderen Prozesse ab, weshalb ihre Entstehung nicht thematisiert wird.

Es bleibt festzuhalten, dass es sich bei der Nukleosynthese schwerer Elemente um eine spannende und nicht vollständig gelöste Frage handelt. Die fachliche Perspektive, die mit diesem Themenbereich gefördert wird, zielt auf die wichtige Rolle der instabilen Nuklide bei der Entstehung der Materie. Der Aspekt der Kernumwandlung rückt in den Vordergrund. Außerdem lässt sich exemplarisch der Erkenntnisprozess aufzeigen. Anhand der Beobachtungsdaten wird ein passender kernphysikalischer Mechanismus modelliert, dessen Ergebnisse berechnet und mit den Daten wieder abgeglichen werden können.

## 6 Befragung

Mit dem Ziel themenspezifische Schülerperspektiven zu erfassen, wurde eine Befragung im Abiturjahrgang 2016 eines Gymnasiums in der Nähe von Frankfurt

	GK	LK	
Mädchen	13	2	15
Jungen	19	6	25
	32	8	40

**Tab. 3:** Vierfeldertafel der Befragten.

durchgeführt. Teilgenommen haben insgesamt 40 Schülerinnen und Schüler aus zwei Physik Grundkursen (GK) und einem Leistungskurs (LK) (siehe Tab. 3). Die Teilnahme erfolgte anonym und nach Einwilligung der Erziehungsberechtigten mit einer ca. 15-minütigen Bearbeitungszeit im Physikunterricht des jeweiligen Kurses. Durch mündliche Unterweisung und schriftlichen Hinweis am Anfang des Fragebogens wurde versucht, den üblichen Leistungsdruck und die Angst vor Fehlern zu minimieren. Den Schülerinnen und Schülern wurde klar gemacht, dass ihre ungenauen oder falschen Angaben helfen werden, den Unterricht für zukünftige Kurse zu gestalten. Dennoch wurde im Hauptteil mit offenen Fragen versucht, den Frustrationsgrad niedriger zu halten, als es mit einem geschlossenen Multiple-Choice-Test der Fall gewesen wäre.

### 6.1 Fragebogen

Auf einem zweiseitigen Bogen wurden Fragen zu Vorstellungen, Interessen und Vorkenntnissen platziert (siehe Anhang 1).

Die Befragten sollten zunächst ihre Vorstellungen eines Atoms und eines Atomkerns aufzeichnen. Auf diese Weise lassen sich nicht nur vorherrschende Atom- oder Kernmodelle erfassen, sondern auch kognitive Schichtenstrukturen zwischen den Vorstellungen zum Atom und Atomkern.

Danach folgen vier Antwortfelder für Vorstellungen zu den vier Grundbegriffen der Nukleosynthese:

- Chemische Elemente, ohne deren klaren Bedeutung die Frage nach ihrer Entstehung nicht sinnvoll verfolgt werden kann,
- Urknall, der die Startbedingungen für die Nukleosynthese festlegt,
- Sterne, die für die nötige Umgebung im weiteren Verlauf sorgen,
- Radioaktivität, die für viele Kernumwandlungen auf dem Weg zu den schweren Elementen verantwortlich ist.



Die Kenntnis der vorhandenen Konzepte zu diesen Begriffen ist für die Unterrichtsplanung unverzichtbar. Durch Anknüpfung an vorhandene Vorstellungen können Zielvorstellungen langfristig ausgebaut werden.

Auf der Rückseite soll das Interesse an den mit diesen Begriffen verbundenen Fragestellungen in einer 5-stufigen Skala (1: „gering“ – 5: „sehr groß“) angegeben werden. Das Ziel ist es, Abstufungen zwischen den Themengebieten auszumachen und das durch renommierte Studien bezeugte Interesse an astrophysikalischen Themen im kleinen Rahmen zu bestätigen. Alle vier formulierten Fragestellungen handeln von der Nukleosynthese, unterscheiden sich jedoch vom gewählten Kontext. Das Ergebnis soll bei der Planung des kontextstrukturierten Vorgehens helfen.

Im nächsten Abschnitt wird die Zustimmung zu inhaltlichen Aussagen rund um die Kernphysik abgefragt. Vorkenntnisse in diesem Bereich sind aus der Mittelstufe zu erwarten. Spezifisches astrophysikalisches Wissen kann dagegen nicht großflächig erwartet werden. Es wurden vier richtige, vier falsche und eine Aussage, die nach der persönlichen Meinung fragt, formuliert (siehe Tab. 4).

	Aussage	Fragestellung
richtig	Beim radioaktiven Zerfall finden Kernumwandlungen statt.	Wird durch den Fokus der Mittelstufe auf Strahlung die Kernumwandlung ausgeblendet?
	Es können mehrere stabile Isotope eines chemischen Elements existieren.	Ist die Unterscheidung der Elemente nach verschiedenen Isotopen bewusst?
	Radioaktivität hat einen natürlichen Ursprung.	Wird das natürliche Vorkommen/die natürliche Entstehung radioaktiver Nuklide realisiert?
	Wir sind auch im Alltag ionisierender Strahlung ausgesetzt.	Ist die natürliche Strahlungsbelastung bekannt?
falsch	Alle chemischen Elemente sind seit dem Urknall da.	Gibt es eine Vorstellung von der sofortigen Entstehung der Welt, wie wir sie kennen?
	Die ersten radioaktiven Kerne entstanden während der Kernspaltung des Urans.	Werden Physiker für die „Entstehung“ der Radioaktivität (und der negativen Folgen) verantwortlich gemacht?
	Radioaktiven Zerfall gibt es nur in der Nähe von Kernkraftwerken oder Atommülllagern.	Wird die Gefahr an bestimmte (in den Medien präsente) Orte gebunden?
	Die Kernfusion ist eine Energiequelle, die es außer in der Sonne in der Natur nicht gibt.	Wird die Sonne zu den Sternen gezählt, denen die Kernfusion ebenfalls als Energiequelle dient?

Meinung	Die Erforschung der Radioaktivität hat der Menschheit mehr geschadet als genutzt.	Wie ist die generelle Einstellung zur Radioaktivität? Kann nicht als „richtig“ oder „falsch“ gewertet werden!
---------	---	---

**Tab. 4:** Überblick über Aussagen und verfolgte Fragestellungen dahinter.

Zum Abschluss werden vier Diagramme zur Auswahl gegeben, die die Häufigkeit der Elemente im Universum zwischen dem leichtesten und dem schwersten Element beschreiben. Es soll sich zeigen, ob Schülerinnen und Schüler eine Ahnung haben, dass leichte Elemente wesentlich häufiger vorkommen als schwere und keine lineare Verteilung ergeben.

## 6.2 Ergebnisse

Die Hauptaufgabe bei der Auswertung war es, Gemeinsamkeiten in den zeichnerischen Darstellungen und schriftlichen Aussagen zu kennzeichnen und Kategorien zu bilden. Sie werden in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben und mit prozentualen Anteilen in Beziehung gesetzt. Es werden Unterschiede zwischen dem Leistungskurs und dem Grundkurs untersucht. Bei den Interessen wird es für sinnvoll gehalten, zusätzlich nach Mädchen und Jungen zu unterscheiden.

### 6.2.1 Atom- und Kerndarstellungen

Bei den Darstellungen des Atoms konnten fünf Kategorien gebildet werden. Die Unterscheidung begründet sich in der Darstellung der Atomhülle, die für die jeweilige Atomvorstellung ausschlaggebend ist:

#### A Bahnen (klassisches Planetenmodell, populäre Darstellung)

Mehrere Kreise mit ungefähr demselben Radius, die nicht in einer Ebene um den Kern platziert sind. Angelehnt an die Darstellungen des Modells von Elektronenbahnen im Planetenmodell ohne quantenmechanische Einschränkungen, die in vielen künstlerischen Darstellungen zu finden ist. Teilweise befinden sich Elektronen als Punkte oder Kreise auf den Bahnen.

#### B Schalen (Bohr'sches Atommodell)

Ein Kreis oder mehrere konzentrische Kreise in einer Ebene, die in verschiedenen oder gleichen Abständen um den Kern angeordnet sind. Teilweise werden auf oder zwischen den Kreisen Elektronen als Kugeln mit Minuszeichen oder als  $e^-$  eingezeichnet.

### C Elektronenwolke (Übergangsmodell)

Elektronen werden als Striche willkürlich in einer kugelförmigen Wolke um den Kern platziert. Deutet auf Teilchen mit unbestimmten Ort und Impuls hin. Kann als Vorstufe zu in einem Orbital aufgelösten Elektronen verstanden werden.

### D Orbitale (Orbitalmodell)

Mehrere Schleifen, die keulenförmig in verschiedenen Richtungen um ein Zentrum angeordnet sind. Angelehnt an die Darstellung von Kohlenstoff oder Sauerstoff im Orbitalmodell. Teilweise ohne sichtbaren Kern. Teilweise mit eingezeichneten Elektronen in oder auf den Orbitalen, was dem Modell hinter der Darstellung widerspricht.

### E Schalen und Orbitale (kombinierte Vorstellung)

Eine Überlagerung der Darstellungen von Kategorie B und D, die sich aufgrund von nicht abgeschlossenen individuellen Konzeptwechseln ereignen kann. Die Kennzeichen beider Modelle können wiedergegeben werden, aber ihre Unvereinbarkeit oder Abgrenzungen zueinander sind nicht bewusst.

Abbildung 21 zeigt jeweils einen Repräsentanten der fünf Kategorien. Die prozentuale Aufteilung der Kategorien ist in Abbildung 22 zusammenstellt.

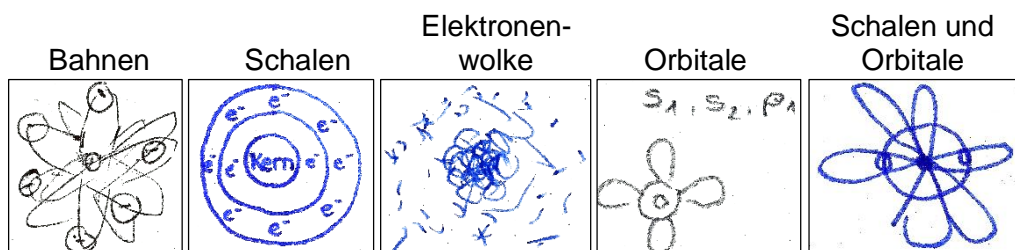


Abb. 21: Beispiele der fünf Kategorien der Atomdarstellungen A – E.

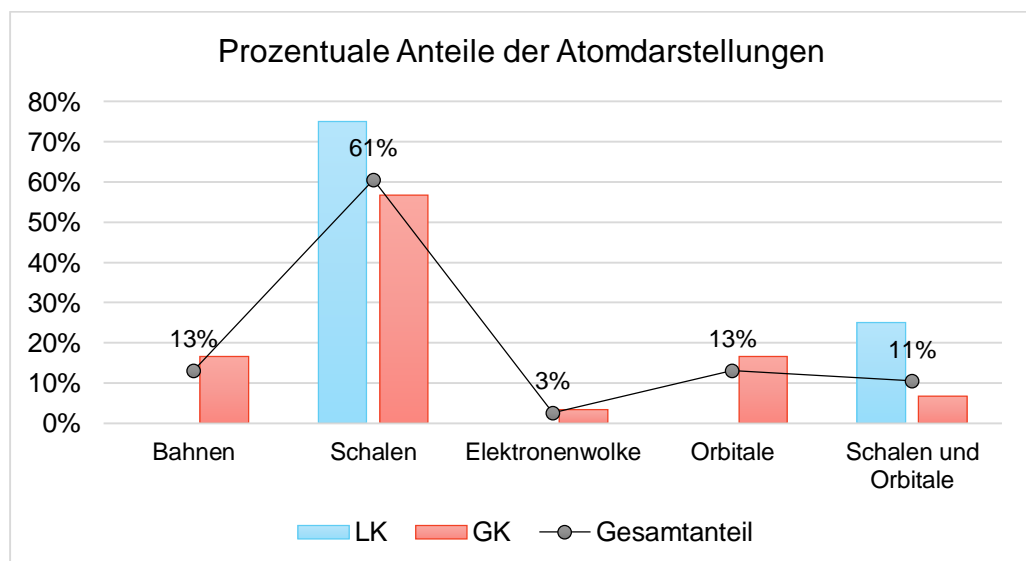


Abb. 22: Aufteilung der Atomdarstellungen nach fünf Kategorien.

Alle Angaben in diesem Abschnitt sind auf volle Prozent gerundet. Schwarze Punkte geben die Anteile bezogen auf 38 Atomdarstellungen<sup>3</sup> an. Blaue und rote Balken zeigen die Anteile getrennt nach LK und GK auf. Die Schalendarstellung ist sowohl im LK als auch im GK mehrheitlich vertreten. Der Grund könnte ihre Verwendung im Chemieunterricht sein, um die Elektronenkonfigurationen darzustellen. Orbitale bilden die zweithäufigste Darstellungsart, wenn kombinierte Darstellungen dazu gezählt werden. Die quantenmechanische Vorstellung setzt sich langsam durch und birgt sowohl im LK als auch im GK die Gefahr einer fehlenden Abgrenzung zwischen den Modellen.

Als Nächstes werden die Darstellungen des Atomkerns sowohl im Atom als auch in der separaten Zeichnung des Kerns unterschieden. Es konnten vier Kategorien für Kerndarstellungen bestimmt werden:

A Punkt (keine oder minimale Ausdehnung)

Ein äußerst kleiner, ausgemalter Kreis. Eine Vorstellung über die Struktur des Kerns ist entweder nicht vorhanden oder kann nicht angemessen dargestellt werden. Teilweise werden trotz allem verschiedene Kernbausteine mit  $n$  und  $p$  unterschieden.

B Kugel (deutliche Ausdehnung)

Ein größerer Kreis als bei A, häufig nicht ausgemalt und enthält Pluszeichen und/oder Buchstaben  $n$  und  $p$ . Die Vorstellung eines ausgedehnten Objekts und seiner Bestandteile ist vorhanden, aber ihre geometrische Anordnung und ihr Aussehen kann nicht weiter spezifiziert werden.

C Eingeschlossene Kugeln (Struktur in einem kugelförmigen Kern)

Einzelne Kugeln, die sich nicht berühren, liegen in einer Ebene und sind von einem Kreis umschlossen. Sie sind häufig als Protonen und Neutronen gekennzeichnet. Dieses Bild wirft die Frage auf, was der Kreis in ihrer Umgebung darstellen soll. Solche Darstellungen werden in Lehrbüchern verwendet (vgl. Povh, Rith, Scholz & Zetsche 2009, S. 2; Demtröder 2014, S. 19). Vermutlich wird damit die Grenze eines nahezu homogenen, kugelförmigen Kerns angedeutet, der bei größerer Auflösung Strukturen in Form von einzelnen Protonen und

---

<sup>3</sup> Zwei Bögen aus dem GK enthielten keine Zeichnungen.

Neutronen aufweist. Diese Darstellung lässt sich im Rahmen des Tröpfchenmodells verwenden, benötigt allerdings eine Interpretation der gezeichneten Kerngrenze.

#### D Kugelpackung (Tröpfchenmodell)

Mehrere dicht beieinander liegende Kugeln. Teilweise zur Unterscheidung von Neutronen und Protonen ausgemalt oder beschriftet. Eine räumliche Struktur ist deutlich zu erkennen. Diese Darstellung wird für die Illustration von Kernreaktionen gewählt, wie sie während der Nukleosynthese auftreten. Im Rahmen des Tröpfchenmodells lässt sich das Bild der Zusammenballung einzelner Nukleonen, die durch Kernkräfte zusammengehalten werden, gut verwenden.

Abbildung 23 zeigt jeweils einen Repräsentanten der vier Kategorien. Die prozentuale Aufteilung der Kerndarstellungen im Feld für den Atomkern ist in Abbildung 24 zu sehen.

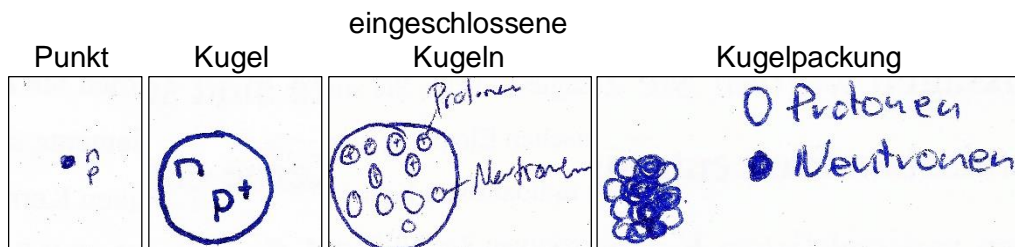


Abb. 23: Beispiele der vier Kategorien der Kerndarstellungen A – D.

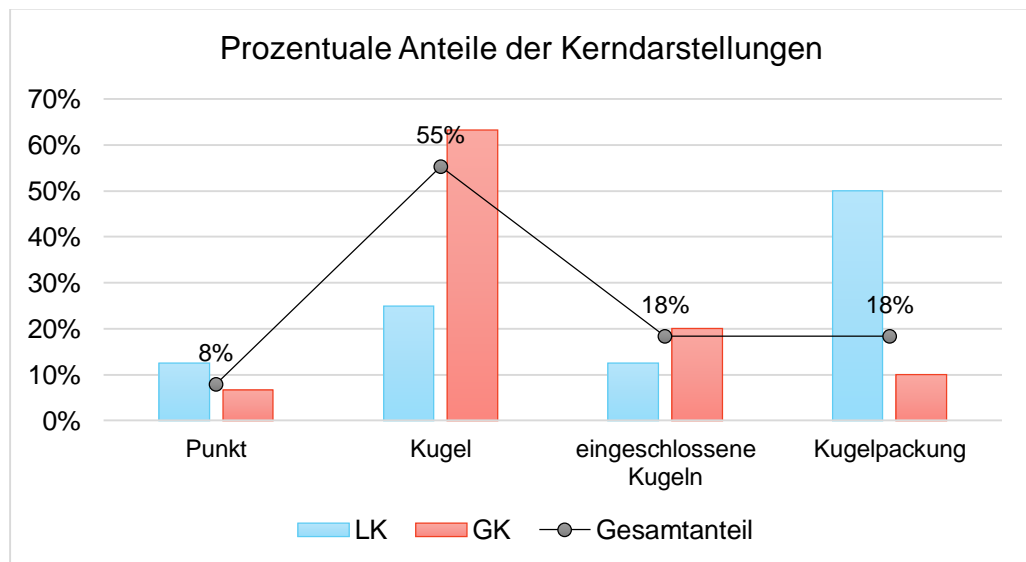


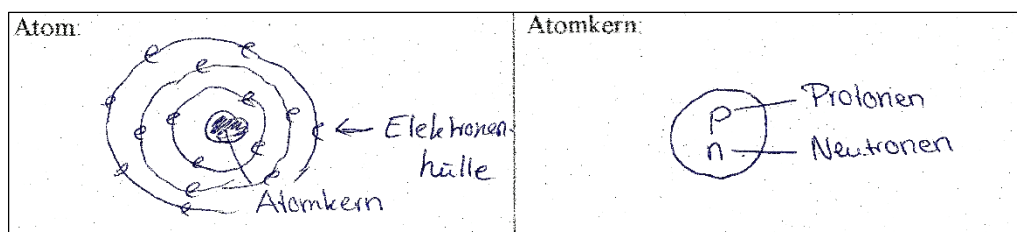
Abb. 24: Aufteilung der Kerndarstellungen nach vier Kategorien.

Die Darstellungsmöglichkeiten des Kerns bilden wie die Atomdarstellungen eine Hierarchie. Beim Atom wird einen Wechsel von klassischen Atombildern zu einem quantenmechanischen Verständnis angestrebt. Bei den Kerndarstellungen handelt es sich stattdessen um unterschiedliche Grade der Strukturauflösung.

Diese Entwicklung fand während der Erforschung des Atomkerns durch Streuversuche mit größeren Energien statt.

Die Aufteilung zeigt ein interessantes Bild: Während im Grundkurs der Großteil die Vorstellung einer strukturlosen Kugel besitzt, ist im LK die Hälfte bei der Ansammlung mehrerer kugelförmiger Kernbausteine angelangt. Auf den Gesamtanteil hat das aufgrund der kleinen Kursgröße keinen großen Einfluss. Um den Ursprung und die Bedeutung der Kategorie C zu erklären, müssten Interviews geführt werden.

Werden auf einem Fragebogen verwendete Atom- und Kerndarstellungen verglichen, sind Elektronenschalen und der kugelförmige Kern am Häufigsten. (siehe Tab. 5). Diese typische Kombination wird von dem Beispiel in Abbildung 25 repräsentiert.



**Abb. 25:** Kugelförmiger Atomkern ohne Struktur wird von einer aus Schalen aufgebauten Elektronenhülle umgeben. Bei der Darstellung des Kerns ohne Elektronenhülle wird auf die Bestandteile verwiesen. Eine räumliche Anordnung der Nukleonen ist nicht zu erkennen.

Atomdarstellung →	Bahnen	Schalen	Elektronenwolke	Orbitale	Schalen und Orbitale
Kerndarstellung ↓					
Punkt	0%	3%	0%	5%	0%
Kugel	8%	42%	0%	3%	3%
eingeschlossene Kugeln	3%	5%	0%	5%	5%
Kugelpackung	3%	11%	3%	0%	3%

**Tab. 5:** Matrix verwendeter Atom- und Kerndarstellungen auf einem Fragebogen.

Werden nur Kerndarstellungen verglichen, hat die Verwendung der Kugel in beiden Bildern den größten Anteil (siehe Tab. 6). Allgemein wechselt die Mehrheit die Darstellung des Kerns zwischen den Bildern nicht (57,5% zu 42,5%). Das deutet darauf, dass für die Unterscheidung Atom und Atomkern noch keine kognitiven Schichtenstrukturen existieren. Die zweitgrößte Gruppe (ca. 13%) wechselt von einer Kugel zur Kugelpackung, wenn es allein um den Kern geht. Die überwiegende Mehrheit derer, die verschiedene Darstellungsmöglichkeiten verwenden, wechselt von einer einfacheren zu einer detaillierteren Kerndarstellung, was durch die roten Felder in Tabelle 6 deutlich wird.

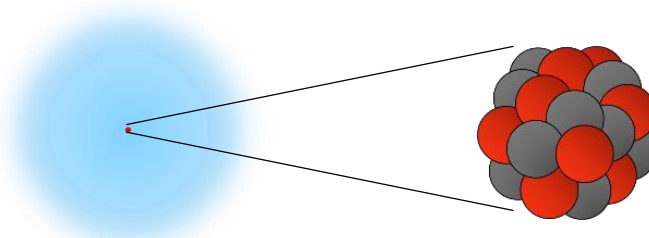
Kern ...

... in Atomdarstellung →	Fehlt	Punkt	Kugel	eing. Kugeln	Kugel -packung
... in Kerndarstellung ↓					
Fehlt	5%	0%	0%	0%	0%
Punkt	5%	3%	0%	0%	0%
Kugel	5%	3%	43%	0%	3%
eingeschlossene Kugeln	0%	5%	10%	3%	0%
Kugelpackung	0%	0%	13%	0%	5%

Tab. 6: Matrix der Kerndarstellungen in beiden Zeichnungen.

Dieser Darstellungswechsel zwischen Atom mit Elektronenhülle und Atomkern, sollte gefördert werden. Obwohl Quantenobjekte in keiner Weise realistisch abgebildet werden können, hilft die Erzeugung behaltenssteigernder Vorstellungsbilder bei dem Aufbau mentaler Modelle (vgl. Kircher & Girwidz 2009, S. 221). Die Atomdarstellung sollte den Kern auf eine Weise beinhalten, dass der enorme Größenunterschied nicht ausgeblendet wird. Die Elektronenhülle kann in Form von Orbitalen, sofern ein konkretes Atom abgebildet wird, oder als verwaschene Ladungswolke dargestellt werden, die den unbestimmten Aufenthaltsort der Elektronen unterstreicht. Die separate Kerndarstellung mit „größerer Auflösung“ sollte Protonen und Neutronen beinhalten, wobei auf eine kugelsymmetrische Form zu achten ist (siehe Abb. 26).

Atom mit positiven Kern  
und negativer Elektronenhülle



Atomkern aus Protonen und Neutronen

Abb. 26: Vorschlag für einprägsame Vorstellungsbilder.

## 6.2.2 Grundvorstellungen

Bei der Auswertung der schriftlichen Antworten zu den vier Grundbegriffen wurden ebenfalls Kategorien gebildet. Diese teilen sich nicht nach „Fehlvorstellungen“ und fachlich richtigen Aussagen auf. Vielmehr beinhalten sie unterschiedliche Perspektiven auf den jeweiligen Begriff. Innerhalb jeder Kategorie können sowohl vertretbare als auch problematische Vorstellungen auftreten.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Zur Vermeidung der überschüssigen Verwendung von Anführungszeichen werden wortgleiche und sinnhafte Wiedergabe von Schüleräußerungen in diesem Abschnitt *kursiv* gedruckt.

Ebenso können in der Antwort einer Person mehrere Perspektiven aufgegriffen werden. Chemische Elemente werden nach drei Gesichtspunkten unterschieden:

#### A Steht im Periodensystem

Das Periodensystem wird explizit genannt, in dem die Elemente *angeordnet* sind, *aufgezählt* oder *zusammengetragen* werden, dort *vorkommen*, sich *befinden* oder *stehen*. Es wird kein chemisches oder physikalisches Unterscheidungsmerkmal genannt, das eine „Anordnung“ erklären würde. Nicht selten werden die Elemente *durch das Periodensystem definiert*, was eine menschliche und keine natürliche Unterscheidung der Materie impliziert.

#### B Grundstoff

Die Elemente bilden *Grund- oder Reinstoffe*, die *verschiedene Eigenschaften* haben und *nicht aus anderen Elementen bestehen*. Aus ihren Verbindungen entstehen *neue Stoffe*. Sie erlauben *Aussagen über Eigenschaften und Verhalten bei Reaktionen* zu machen. Dieses Konzept kann als die „chemische Sichtweise“ verstanden werden. Es finden sich problematische Aussagen über *Verbindungen von verschiedenen Atomen* oder den Elementen, die *durch Reaktionen vielfältig entwickelbar* sind.

#### C Beschreibung auf atomarer Ebene

Ein chemisches Element ist ein Atom mit einer *exakten* oder *klar definierten* Anzahl an Elektronen und Protonen. Eine *abweichende Neutronenzahl* macht daraus ein *Isotop*. Sie unterscheiden sich *in Masse* und haben *jeweils eine Ladungszahl*. Diese Sichtweise beinhaltet das Ordnungsprinzip auf atomarer Ebene oder gibt zumindest an, dass eine Menge eines Elements *aus gleichen Atomen* besteht. Problematisch können Aussagen über ein *Atom bzw. Molekül, welches nur aus einem Element besteht*, sein.

Beim Urknall gibt es zwei verschiedene Zugänge oder eine ablehnende Haltung:

#### A Entstehungsprodukte

Eine Sichtweise, die sich um die verschiedensten Entstehungsprodukte des Urknalls dreht. Genannt werden unter anderem: *Welt, Weltall, Universum, Raum, Zeit, Materie, Gase, Menschheit und Leben, Galaxien, Erde mit Atmosphäre* und der *Kosmos*. Es finden sich auch speziellere Antworten über *Energie, woraus Materie entstand* oder *2 Elemente, die durch Kernfusion oder Zerfall neue Elemente entstehen ließen*.



### B Entstehungsprozess

Hier versuchen Schülerinnen und Schüler Prozesse während des Urknalls zu beschreiben. Die Spannweite der Ausführungen ist groß. Angefangen von *Er war mal da* und *Anfang von allem* bis *Mehrere größere Meteoren treffen aufeinander und durch den Zusammenstoß entstand die Welt* oder *Geburtsstunde des Sonnensystems*, wo eine *Kollision die Planeten entstehen ließ*. Es wird vereinzelt der Raum beschrieben, der sich *schneller als die Lichtgeschwindigkeit* ausbreitet, und eine schlagartige *Ausdehnung* oder *Ausbreitung von Materie*. Interessant ist auch die Explosion, bei der ein *Klumpen aus Atomkernen und Elektronen ohne Abstand auseinander gesprengt* wurde.

### C Ablehnung

Eine mehr oder weniger ernst zu nehmende Haltung, die sich in der Aussage, der Urknall sei *eine Lüge, da Gott die Welt in sieben Tagen erschuf*, widerspiegelt. Eine andere Person behauptet nichts über den Urknall zu wissen, *da keiner genaueres darüber weiß*. An dieser Stelle wird deutlich, dass es wichtig ist, den Erkenntnisprozess in der Kosmologie und Astrophysik zu erläutern.

Angaben zu Vorgängen in Sternen lassen sich zunächst in mikroskopische Prozesse (A) und ihre makroskopischen Auswirkungen (B) einteilen. Bei den mikroskopischen Prozessen zeichnen sich drei Gruppen ab:

#### A1 Kernfusion

Die Angabe beschränkt sich in den meisten Fällen nur auf dieses eine Wort. Vereinzelt wird *Wasserstoff zu Helium* dazugeschrieben.

#### A2 radioaktiver Zerfall

Hier werden anstatt der Kernfusion Zerfallsprozesse vermutet, bei denen *Atome zerfallen und radioaktive Stoffe aussenden* oder *Kernspaltungen* stattfinden.

#### A3 chemische Reaktion

Vereinzelt werden *irgendwelche chemischen Reaktionen* in den Sternen vermutet. Interessant ist, dass alle drei Prozessarten im Laufe der Geschichte in umgekehrter Reihenfolge in den Sternen vermutet wurden. Im Rahmen eines genetischen Zugangs sollten alle drei Vorschläge diskutiert werden.

## B Makroskopische Auswirkung

Es wird vor allem im Zusammenhang mit Kernfusion von *Energieumwandlung*, *Freisetzung von Energie*, *Licht* oder *Wärme* gesprochen. Auch andere makroskopische Vorgänge werden beschrieben wie *Sternsterben* → *Supernova*, *Stern verbrennt?* und *Explosionen und dann leuchten*. In einer speziellen Antwort wurden Sterne als *zerfallene Planeten, deren Explosionen so hell und doch so weit weg sind, dass die Erscheinung bzw. das Licht Jahrhunderte dauert bis es hier „ankommt“ bzw. erlischt*, beschrieben.

Bei der Radioaktivität gibt es drei verschiedene Kategorien, die sich jeweils um einen bestimmten Aspekt konzentrieren:

### A Strahlung

In dieser Kategorie wird in erster Linie Strahlung erwähnt. Teilweise steht nur dieses ein Wort und in manchen Fällen noch  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - oder *radioaktive Strahlung*. Es werden die *Entdecker Pierre und Marie Curie* genannt und dass radioaktive Stoffe Strahlen aussenden. Die Aussagen in dieser Kategorie sind meistens nicht wertend. Eine nicht unproblematische Beschreibung nennt als Ursache *Elemente*, die *Elektronen mit hoher Energie* haben, sodass sie *Sachen zerstören* können oder *reaktive Teilchen, die dann weiterreagieren*, bilden.

### B Anwendungen und Folgen

Hier werden zahlreiche technische Anwendungen und negative gesundheitliche Folgen aufgezählt. Die Aussagen erstrecken sich von *giftig* und *gesundheitsschädlich* bis *Pflanzen und Tierzellen zerstören* und *Mutationen der Gene bei Lebewesen*. Krebs und die Katastrophen von Tschernobyl und Fukushima werden genannt. Die Worte *Atommüll*, *Atomkraft (günstig, aber hohes Risiko)* und *Atombombe* gehören im Gegensatz zu den fachlich richtigen „Kernkraft“ oder „Kernenergie“ zum festen Sprachgebrauch. Problematische Beschreibungen, die die Gleichsetzung von Strahlung und Teilchen widerspiegeln, finden sich hier: *Entstehende radioaktive Teilchen sind sehr aggressiv und können andere Materialien zerstören*.

### C Kernumwandlung

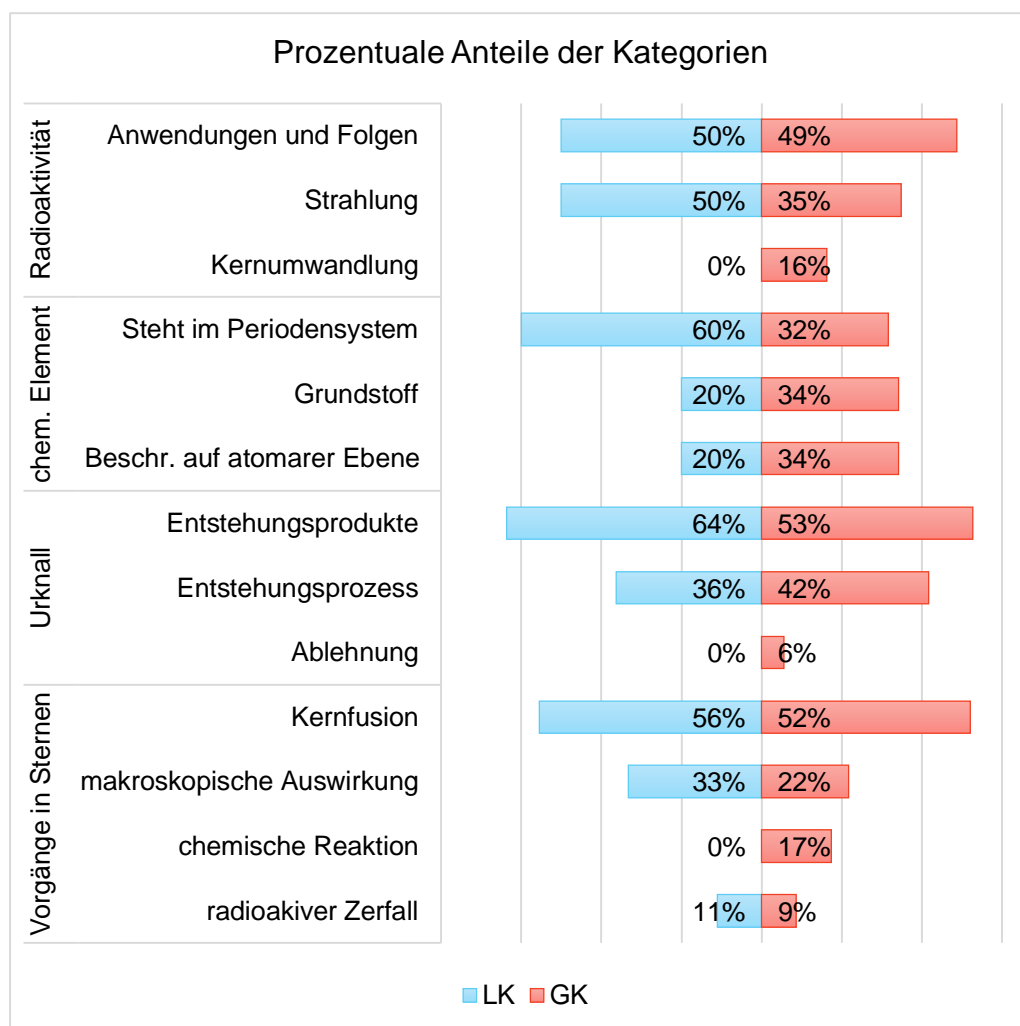
Die letzte Kategorie verbindet Aussagen über die *Veränderung von Atomkernen*, wie den *Zerfall von Stoffen* oder den *Zerfall von Atomen in kleinere Elemente*. Teilweise wird Radioaktivität als Folge von *Kernspaltungen* oder *Kernfusionen*

genannt. Veränderungen in der Kernzusammensetzung blieben bis auf die problematische Äußerung, dass sich *Neutronen aus dem Atomkern lösen*, unerwähnt. Für die quantitative Auswertung wurden die Aussagen der Schülerinnen und Schüler auf einzelne Kategorien verteilt. Jede Kategorie bekam einen Punkt pro Fragebogen, sobald in der Antwort die Perspektive dieser Kategorie aufgegriffen wurde. Das Vorgehen ist von Qualität und Umfang der Äußerungen unabhängig. Das ist dem Ziel geschuldet, vorherrschende Schülerperspektiven zu bestimmen, wie sie für die Didaktische Rekonstruktion benötigt werden, und keine Wertung einzelner Schülerinnen und Schüler vorzunehmen. Insgesamt konnten 183 Punkte verteilt werden.<sup>5</sup> Ihre Anzahl variiert von Fragestellung zu Fragestellung. Es wurden zur Radioaktivität die vielfältigsten Angaben gemacht (29%), dicht gefolgt von den chemischen Elementen (28%) und dem Urknall (26%). Nur 17% der registrierten Äußerungen bezogen sich auf Vorgänge in Sternen, was auf wenig Erfahrung in diesem Bereich schließen lässt.

Eine Übersicht über prozentuale Anteile jeder einzelnen Kategorie, aufgeteilt nach LK und GK, befindet sich in Abbildung 27. Die Kategorien sind gemäß ihrer Häufigkeit sortiert. Die Daten bestätigen die Vermutung, dass mit Radioaktivität vorwiegend Strahlung und ihre negativen Folgen assoziiert werden. Die physikalischen Ursachen dahinter werden seltener genannt oder sind nicht bewusst. Bei den chemischen Elementen sind alle drei Perspektiven ungefähr gleich verteilt. Im Hinblick auf die Zahl der Antworten, die sich auf den Bezug zum Periodensystem der Elemente beschränkte (besonders im LK), sollte sowohl die chemische als auch die physikalische Einordnung des Begriffs gefördert werden. Beim Urknall ist die Perspektive einer nicht weiter erläuterten Theorie zur Entstehung der Welt vorherrschend. Zum Entstehungsprozess können weniger Antworten zugeordnet werden und nur einzelne Befragte können zutreffende Vorgänge schildern. Dass in den Sternen Kernfusionen stattfinden, ist zwar die häufigste Antwort, aber es können keine Details genannt werden. Es wird teilweise von Energie, Licht, Wärme und Explosionen gesprochen, aber nicht über die Entstehung neuer Elemente mittels Kernfusion. Ein kleinerer Teil vermutet Zerfallsprozesse und chemische Reaktionen in den Sternen.

---

<sup>5</sup> Entspricht im Schnitt 4,6 Kategorien pro Fragebogen oder 1,1 Kategorien pro Fragestellung.



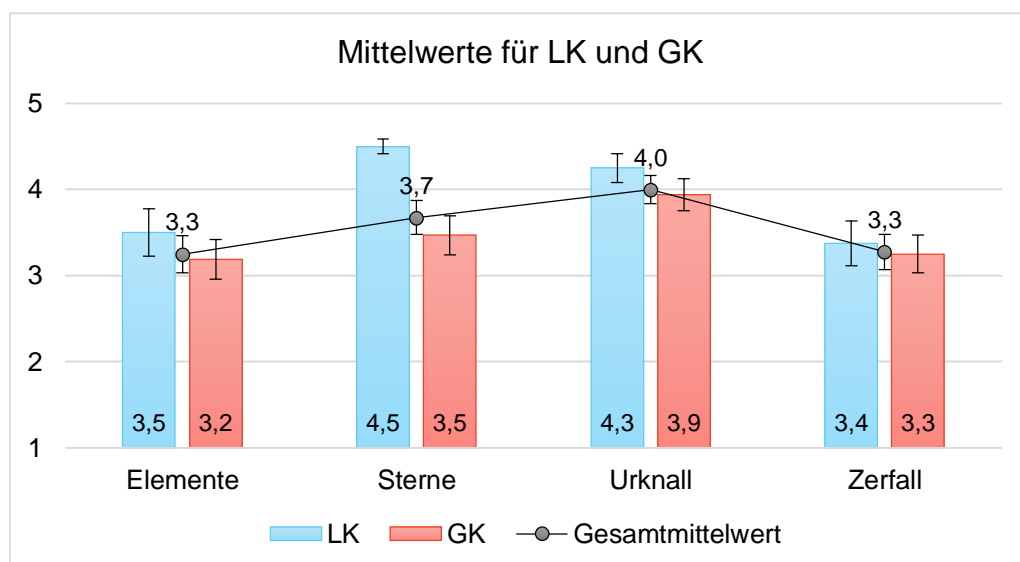
**Abb. 27:** Aufteilung der Antworten nach den Kategorien der jeweiligen Grundvorstellungen.

Die Befragung gibt einen Überblick über verbreitete Ansichten bezüglich der vier Grundbegriffe der Nukleosynthese, die sowohl im LK als auch im GK nur in den seltensten Fällen den Zielvorstellungen entsprechen. Das bestätigt den Bedarf an einer Erweiterung der Vorstellungen mittels einer Unterrichtseinheit rund um die Nukleosynthese.

### 6.2.3 Interessen

Um den Grad der Interessiertheit an der Nukleosynthese im Kontext von einem der vier Grundbegriffe abzuschätzen, wurden Mittelwerte gebildet (siehe Abb. 28). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts an.<sup>6</sup> Für den Vergleich der Werte wurden jeweils Zweistichproben t-Tests ( $\alpha = 0.05$ ) unter der Annahme gleicher Varianzen durchgeführt. Eine generelle Abneigung gegen eine der vier Fragestellungen kann nicht festgestellt werden, da jedes Thema in beiden Kursarten den Wert 3,0 (mittleres Interesse) erreicht.

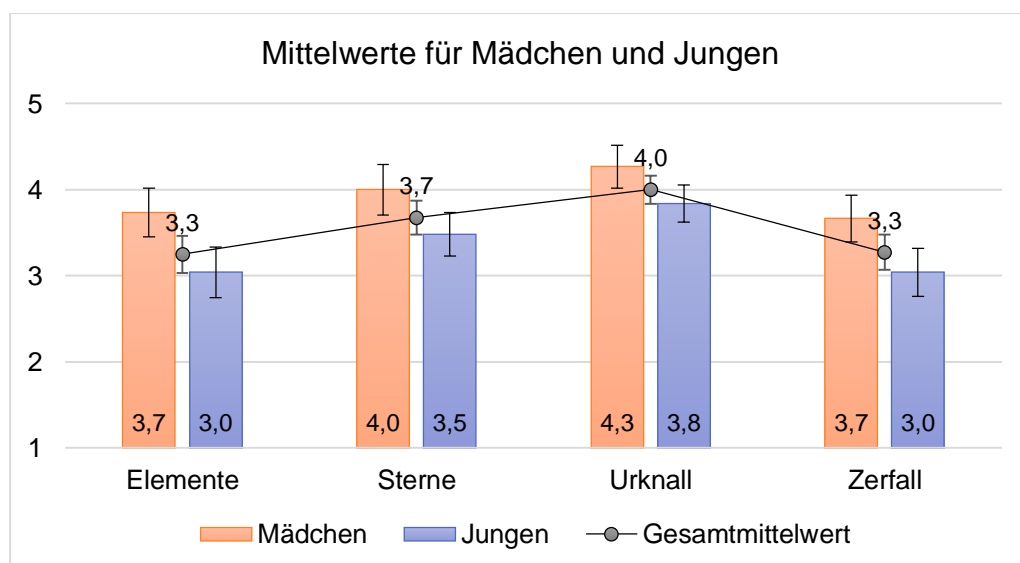
<sup>6</sup> Wurzel des Quotienten von korrigierter Stichprobenvarianz und Länge der Stichprobe.



**Abb. 28:** Mittelwerte der Kontextinteressen für LK und GK mit Standardfehler.

Werden *Elemente* und *Zerfall* als kernphysikalischer sowie *Sterne* und *Urknall* als astrophysikalischer Kontext zusammengefasst, sind signifikante Unterschiede zugunsten der Astrophysik zu erkennen ( $t(158) = 2.94$ ,  $p = 0.002$ ). Innerhalb der Kernphysik gibt es keinen Unterschied ( $t(78) = 0.08$ ,  $p = 0.93$ ). *Urknall* erreicht einen höheren Wert als *Sterne*, obwohl der Unterschied nicht signifikant ist ( $t(78) = 1.28$ ,  $p = 0.1$ ). Im Leistungskurs zeichnet sich ein leicht erhöhtes Interesse ab ( $t(158) = 1.79$ ,  $p = 0.04$ ). Deutlicher ist der Unterschied nur bei dem Kontext *Sterne* ( $t(38) = 2.23$ ,  $p = 0.02$ ).

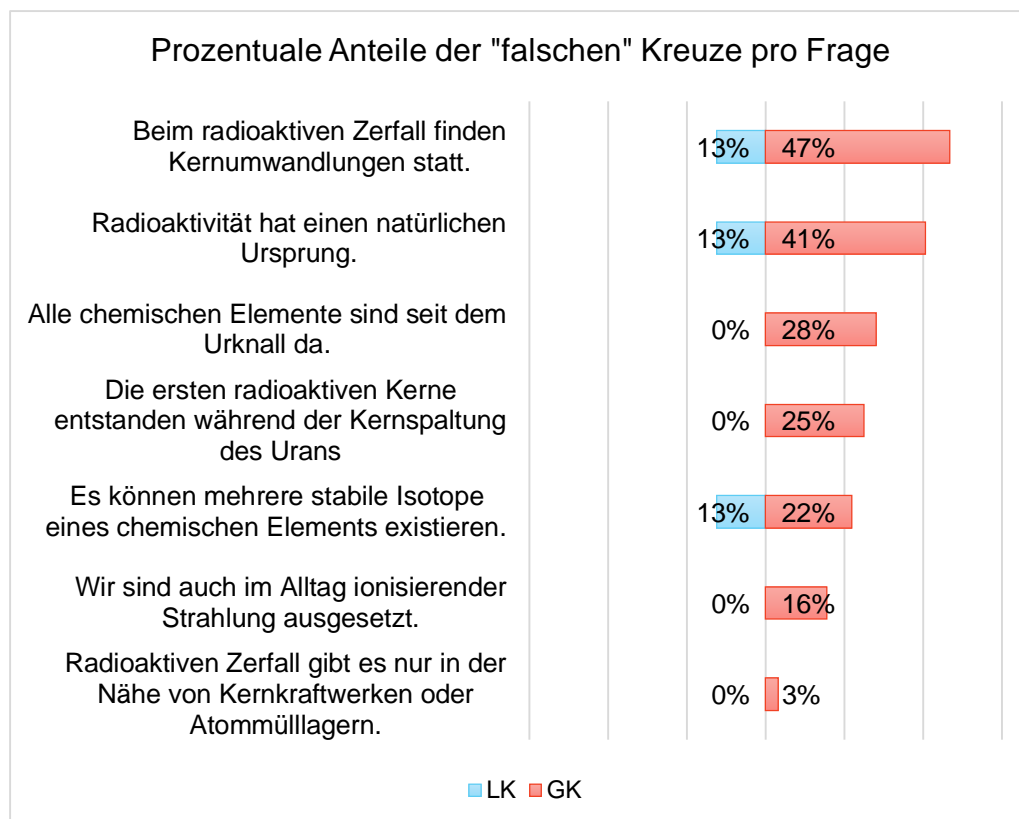
Die Unterscheidung nach Geschlechtern ergab, dass Mädchen generell größeres Interesse bekunden als Jungen (siehe Abb. 29;  $t(158) = 2.81$ ,  $p = 0.003$ ). Der Unterschied wird bei den kernphysikalischen Themen deutlicher ( $t(78) = 2.21$ ,  $p = 0.01$ ) als bei den astrophysikalischen ( $t(78) = 1.82$ ,  $p = 0.04$ ).



**Abb. 29:** Mittelwerte der Kontextinteressen für Mädchen und Jungen mit Standardfehler.

### 6.2.4 Inhaltliche Aussagen

Bei der Auswertung der inhaltlichen Aussagen wurden falsch angekreuzte Aussagen gezählt und bezogen auf die Zahl der Teilnehmer der jeweiligen Kursart in Prozent ausgedrückt (siehe Abb. 30).



**Abb. 30:** Aufteilung der falsch angekreuzten Aussagen im LK und GK.

47% des Grundkurses und 13% des Leistungskurses kreuzten den Satz „Beim radioaktiven Zerfall finden Kernumwandlungen statt“ fälschlicherweise nicht an. Er gehört zu den umstrittensten Aussagen dieser Befragung, was die Notwendigkeit der Konzepterweiterung in Sachen Radioaktivität nach der Mittelstufe nochmals vor Augen führt. Ebenso ist die Befürchtung, dass Radioaktivität teilweise als unnatürlich angesehen wird, nicht unbegründet. Die restlichen Schlussfolgerungen ergeben sich in abgeschwächter Form. Im LK gab es nur vereinzelt „falsche“ Kreuze.

Aus dieser Darstellung wurden zwei Aussagen ausgeschlossen. Zum einen die nicht als „wahr“ oder „falsch“ zu wertenden Aussage über den überwiegenden Schaden der Radioaktivität<sup>7</sup> und zum anderen über das „Nichtvorkommen“ der Kernfusion außerhalb der Sonne<sup>8</sup>. Es kann nicht eindeutig ausgemacht werden,

<sup>7</sup> 25% im LK und 34% im GK stimmten zu.

<sup>8</sup> 0% im LK und 41% im GK kreuzten diese Aussage an.

ob die Sterne nicht zur „Natur“ gezählt werden oder ob sich die Kernfusion nur auf die Sonne beschränken soll.

Zum Schluss werden die Ergebnisse der vermuteten Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente im Universum in einem Kreisdiagramm dargestellt (siehe Abb. 31). Während im LK nur ein kleiner Teil die lineare Abnahme gegenüber der exponentiellen bevorzugt, gewinnt sie im GK mehr Stimmen. Darüber hinaus finden dort die anderen Vorschläge ihre Zustimmung. Daraus lässt sich schließen, dass die Häufigkeitsverteilung der Elemente intuitiv nicht von allen Schülerinnen und Schülern richtig eingeschätzt wird und eine Diskussion über die Herkunft der Daten vor dem Einsatz angebracht ist (vgl. Kap. 5).

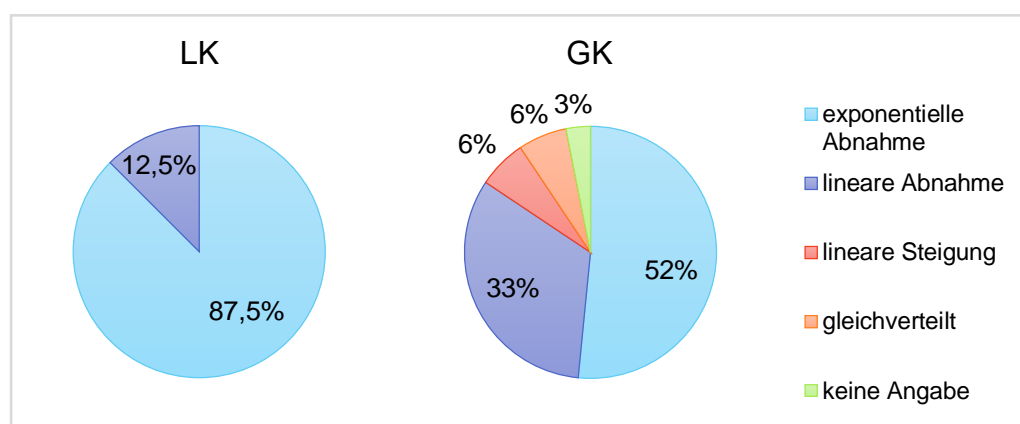


Abb. 31: Kreisdiagramm zu angekreuzten Häufigkeitsverteilungen der Elemente.

## 7 Didaktische Strukturierung

Die wissenschaftliche Perspektive auf die Nukleosynthese wurde in Kapitel 5 erläutert und zu Beginn der empirischen Untersuchung um vier Grundbegriffe konzentriert. Die Ergebnisse in Kapitel 6 erlauben es, vorherrschende Schülerperspektiven in diesen Bereichen anzunehmen. Aus dem Vergleich der beiden Perspektiven werden im Folgenden Leitlinien für den Unterricht abgeleitet und Unterrichtselemente für die Umsetzung vorgeschlagen.

### 7.1 Leitlinien

Die quantitative Auswertung der Verhältnisse zwischen verschiedenen Ansichten bezüglich der chemischen Elemente, dem Urknall, der Sterne und der Radioaktivität erlaubt es, Schülerperspektiven zu formulieren, die für die meisten Lernenden in diesem Bildungsabschnitt angenommen werden können. Das Ziel der didaktischen Strukturierung ist es, Leitlinien für einen Unterricht zu schaffen, der die Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler bestmöglich um die

wissenschaftliche Perspektive erweitern kann. Eine tabellarische Übersicht gibt jeweils die Grundzüge der Ansichten und die gefolgerten Leitlinien wieder (siehe Tab. 7).

Grundbegriff	Schülerperspektiven (vgl. 6.2.2)	Wissenschaftliche Perspektiven	Leitlinien für den Unterricht
Chemische Elemente	Sie stehen im Periodensystem und lassen sich zu Stoffen verbinden oder wieder trennen. = verschiedene Grundstoffe in einer Tabelle aufgrund des chemischen Verhaltens zusammengefasst	Alle Atome eines Elements haben dieselbe Protonenzahl, von der die Elektronenhülle und ihr chemisches Verhalten abhängt (vgl. 5.1). = verschiedene Atomsorten aufgrund von anderer Kernzusammensetzung	Periodensystem als Anknüpfungspunkt wählen und das Ordnungssystem bewusst machen. Unterschiede zwischen Element, Isotop und Nuklid erläutern und Vorstellungsbilder benutzen (vgl. 6.2.1 & Anhang 5).
Urknall	Raum, Zeit und Materie ist aus dem Urknall entstanden und hat sich ausgebreitet. = urplötzliches Ereignis, bei dem sich die Welt aus dem Nichts gebildet hat, worüber nichts genaueres bekannt ist	Zu Beginn des Universums bildeten sich durch Abkühlung des heißen Plasmas aus Strahlung und Elementarteilchen Protonen und Neutronen (vgl. 5.2). = wissenschaftlich greifbarer Entstehungsprozess	Über die Beobachtung des endlichen, expandierenden Universums auf seine Anfänge schließen. Mit Einstein'scher Masse-Energie-Äquivalenz „Kondensation“ der Materie aus Energie anführen.
Sterne	Durch die Kernfusion in Sternen wird viel Energie, Licht und Wärme frei. = Energiequellen	In stellaren Brennphasen fusionieren leichte Elemente zu schweren (vgl. 5.3). = Elementfabriken	Menge und Art der Energie hinterfragen. Über Massendefekt und den Verlauf der Bindungsenergie pro Nukleon stellare Brennphasen begründen → Nukleosynthese bis Eisen (vgl. Anhang 5).
Radioaktivität	Radioaktive Stoffe senden gefährliche Strahlung aus, insbesondere nach einem Unfall im Atomkraftwerk. = schädliche Eigenschaft eines begrenzten (technisch nutzbaren) Teils der Materie	Energetisch unausgeglichene Zusammensetzung eines Atomkerns führt zu seiner Umwandlung unter Abgabe entsprechender Strahlung. = natürliche Eigenschaft aller Atomkerne und Teil des Entstehungsprozesses schwerer Elemente (vgl. 5.4)	Beliebige Kernumwandlungen am Beispiel des Beschusses von stabilen Kernen behandeln. Potentielle Umwandlungen (mit Schwerpunkt auf Entstehung) im Z-N-Diagramm verdeutlichen. Instabilität radioaktiver Nuklide im Hinblick auf Neutroneneinfänge und ihre Folgen diskutieren (vgl. 7.2.2 & Anhang 5).

**Tab. 7:** Vergleich der Schülerperspektive mit der wissenschaftlichen Perspektive. Leitlinien für den Unterricht als Ergebnis (in Anlehnung an Reinfried, Aeschbacher, Kienzler & Tempelmann 2013, S. 266f).

Bei der Leitlinie zur Radioaktivität wird auf den Schwerpunkt der Entstehung im Z-N-Diagramm hingewiesen. Gemeint ist die Verwendung von Pfeildarstellungen, die verschiedene Entstehungsmöglichkeiten eines Nuklids aufzeigen



und keine potentiellen Zerfallsarten (siehe Abb. 32). Letztere sind verwirrend, weil ein instabiles Nuklid in der Regel nicht alle drei Zerfallsarten gleichzeitig ausführen kann. Ein stabiles Nuklid hingegen kann durch verschiedenste Kernumwandlungen entstehen.

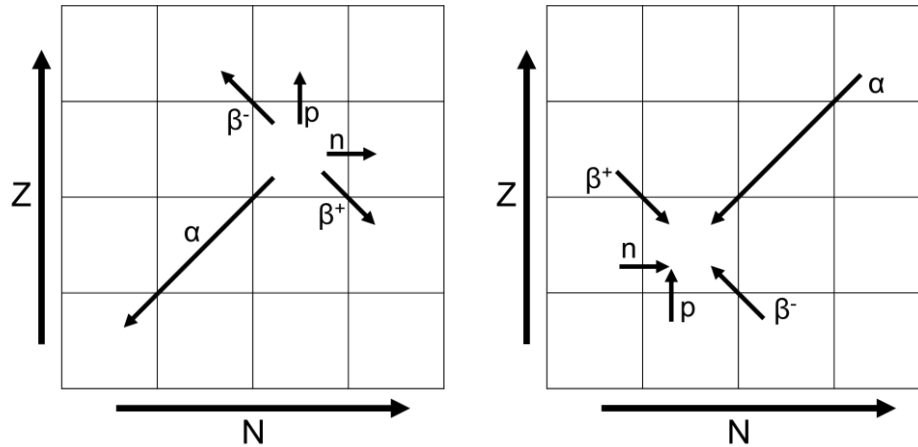


Abb. 32: Zerfallswege (links) vs. Entstehungswege (rechts).

Bei der Umsetzung der Leitlinien darf der wissenschaftspropädeutische Ansatz nicht vergessen werden, mit dem die exemplarische Bedeutung der Nukleosynthese schwerer Elemente sichergestellt werden soll (vgl. 2.3). Aus diesem Grund wird eine Strukturierung des Unterrichts in Form des allgemeinen Erkenntnisprozesses der Physik (Beobachtung, Theorie und Experiment) und als Beispiel für fächerübergreifende Zusammenarbeit zwischen Astrophysik und Kernphysik angestrebt. Es sind zwei Unterrichtskonzepte denkbar (siehe Tab. 8). Einerseits können astrophysikalische Beobachtungen in Form der relativen Häufigkeiten der Elemente vorliegen. Sie werden mit Theorien der Kernphysik im Hinblick auf die Nukleosynthese erklärt und durch Experimente überprüft. Andererseits könnte die Sternentwicklung als astrophysikalischer Kontext im Zusammenhang mit der Entstehung der Elemente herangezogen werden, deren Verständnis von kernphysikalischen Inhalten abhängt.

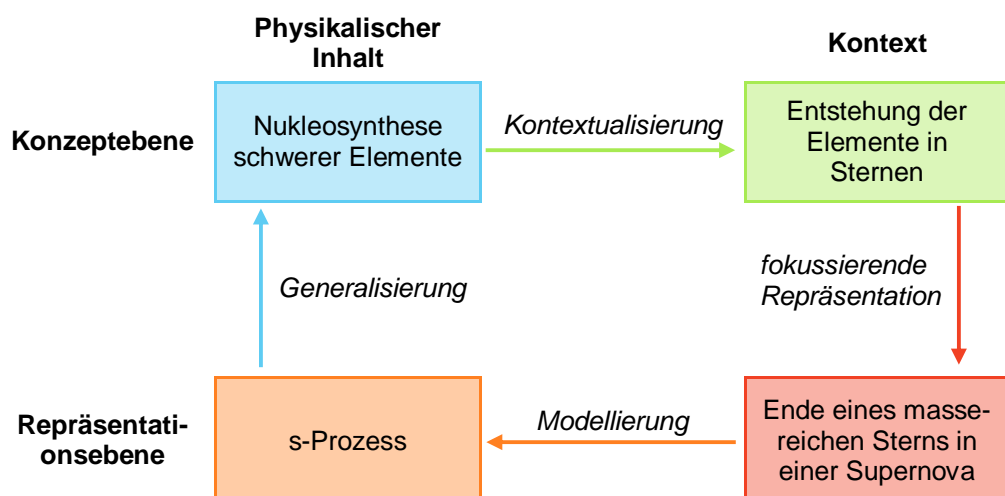
In Kapitel 4.2 wurden die Vorzüge der Kontextstrukturierung erläutert, sodass dieser Ansatz verfolgt wurde. Darüber hinaus

Fächerübergreifende Zusammenarbeit	
Astrophysik	Kernphysik
Relative Häufigkeiten d. E.	Prozesse ihrer Entstehung
Fachsystematik	
Kontextstrukturierung	
Sternentwicklung Supernovae	Fusion Neutroneneinfang
Beobachtung	Theorie
Modellierung der Prozesse	
Experiment	
Erkenntnisprozess	

Tab. 8: Unterrichtskonzepte unter Vermittlung einer fächerübergreifenden Zusammenarbeit und einer Strukturierung gemäß dem physikalischen Erkenntnisprozess.

bestätigen empirische Ergebnisse, dass die Einbettung der Nukleosynthese in das Umfeld von spektakulären Phänomenen im Weltall oder Vorgängen in Sternen ein höheres Interesse verspricht als die bloße Frage nach der Entstehung der Elemente (vgl. 3.3.3 & 6.2.3). Trotz des hohen Interesses am Urknall wird die primordiale Nukleosynthese im Vergleich zur Sternentwicklung nicht als passender Kontext erachtet. Es handelt sich um einen begrenzten Abschnitt der Nukleosynthese. Der Urknall sollte im Rahmen des kosmischen Materiekreislaufs im Anschluss thematisiert werden (vgl. 5.3; Leitlinie *Urknall*).

Auf der Konzeptebene wird der kernphysikalische Inhalt die Nukleosynthese schwerer Elemente in den Kontext der Sterne und ihrer Entwicklung eingebettet. Es ist sinnvoll den Fokus auf massereiche Sterne zu legen, die alle Brennphasen durchlaufen und in einer Supernova enden (Leitlinie *Elemente* und *Sterne*). Sobald die Frage nach dem Ende der Fusion bei Eisen geklärt ist, stellt sich die Frage nach einem zusätzlichen Mechanismus der Entstehung schwerer Elemente. Die Möglichkeit der Neutroneneinfänge sollte im Hinblick auf Stabilität der Kerne und Radioaktivität diskutiert werden (Leitlinie *Radioaktivität*). Das Ziel stellt die Entwicklung, Untersuchung und Modellierung des s-Prozesses mithilfe kennengelernter Kerneigenschaften dar. Mit der Anwendung der Theorie in einem Modell-Experiment, das mit „Beobachtungen“ in der Nuklidkarte und den relativen Häufigkeiten verglichen werden kann, wird der Erkenntnisprozess durchlaufen. Durch Generalisierung der Erkenntnisse des s-Prozesses (und Erweiterung mit dem r-Prozess) wird die Nukleosynthese schwerer Elemente in einer für den schulischen Rahmen angemessenen Form abgeschlossen.



**Abb. 33:** Modellierung des s-Prozesses im Kontext der Nukleosynthese in Sternen (nach Nawrath 2010, S. 174).

Abbildung 33 zeigt die Stationen der Unterrichtsplanung mit dem Weg von der Konzept- zur Repräsentationsebene in den Dimensionen des physikalischen Inhalts und Kontexts auf. Im folgenden Abschnitt werden Unterrichtselemente für die Repräsentationsebene vorgestellt.

## 7.2 Unterrichtselemente

Die erfolgreiche Umsetzung der Leitlinien mit dem kontextstrukturierten Vorgehen hängt im Wesentlichen von der Wahl des Materials in der Begegnungsphase ab. Es sollte die Lernenden zwar mit dem Kontext vertraut machen, aber gleichzeitig genügend Raum für Fragen belassen. Es sollten sich Problemstellungen eröffnen, für die keine sofortige Antwort gegeben werden kann. Die zweite Hürde in dem vorgeschlagenen Konzept hängt mit dem Mangel an Material und Lernaktivitäten zusammen, die über die etablierten Inhalte der Kern- und Astrophysik hinausgehen (vgl. 3.1 & 3.2). Gemeint sind vor allem die eigentätige Beschäftigung mit dem s-Prozess und eine angemessene Art der Modellierung. Für diese drei Kernelemente werden in folgenden Abschnitten Lösungsvorschläge unterbreitet.

### 7.2.1 Kurzfilm

Für den Einstieg wird ein Kurzfilm mit der Bezeichnung „*Supernovae – Was passiert, wenn Sterne sterben?*“, produziert von Nicola Wettmarshausen (2013) im Auftrag der Max-Planck-Gesellschaft, empfohlen.<sup>9</sup> Zu Beginn wird das helle Aufleuchten einer kurzzeitigen astronomischen Erscheinung am Himmel beschrieben, die Forscher als Supernova-Explosion bezeichnen. Sie markiert den „Tod“ eines massereichen Sterns. In den Überresten werden am Beispiel des Krebsnebels viele chemische Elemente wie Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefel nachgewiesen. Es heißt, dass durch den Urknall lediglich leichte Elemente wie Wasserstoff und Helium entstehen konnten. In massereichen Sternen wurden die schwereren Elemente „erbrütet“. Brennprozesse bis Eisen werden aufgezählt, die „Jahrmillionen“ dauern und die „Energiequelle“ des Sterns bilden. Wenn ein Kern aus Eisen entstanden ist, „geht dem Stern der Brennstoff aus“ und er explodiert in einer Supernova. Danach wird eine Simulation der Forscher am Max-Planck-Institut für Astrophysik gezeigt, die schwappende Bewegungen

---

<sup>9</sup> Abgerufen am 25. November 2015 von fluxfilm.de Filmproduktion - Nicola Wettmarshausen: <http://fluxfilm.de/video/supernovae.html> nach Rücksprache.

der erste halbe Sekunde veranschaulicht, bevor ein Stern mit rund 20 Sonnenmassen explodiert. Es ist zu sehen, wie der Stern das Universum mit den erbrüteten Elementen anreichert. Das blau dargestellte Nickel entsteht „erst in der Explosion“. Supernovae sind „gigantische Elementmischer im All“. An dieser passenden Stelle (4 min 25 s) kann der ca. 6-minütigen Film gestoppt werden. Danach geht es um für die Elemententstehung weniger relevante Erforschung der Neutrinos zur Verbesserung der Supernova Simulationen.

Der beschriebene Filmausschnitt eignet sich für den Einsatz in der Begegnungsphase mit dem gewählten Kontext. Er umreißt die stellaren Brennphasen bis zur Supernova und unterstreicht ihre Bedeutung für die Entstehung der Elemente im Universum. Andererseits dürfte für interessierte „Laien“ genügend Raum für unbeantwortete Fragen bleiben. Die Bedingungen und Hintergründe für das „Erbrüten“ der Elemente könnten beispielsweise hinterfragt werden: Was heißt, der „Brennstoff“ geht aus, und woher kommt die Energie, die den Stern Jahrmillionen brennen lässt. Nicht weniger wichtig ist die Atmosphäre, die durch Bilder und Animationen des Weltalls sowie versunkener Musik geschaffen wird. In einem abgedunkelten Klassenraum sollten die Bilder und der ruhig vortragende Erzähler für eine konzentrierte Stimmung sorgen.

Die nachfolgende Planungsphase sollte mit einem Arbeitsauftrag eingeleitet werden, der kognitive Konflikte oder physikalische Fragen verbalisiert. Schülerinnen und Schüler sollten die Möglichkeit bekommen, in Stillarbeit ihre Gedanken und Eindrücke im Sinne der Kompetenz „Informationen zu naturwissenschaftlichen Zusammenhängen erschließen“ zu ordnen (K1, Hessisches Kultusministerium 2014, S. 14). Es kommen verschiedene Methoden in Frage, wie mit den Antworten umgegangen wird. Beispielsweise können sich im Schneeball-Verfahren größere Gruppen nacheinander zusammensetzen und sich jeweils auf eine bestimmte Anzahl an Problemen einigen, bevor sie im Plenum gesammelt werden. Eine Visualisierung an der Tafel mit beschrifteten Kärtchen, die eine rasche Sortierung ermöglichen, ist zu empfehlen. Die Lerngruppe motiviert auf diese Weise die Festlegung der Unterrichtsinhalte. Am Ende sollten (kern-)physikalische Themen feststehen, die die Elemententstehung in Sternen in den *Erarbeitungsphasen* näher bringen. Inwieweit die gewählte Repräsentationsebene des Kontexts ihre Aufgabe erfüllt, wurde während eines Unterrichtsversuchs geprüft (vgl. 8.3).

### 7.2.2 Lernspiel

Mit dem Ziel aktives Lernen und Mitbestimmungsfähigkeit zu fördern, sollte nicht nur die Strukturierung des Unterrichts von der Lerngruppe ausgehen, sondern auch eine Art der Überprüfung der erarbeiteten Theorien.

Die Nukleosynthese schwerer Elemente mit langsamen Neutroneneinfängen (s-Prozess) verläuft nach klaren Regeln: Ist das entstandene Nuklid stabil, wird es bei gleichbleibendem Neutronenfluss ein weiteres Mal um ein Neutron schwerer. Ist das entstandene Nuklid instabil, wird es sich nach einer bestimmten Zeit gemäß seiner Kernzusammensetzung umwandeln. Auf der Nuklidkarte erinnert es an Spielzüge, bei denen von einem Feld auf das nächste „gehüpft“ wird. In der Tat lässt sie sich als „Spielbrett der Schöpfung“ (Tillemans 2008) bezeichnen. Der Wissenschaftsjournalist benutzte diesen Ausdruck, um die Arbeit des japanischen Physikers Shinya Wanajo an einem Computermodell zur Simulation des r-Prozesses zu erläutern. Auf jedem Feld muss eine Entscheidung getroffen werden, welche Kernumwandlung bei den vorgegebenen Bedingungen passiert, welche „Wege“ die Nuklide einschlagen und welche Häufigkeiten sich daraus ergeben. Die Qualität der Vorhersagen der Simulation hängt von der Menge an gesicherten Daten für jedes Nuklid ab, besonders im neutronenreichen Teil der Nuklidkarte. Ein solches Computerprogramm lässt sich nicht im Unterricht umsetzen. Aber die Grundzüge lassen sich in reduzierter Form für den s-Prozess modellieren und in einer Tabellenkalkulation wie Excel nachbilden. Bevor diese Möglichkeit zum Zuge kommt, lässt sich ein einfacheres Lernspiel zur Untersuchung des s-Prozesses einsetzen, was im Folgenden vorgestellt wird.

Ist die Nuklidkarte vorgegeben, lassen sich der Entstehungsweg und sein Lücken nach den Regeln des s-Prozesses schnell nachvollziehen. Wird die Situation umgekehrt, und die Nuklidkarte nach den Regeln des s-Prozesses zusammengestellt, lässt sich dieses Bild mit den realen Gegebenheiten vergleichen. Diese Idee führte zur Ausarbeitung eines Puzzlespiels mit dem Namen *Nuklid-Domino*. Das Spielfeld stellt eine leere Nuklidkarte dar, die zu diesem Zeitpunkt noch als Z-N-Diagramm bezeichnet wird. Es ist mit einem „Saatnuklid“ in der linken unteren Ecke versehen (siehe Anhang 2). Die Spiel- oder Bausteine, aus denen die Nuklidkarte aufgebaut wird, bestehen jeweils aus einem stabilen und instabilen Nuklid (siehe Anhang 3). Sie ähneln in ihrem zweiteiligen Aufbau klassischen Dominosteinen. Die schwarzen Felder stellen stabile Nuklide dar, die im Inneren





1. Die *Real-Situation* stellen die kernphysikalischen Prozesse dar, die sich seit Milliarden von Jahren im Inneren der Sterne ereignen (Verstehen). Das *Situationsmodell* liegt in der Annahme, dass die vorliegenden relativen Häufigkeiten der Elemente Rückschlüsse auf Entstehungsprozesse im Universum erlauben (Konstruieren).
2. Im *Realmodell* wird der Neutroneneinfang betrachtet. Wir nehmen einen kontinuierlichen Prozess an mit einem konstanten Neutronenfluss und einer nicht abnehmenden Zahl an Saatnukliden. Der Zeitraum zwischen zwei Neutroneneinfängen ist so groß, dass in der Zwischenzeit jegliche  $\beta$ -Zerfälle erfolgen. Es stellt sich in jedem Fall ein Gleichgewicht der Häufigkeiten ein. Die relative Häufigkeit zwischen zwei Nukliden hängt nur von den Wirkungsquerschnitten für den Neutroneneinfang ab:

$$\frac{N_A}{N_{A-1}} = \frac{\sigma_{A-1}}{\sigma_A} \quad (\text{vgl. 5.4.1}).$$

Der Wirkungsquerschnitt wird im Sinne einer einfacheren Handhabung als Wahrscheinlichkeit  $0 \leq p_A \leq 1$  für einen Neutroneneinfang durch ein Nuklid während eines festen Zeitraums  $\Delta t$  bei idealen Bedingungen interpretiert. (Vereinfachen und Strukturieren).

3. Das *mathematische Modell*, das diese physikalischen Überlegungen abbildet, geht von einer bestimmten Anzahl an Saatnukliden  $N_{A-1}$  aus. Die Anzahl der Nuklide  $N_A$ , die sich nach mehrmaligen Neutroneneinfängen einstellt, berechnet sich mit

$$N_A = N_{A-1} \frac{p_{A-1}}{p_A}.$$

Die typische „Stufen“-Struktur aus der Nuklidkarte wird als Berechnungsrundlage genommen (siehe Abb. 36).

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <math>p_A</math>  <math>A</math> </div>	Z						
	46	0,1		0,1	0,8	0,2	
	45	102			0,8		
44	0,5	0,1	0,8	0,05		0,1	
		99	100	101	102	104	
		55	56	57	58	59	60 N

**Abb. 36:** Auswahl der Nuklide, deren Häufigkeiten modelliert werden, mit angenommenen Neutroneneinfangswahrscheinlichkeiten  $p_A$ .



Die Wahl der Massenzahlen rund um 100 ist nicht zufällig. Dort gelten die einfachen Annahmen des Modells. Der Bereich ist fern von der Eisenspitze und liegt zwischen den magischen Zahlen. Die Neutroneneinfangswahrscheinlichkeiten  $p_A$  werden so gewählt, dass gerade Massenzahlen  $A$  generell niedrigere Werte haben als ungerade. Die Begründung folgt aus der vorhergehenden Beschäftigung mit der Stabilität von Kernen und der Nuklidkarte nach dem Nuklid-Domino. Unregelmäßigkeiten wurden absichtlich eingebaut, damit mehr Unterschiede in den Häufigkeiten vorkommen.

4. Für jedes Nuklid werden ausgehend von der gewählten Anzahl an Saatnukliden (hier der Einfachheit halber 10) *mathematische Resultate* berechnet:

$$N_{99} = 10 \Rightarrow N_{100} = 10 \cdot \frac{0,5}{0,1} = 50 \Rightarrow N_{101} = 50 \cdot \frac{0,1}{0,8} = 6,25$$

$$\Rightarrow \dots \text{ (siehe Abb. 37).}$$

An den Stellen, an denen nach einem Neutroneneinfang ein radioaktives Isotop folgt, wird genauso verfahren. Nach dem Modell wandeln sie sich alle in das nächste Element um. In diesem Beispiel wurden keine r- und p-Kerne eingefügt, was als mathematische Variation noch möglich wäre.

$N_A$ A		0		50	6,25	25		
		102		104	105	106		
				6,25				
	10	50	6,25	100		0		
	99	100	101	102		104		
Summe	10	50	6,25	100	6,25	50	6,25	25

Abb. 37: Modellierte Häufigkeiten summiert nach den Massenzahlen  $A$  in der unteren Zeile.

Auf den ersten Blick mag es verwundern, dass aus ursprünglich 10 Nukliden sich an anderen Stellen 50 oder 100 Nuklide versammeln. Das liegt daran, dass dieser vereinfachte s-Prozess auf eine Kette von dynamischen Gleichgewichtsreaktionen hinausläuft. Die Anzahl der Saatnuklide bleibt fest. Sie wandern durch Neutroneneinfänge weiter und werden gleichzeitig von vorhergehenden Reaktionen neu gebildet. Je nachdem wie hoch die Reaktionsrate ist, verbleiben bei der einen Kernzusammensetzung mehr Nuklide als bei der anderen. In der Chemie wird das Bild von zwei unterschiedlich schnellen Nachbarn verwendet, die sich gegenseitig Äpfel über den Zaun

werfen. Egal wie die Verteilung am Anfang des „Streits“ aussah, im Reaktionsverlauf wird sich ein vorhersehbares, dynamisches Gleichgewicht einstellen. Dieses Bild lässt sich auf nebeneinanderliegende Gärten erweitern, bei denen die Äpfel jeweils in den nächsten Garten weitergeworfen werden, wobei auf der Ausgangsseite der Vorrat an Äpfeln konstant bleibt.

Der dynamische Vorgang lässt sich in Zahlen darstellen. Die Anzahl der Nuklide nach einem Zeitabschnitt  $\Delta t$  setzt sich zusammen aus den Nukliden zum Zeitpunkt  $t$ , minus dem Erwartungswert der Nuklide, die einen Neutroneneinfang machen, und plus der Anzahl der hinzugekommenen:

$$N_A(t + \Delta t) = N_A(t) - N_A(t) \cdot p_A + N_{A-1}(t) \cdot p_{A-1} \cdot$$

Die Rechnung lässt sich in einer Tabellenkalkulation iterativ für alle Nuklide nach  $A = 99$  ausführen. Es wird sichtbar, wie sich die analytische Gleichgewichtslage schrittweise einstellt (siehe Tab. 9). In der halblogarithmischen Darstellung lässt sich die Entwicklung der modellierten Häufigkeiten veranschaulichen (siehe Abb. 38).

Iteration	$N_{99}$	$N_{100}$	$N_{101}$	$N_{102}$	$N_{103}$	$N_{104}$	$N_{105}$	$N_{106}$
0.	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5.	10,0	20,5	2,0	2,4	0,1	0,0	0,0	0,0
10.	10,0	32,6	3,8	12,1	0,6	0,9	0,1	0,0
20.	10,0	43,9	5,4	37,4	2,1	7,6	0,8	1,6
40.	10,0	49,3	6,1	74,3	4,5	27,7	3,3	10,8
⋮								
analytisch	10	50	6,25	100	6,25	50	6,25	25

Tab. 9: Iterative Berechnung der Häufigkeiten nähert sich dem Gleichgewichtszustand an.

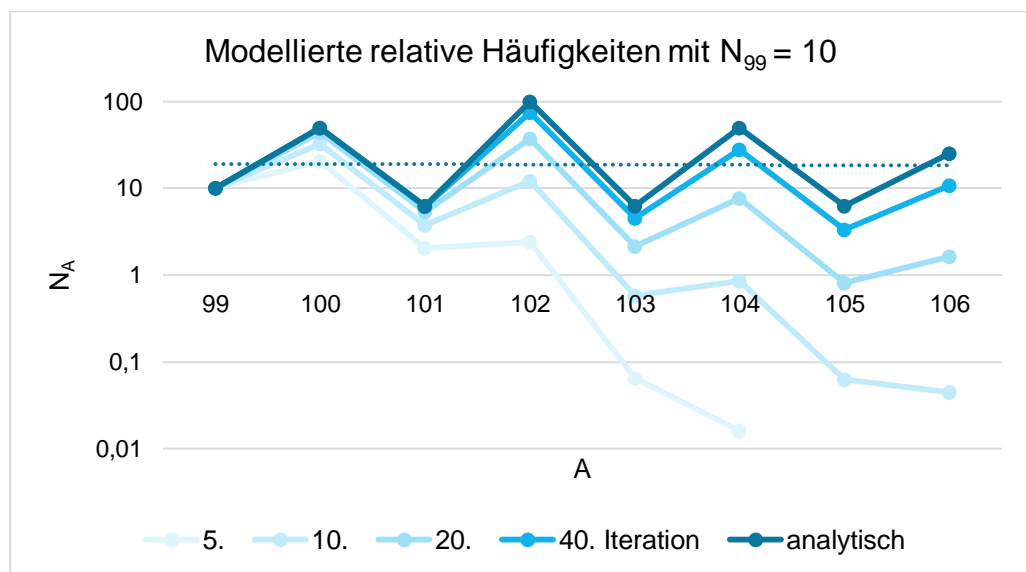


Abb. 38: Angleichung der iterativ und analytisch modellierten relativen Häufigkeiten in halblogarithmischer Darstellung mit  $N_{99} = 10$  als Richtwert.

Im Unterricht sollten die Lernenden zunächst die numerische Berechnung ausführen und das dynamische Gleichgewichts entdecken, bevor die Gleichung für das Gleichgewicht hergeleitet wird (mathematisch Arbeiten).

5. Im nächsten Schritt werden die mathematischen Resultate auf *reale Resultate* bezogen. Dazu lassen sich die relativen Häufigkeiten im Sonnensystem verwenden (siehe Abb. 8). Die schmale Zickzackform und der flache Verlauf finden Übereinstimmung. Einzelne Spitzen, leichte Anstiege und Abfälle können von diesem Modell durch Anpassung der Reaktionswahrscheinlichkeiten auf Wunsch nachgebildet werden. Sie hängen jedoch wesentlich von den r-Prozess-Häufigkeiten, den magischen Zahlen und Verzweigungen durch  $\beta$ -Zerfälle ab (Interpretieren).
6. Mathematische und reale Resultate sprechen dafür, dass die Entstehungsmechanismen mit den relativen Häufigkeiten zusammenhängen (Validieren).
7. Durch Verbesserung der Modelle und Verwendung experimenteller Daten aus der Kernphysik lassen sich genauere Vorhersagen berechnen und Rückschlüsse auf Entstehungsbedingungen in den Sternen machen (Darlegen).

Beim Durchlaufen des kompletten Modellierungskreislaufs wird ein naturwissenschaftliches Modell zunächst erarbeitet und angewandt (E2). In den letzten Schritten reflektieren die Lernenden den Prozess der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung anhand eines Beispiels aus der modernen Physik (E3, vgl. Hessisches Kultusministerium 2014).

## 8 Unterrichtsversuch

Das letzte Kapitel gibt den groben Verlauf einer Unterrichtseinheit vor, die sich im Idealfall über mehrere Wochen erstreckt und mehrere Themen- und Inhaltsfelder der Q4 vereint.<sup>10</sup> Der Zeitpunkt dieser Arbeit machte es nicht möglich, einen Unterrichtsversuch in dem Zielhalbjahr durchzuführen. Die Physikkurse der Q3, in denen die Befragung stattfand, standen für weitere zeitliche Entbehrungen nicht zur Verfügung. Aber in einem Kurs der Einführungsphase konnten zwei Doppelstunden freundlicherweise zur Verfügung gestellt werden. Diese

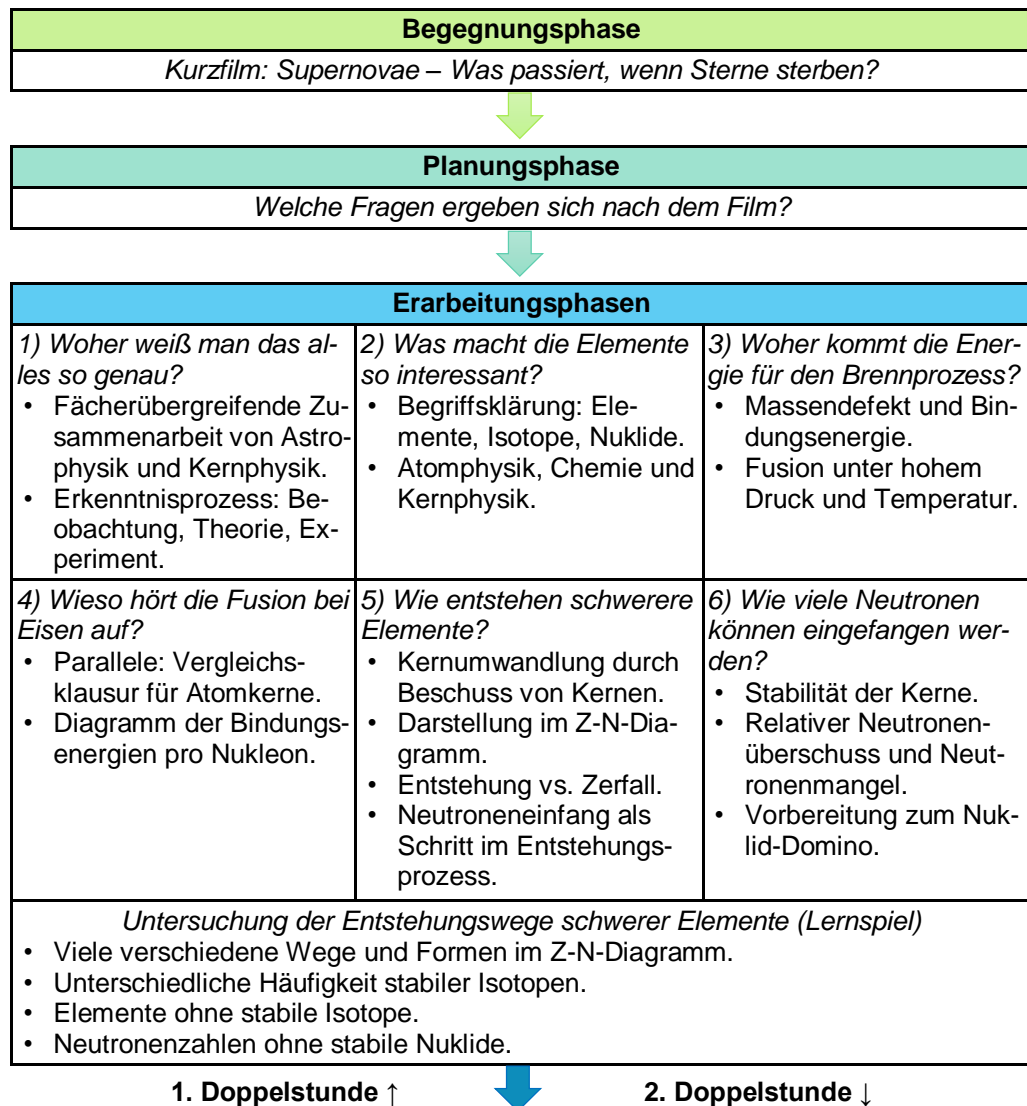
---


<sup>10</sup> Q4 Kernphysik: Bindungsenergie (GK/LK) & Potentialtopfmodell (LK). Q4 Astrophysik: Sterntypen, Sternentstehung und -entwicklung (GK/LK) & Energieerzeugung in der Sonne (LK) (vgl. Hessisches Kultusministerium 2014, S. 47ff).

Zeit wurde für die Überprüfung des kontextstrukturierten Einstiegs und die Anwendung des Nuklid-Domino Spiels genutzt.

### 8.1 Vorbereitung

Die Schwierigkeit bei der Planung bestand darin, die Erarbeitungsphasen bis zum „Herzstück“ dieses Unterrichtsversuchs in kurzer Zeit reduziert zu klären. Im Idealfall sollte jede dieser Phasen aus Materialien, Aufgaben, eigenständig zu erarbeitenden Lernprodukten und ihrer Diskussion bestehen, was in dem zeitlichen Rahmen nicht zu bewerkstelligen war. Das Ergebnis der ersten Planungsphase nach dem Film war schwer abzuschätzen. Es wurde deshalb eine Abfolge an erwarteten kernphysikalischen Fragen vorab zusammengestellt, anhand derer sich das Unterrichtsgespräch bis zur Nukleosynthese im s-Prozess gliedern konnte (siehe Tab. 10).



Reflexionsphase
<i>Abgleich mit der Nuklidkarte</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diskussion unterschiedlicher Lernprodukte der Schülerinnen und Schüler:               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Beschreibe die verschiedenen Strukturen. Nenne Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Anordnung der stabilen und instabilen Nuklide.</li> </ul> </li> <li>• Bestätigung der Vorhersagen des Modells.               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Nenne einen Grund für die häufige Anordnung aus mehreren stabilen Nukliden in einer Zeile oder Spalte in der Nuklidkarte.</li> </ul> </li> <li>• Auffinden der nicht vorhergesagten Nuklide.</li> <li>• Notwendigkeit der Anpassung des Modells erkennen. → r-Prozess, rp-Prozess.</li> <li>• Notwendigkeit der Halbwertszeiten und Wirkungsquerschnitte erkennen. → Sim. r-Prozess.</li> <li>• Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem.</li> </ul>

Dekontextualisierungsphase
<i>Der kosmische Materiekreislauf</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie lange Leben Sterne? → Vergleich Sonne und massereicher Stern.</li> <li>• Woher weiß man, wie sich die Sterne entwickeln? → Vergleich Menschenmenge und Sternenhimmel.</li> <li>• Hertzsprung-Russell-Diagramm.</li> <li>• Darstellung des kosmischen Materiekreislaufs.</li> </ul>

**Tab. 10:** Inhaltliche Strukturierung des Unterrichtsversuchs in zwei Doppelstunden.

In dem Kurs fand vorab eine Hospitation und Ankündigung des Vorhabens statt, sodass die Lerngruppe von dem Themenwechsel nicht überrascht war. Nach der Filmvorführung unterstützte eine PowerPoint-Präsentation mit Animationen, Abbildungen und Aufgabenstellungen das Unterrichtsgespräch bis zur Durchführung des Lernspiels. Eine Auswahl an typischen Spielergebnissen wurde auf Foto festgehalten, um sie in der nächsten Doppelstunde besprechen zu können. Im Laufe des Unterrichtsversuchs gab es außerdem mehrere Phasen für Stillarbeit oder Feedback. Die schriftlichen Ergebnisse wurden anonym eingesammelt und anschließend ausgewertet (vgl. 8.3).

Im Hinblick auf die Kursstufe wurde sich im Vorfeld der zweiten Doppelstunde gegen die Fortführung der Nukleosynthese mit dem quantitativen Modell entschieden. Stattdessen sollten gefragte Themen wie Sternentwicklung und kosmischer Materiekreislauf thematisiert werden, die den Schülerinnen und Schülern zum Schluss einen Gesamtüberblick verschafften.

## 8.2 Versuchsmaterial

Nach dem abgespielten Kurzfilm sollte die Lerngruppe aufschreiben, was für sie unklar geblieben ist. Die Schülerinnen und Schüler durften sich zwar zu jedem Thema äußern, aber um die anschließende Planungsphase in die Richtung der

Elementsynthese zu lenken, wurden ausgewählte Zitate aus dem Film als Unterstützung angezeigt (siehe Anhang 4). Sie betreffen Aussagen

- zu den Elementen nach dem Urknall,
- zum „Erbrüten“ der Elemente in den Sternen,
- zur Energiequelle der Sterne,
- zur Erschöpfung des „Brennstoffs“ bei Eisen,
- und der Entstehung weiterer Elemente während der „Explosion“.

Das sollte dazu führen, dass Fragen zu den physikalischen Prozessen hinter den Aussagen formuliert werden und ihre Erarbeitung motiviert ist. Daran orientierten sich vorab entwickelte Inhalte, die in einem Skript zusammengefasst sind (siehe Anhang 5). Es richtet sich bei der Abfolge und den Zugängen an den formulierten Leitlinien (vgl. 7.1). Die dort abgebildeten Darstellungen wurden in der Präsentation verwendet, um die Zusammenhänge zu veranschaulichen. Das Skript kann in einer umfangreicheren Unterrichtseinheit als Lernmaterial verwendet werden, das an den entsprechenden Stellen gekürzt und mit Aufgabenstellungen versehen wird:

- Arbeit mit dem Periodensystem und Übungen zur Nuklidschreibweise.
- Berechnungen zum Massendefekt und Bindungsenergien.
- Eigenständige Interpretation der Analogie zwischen Atomkernen und Schulklassen.
- Wechsel zwischen Darstellungsformen der Kernreaktionen (Reaktionsgleichung, Kurzschreibweise, Reaktionswege im Z-N-Diagramm).
- Eigenständige Zusammenstellung und Begründung der Bausteine für das Nuklid-Domino.

In dem verkürzten Unterrichtsversuch diente es als Richtlinie für das Unterrichtsgespräch, in dem Aufgabenstellungen und Fragen in Partnerarbeit besprochen und im Plenum behandelt wurden.

Nach der Einführung des Lernspiels wurden die Spielfelder und Bausteine an Zweiergruppen ausgeteilt. Zusätzlich zu der eigenen Beobachtung während des Spiels sollte jede Tischgruppe ihre persönlichen Erfahrungen am Ende der ersten Doppelstunde schriftlich schildern. Die im Laufe der Aktivität gemachten Fotos dienten als Material für die nächste Doppelstunde. Eine Zusammenstellung verschiedener Strukturen der Entstehungswege konnte auf diese Weise für alle sichtbar ausgewertet und verglichen werden. Die Lernenden beantworteten die

Fragen zunächst in Stillarbeit, um einen Überblick über alle Einzelleistungen zu bekommen.

Zum Schluss wurde der r-Prozess, die Bedeutung der relativen Häufigkeiten für die Nukleosynthese und die Sternentwicklung angesprochen (siehe Anhang 6-8). Die Lernenden konnten am Ende der zweiten Doppelstunde den kosmischen Materiekreislauf mithilfe vorgefertigter Kärtchen in Gruppenarbeit zusammenstellen und aufzeichnen (siehe Anhang 9).

### 8.3 Ergebnisse

Von 20 Schülerinnen und Schülern der Lerngruppe wurden insgesamt 69 Fragen formuliert.<sup>11</sup> Die Fragen teilen sich in acht Kategorien auf und beziehen sich auf 21 Themen (siehe Abb. 39 & 40). Eine Auflistung aller Fragen samt Zuordnung befindet sich im Anhang 10.

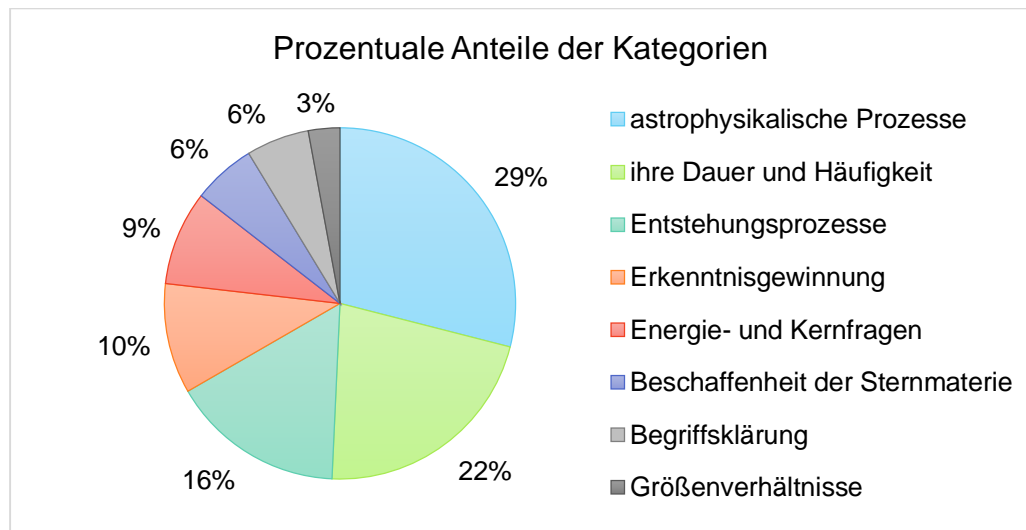
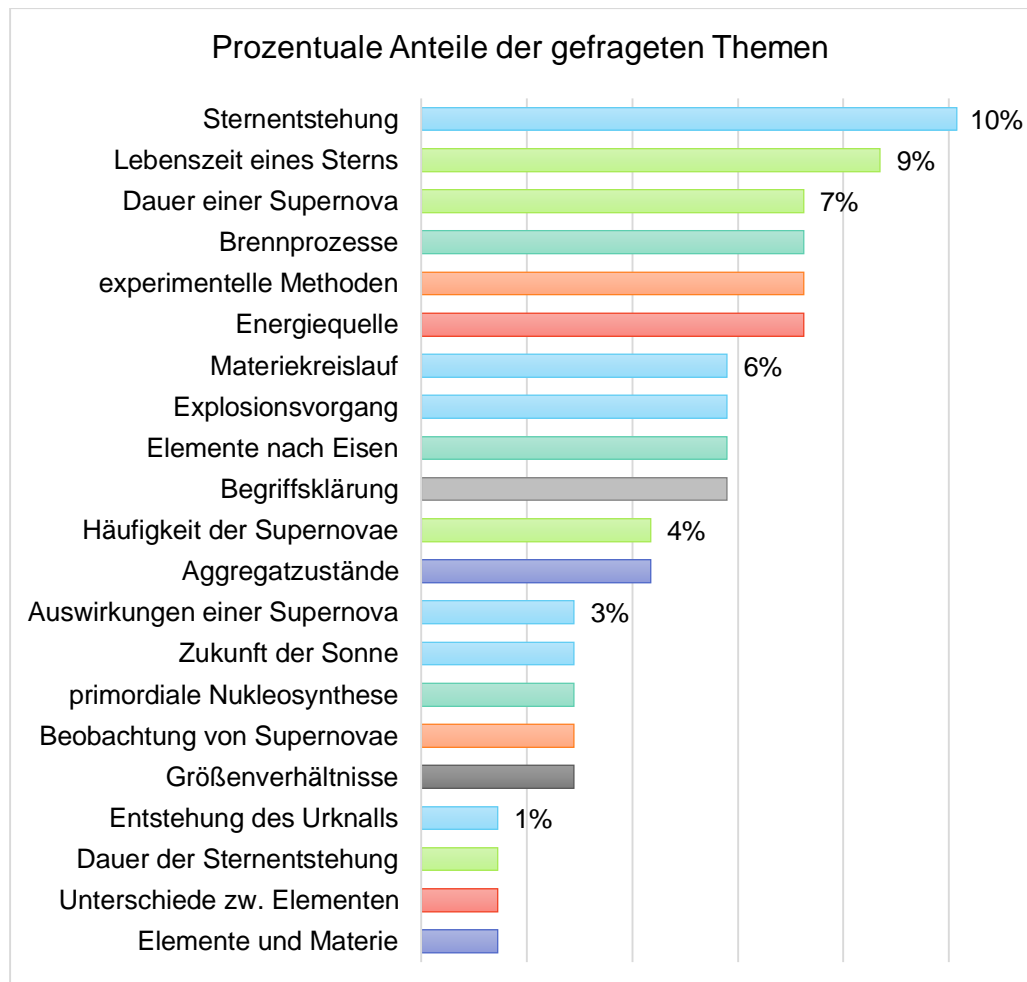


Abb. 39: Aufteilung der Kategorien bezogen auf die Gesamtzahl der Fragen.

Die Aufteilung nach Kategorien lässt sich soweit zusammenfassen, dass sich rund die Hälfte der Fragen mit astrophysikalischen Prozessen und ihrer Dauer beschäftigt. Rund ein Viertel der Fragen lässt sich kernphysikalischen Prozessen der Nukleosynthese oder Energieumwandlung in den Sternen zuordnen. Der Rest setzt sich zusammen aus Fragen zur Herkunft der im Film geschilderten Erkenntnisse, zur Beschaffenheit der Sternmaterie, zu einzelnen Begriffen oder nach verschiedenen Größenverhältnissen. Die Aufteilung bestätigt das Ergebnis der Befragung, dass sich astrophysikalische Inhalte größerer Beliebtheit erfreuen. Der Film behandelt vordergründig diese Vorgänge. Trotzdem kann von

<sup>11</sup> Entspricht im Schnitt 3,5 Fragen pro Schüler.

einen positiven Ergebnis gesprochen werden. Bezogen auf die gesamte Lerngruppe ergeben sich im Schnitt 0,9 kernphysikalische Fragen pro Schüler. Das bestätigt die Annahme, dass mithilfe dieses Films und ausgewählter Zitate kernphysikalische Fragestellungen im astrophysikalischen Kontext motiviert werden können.



**Abb. 40:** Aufteilung der gefragten Themen bezogen auf die Gesamtzahl der Fragen. Die farbliche Kodierung entspricht den Kategorien in Abbildung 39.

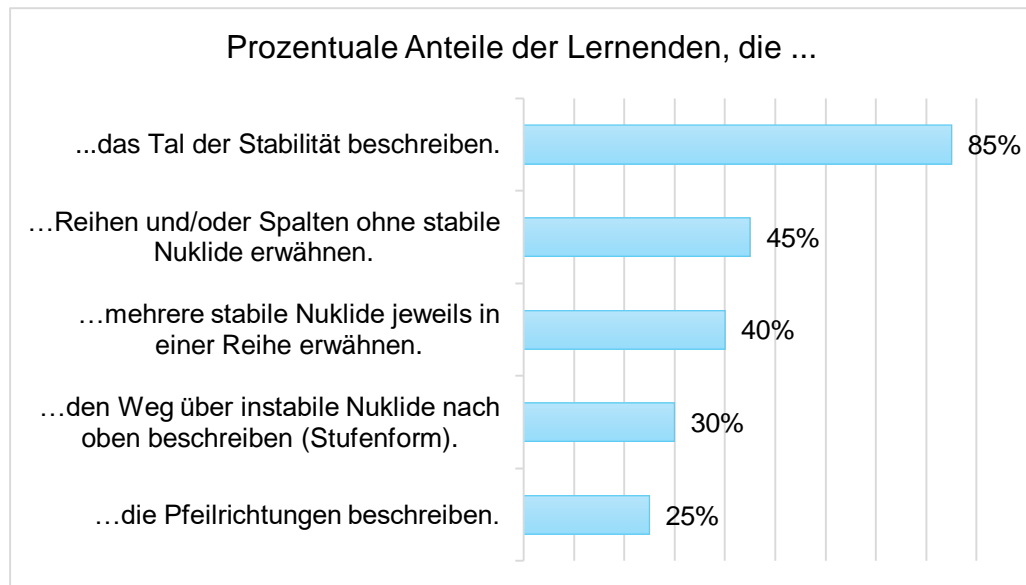
Die Auswertung der Fragen hat ein unerwartet hohes Interesse an zeitlichen Angaben astrophysikalischer Prozesse ergeben. Die Lebensdauer eines Sterns und die Dauer einer Supernova gehören zu den gefragtesten Themen. Deswegen wurde ein Vergleich der Entwicklungsphasen der Sonne und eines massereichen Sterns in der zweiten Doppelstunde thematisiert. Genauso waren auf diese Weise die Behandlung der Sternentstehung und der gesamte Materiekreislauf motiviert. Im kernphysikalischen Bereich gehören die Fragen zu den Brennprozessen im Stern, zur Energiequelle und Entstehung der Elemente nach Eisen zu den Häufigsten. Auf die Beantwortung dieser Fragen zielte die erste Doppelstunde ab.



Das kann die erfreulich hohe Aufmerksamkeit und Abwesenheit von Unterrichtsstörungen erklären, obwohl sehr viele Informationen in kürzester Zeit angesprochen wurden, bevor es zur aktiven Phase kam. Im Übrigen erlaubt die Auswertung der formulierten Fragen, Rückschlüsse auf Schülervorstellungen zu machen. Beispielsweise zeigen die Fragen nach Aggregatzuständen der Elemente und „anderer Materie“, dass zumindest bei einem Teil des Kurses ein eigentümliches Bild davon besteht, was ein Stern ist und welche Bedingungen dort herrschen. Für den regulären Unterricht können sich solche Erhebungen ebenfalls lohnen, um Fehlvorstellungen aufzudecken.

Aufgrund der Befürchtung, dass die langen Erarbeitungsphasen im lehrerzentrierten Unterrichtsgespräch auf die Mehrheit ermüdend wirken und wenig Zeit für eine aktive Auseinandersetzung mit dem Lernspiel bleibt, erfolgte die Einführung überhastet. Die Regeln und Zielsetzungen mussten in den jeweiligen Kleingruppen ausführlicher erläutert werden. Die anfängliche Unklarheit macht sich auf der negativen Seite des Feedbacks bemerkbar (siehe Anhang 11). Diese Schwachstelle lag bereits in der Planung und der Absicht in kürzester Zeit ein Lernspiel einzuführen, das auf nicht offensichtlichen Annahmen basiert. Schülerinnen und Schüler sollten im Vorfeld mit Pfeildarstellungen und Entstehungswegen im Z-N-Diagramm gearbeitet haben, bevor der s-Prozess mit dem Nuklid-Domino eingeführt wird. Trotz allem haben sich die Schülerinnen und Schüler ca. 25 Minuten aktiv mit dem Spiel auseinandergesetzt und es kamen die verschiedensten Ergebnisse zustande. Sechs davon wurden mit der Kamera festgehalten, bevor ein neuer Weg gelegt wurde (siehe Anhang 12).

Für den Lernerfolg des vorgestellten Lernspiels ist die Diskussion der Ergebnisse verantwortlich. Während des Spiels erfahren die Spieler zunächst nur die Vielfalt der Entstehungswege und verinnerlichen die grundsätzlichen Regeln des s-Prozesses. Aus dem bewussten Vergleich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der sich herausbildenden Strukturen, werden Rückschlüsse auf die allgemeine Beschaffenheit der Nuklidkarte gezogen. Vor dem Einsatz im Unterricht ist es wichtig zu erfahren, welche Erkenntnisse aus dieser Beschäftigung zu erwarten sind. Nach der Auswertung der schriftlichen Angaben zur Aufgabe 1 unterhalb der Aufnahmen in Anhang 12 konnten fünf verschiedene Typen von Antworten gebildet werden (siehe Abb. 41).



**Abb. 41:** Prozentuale Anteile der Angaben zu Aufgabe 1.

Die überwiegende Mehrheit beschreibt das Tal der Stabilität. Obwohl der Ausdruck weitgehend unbekannt ist, wird der von instabilen Nukliden eingerahmte Pfad aus stabilen Nukliden richtig beschrieben:

*„Die äußeren Seiten sind immer aus instabilen Nukliden gebildet, durch die sich die stabilen Nuklide einen Weg bahnen.“*

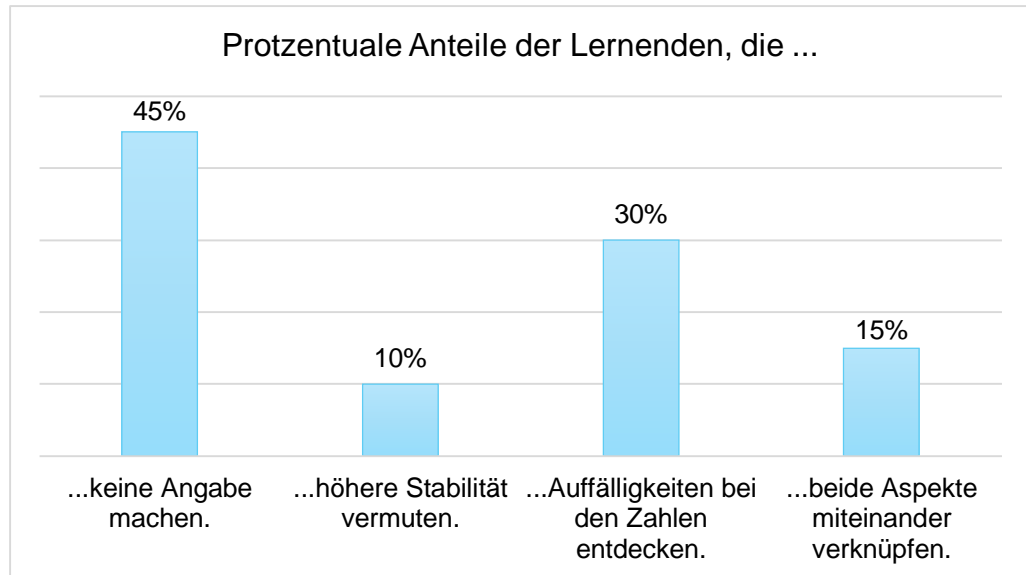
Zu den weniger offensichtlichen Erkenntnissen gehören die „übersprungenen“ Reihen und Spalten ohne stabile Nuklide sowie allgemeine Beschreibungen der Formen. Die Beschreibung der Pfeilrichtung zeigt, dass dieser Teil der Lernenden Schwierigkeiten bei der Interpretation des Spiels hatte. Die Farben und Pfeilrichtungen sind durch die Kernumwandlungen vorgegeben. Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Vermischung der Fachsprache mit den gewählten ikonischen Repräsentationen:

*„Die rosa Nuklide sind immer oben, die blauen unten und die schwarzen in der Mitte.“*

Diese Fehler sollten bei der Besprechung der Lernprodukte aufgedeckt werden.

Die nachfolgende Möglichkeit mit den Ergebnissen des Lernspiels umzugehen ist in Anhang 13 abgebildet. Zusammengelegte Strukturen können zugeschnitten und übereinandergelegt werden, sodass sie einen Teil der Nuklidkarte nachbilden. Es lässt sich auf den ersten Blick erkennen, dass nicht alle stabilen Nuklide durch den s-Prozess erreicht werden können. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass vorzugsweise lange Reihen von unter- oder nebeneinander angeordneten Nukliden „Stufen“ bilden. Außerdem gibt es auch hier Spalten oder Zeilen, die kein stabiles Nuklid aufweisen. Diese Beobachtungen, die bereits bei

Aufgabe 1 gemacht wurden, lassen sich mithilfe der Angaben zu Neutronen- und Protonenzahlen auf die Stabilität der Kerne beziehen (siehe Aufgabe 2 unterhalb der Nuklidkarte in Anhang 13). Hierbei gab es vier Arten von Antworten (siehe Abb. 42).



**Abb. 42:** Prozentuale Anteile der Angaben zu Aufgabe 2.

Ungefähr die Hälfte des Kurses konnte bei dieser Aufgabe nichts aufschreiben. Der Grund könnte in der kurzen Zeit oder am Mangel an Ideen liegen, der für diesen geschlossenen Operator *benennen* nicht ungewöhnlich ist. Der Rest hat sich in drei Gruppen aufgeteilt. Der kleinste Teil vermutete eine höhere Stabilität in den Reihen oder Spalten, ohne ein Begründung zu nennen:

*„Die schwarzen, also die Stufen [...] sind stabiler als die roten und die blauen.“*

Die größte Gruppe entdeckte, dass sich die Ketten bei geraden Zahlen bilden. 15% formulierten ihre Antwort so, dass die Aspekte im Zusammenhang stehen:

*„Es fällt auf, dass es bei gerader Protonenzahl und Neutronenzahl viel mehr stabile Verbindungen gibt als bei ungerader. Vielleicht ist der Kern bei genau diesen Anzahlen stabiler.“*

Die Auswertung zeigt, dass diese Verknüpfung für viele Schülerinnen und Schüler nicht selbstverständlich ist und das Aufstellen von Vermutungen mehr in den Unterricht eingebunden werden muss.

Insgesamt betrachtet, liefert das Nuklid-Domino gut interpretierbare Ergebnisse mit Gesprächsanlass. Die Qualität der Diskussionen lässt sich durch bessere Vorarbeit tiefgreifender und fachgerechter gestalten.

## 9 Zusammenfassung

Nukleosynthese schwerer Elemente ist ein Thema der modernen Physik, das die Forschung noch viele Jahre beschäftigen wird. Die Literaturrecherche ergab, dass der Ursprung der Materie bislang nicht im vollen Umfang im Unterricht behandelt wird. Die übliche Strukturierung der Inhalte gibt der Strahlung radioaktiver Nuklide Vorrang vor ihrer Zusammensetzung und Umwandlung, was sich in den Schülervorstellungen niederschlägt. Währenddessen ist das Interesse am Weltall und den Vorgängen, die sich dort abspielen, sowohl bei Jungen als auch bei Mädchen hoch. Eine kontextstrukturierte Unterrichtseinheit rund um die Entstehung der Elemente in den Sternen kann kern- und astrophysikalische Inhalte verknüpfen und wissenschaftliche Sichtweisen fördern.

Im Rahmen der Didaktischen Rekonstruktion wurden Leitlinien für einen Unterricht gesucht, der wissenschaftliche Perspektiven und Schülerperspektiven aufeinander bezieht und Vorstellungen auf diese Weise nachhaltig erweitert. Eine Analyse der Sachstruktur und eine Befragung in der Zielgruppe der Lernenden bildeten das Fundament dieser Arbeit. Als Ergebnis wurden Grundvorstellungen der Nukleosynthese zu den chemischen Elementen, dem Urknall, den Sternen und der Radioaktivität formuliert: Die Kernzusammensetzung ist für die Eigenschaften der Materie verantwortlich. Nach dem Urknall bildeten sich Neutronen und Protonen als Folge der Expansion des Universums. In Sternen fusionieren Kerne zu den Elementen bis Eisen unter Freisetzung der Bindungsenergie. Schwerere Elemente entstehen durch sukzessiven Neutroneneinfang, wobei die Umwandlung radioaktiver Nuklide aufgrund ihrer Kernzusammensetzung eine wichtige Rolle spielt.

Für die Umsetzung der Kontextstrukturierung wurde ein Film vorgeschlagen, der die Sternentwicklung eines massereichen Sterns und die Entstehung der Elemente umreißt. Ein Unterrichtsversuch in der Einführungsphase konnte bestätigen, dass Lernende kernphysikalische Fragen stellen, die als Grundlage für die Strukturierung des Unterrichts zur Erweiterung ihrer Vorstellungen genommen werden können. Um die exemplarische Bedeutung der Nukleosynthese schwerer Elemente sicherzustellen wurden ein vorläufiges Skript und Lernaktivitäten entwickelt, die sich an dem Erkenntnisprozess der Physik orientieren: Ausgehend

von Beobachtungen der Elemente in Überresten der Supernovae wird eine kernphysikalische Theorie ihrer Entstehung erarbeitet. Der Unterricht mündet in eine selbstständige Untersuchung der Nuklidlandschaft und Modellierung der relativen Häufigkeiten. Die Ergebnisse werden wiederum mit den Beobachtungen verglichen.

Im vierstündigen Unterrichtsversuch konnten der Gesamt Ablauf und das Potential der Lernaktivitäten nur ansatzweise überprüft werden. Dennoch wurden die große Bedeutung der Vorarbeit und erste Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Vorhabens aufgedeckt. Erweiterungen und aufwendigere Testverfahren sind nötig, bevor von einer erfolgreichen Verortung der Nukleosynthese schwerer Elemente im Oberstufenunterricht gesprochen werden kann. Diese Arbeit kann als Pilotstudie in einer Reihe von Weiterentwicklungen betrachtet werden, wie sie innerhalb der Didaktischen Rekonstruktion vorgesehen sind. An der grundsätzlichen Bedeutung des Themas für das Verständnis der Welt sollte es jedoch keine Zweifel mehr geben.

## 10 Literaturverzeichnis

- Bleck-Neuhaus, J. (2013). *Elementare Teilchen: Von den Atomen über das Standard-Modell bis zum Higgs-Boson*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Blum, W., & Leiß, D. (2005). Modellieren im Unterricht mit der „Tanken“- Aufgabe. *mathematik lehren, Heft 128*, S. 18-21.
- Böhme, G., & Böhme, H. (2010). *Feuer, Wasser, Erde, Luft: Eine Kulturgeschichte der Elemente*. 2. Auflage. München: Beck.
- Boyd, R. N. (2008). *An Introduction to Nuclear Astrophysics*. Chicago an London: The University of Chicago Press.
- Breuer, E., Burzin, S., Dörr, J., Erb, R., Schlichting, H. J., Schön, L.-H., . . . Winter, R. (2014). *Fokus Physik Sekundarstufe II Gesamtband*. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen Schulverlage GmbH.
- Constan, Z. (2013). *Learn Nuclear Science With Marbles*. Abgerufen am 28. Oktober 2015 von JINA/NSCL outreach service: <http://www.jina-web.org/outreach/marble/>
- Demtröder, W. (2014). *Experimentalphysik 4: Kerne-, Teilchen- und Astrophysik*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Diehl, B., Erb, R., Lindner, K., Schmalhofer, C., Schön, L.-H., Tillmanns, P., & Winter, R. (2008). *Physik Oberstufe Gesamtband*. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Dorn, F., & Bader, F. (2010). *Dorn / Bader Physik Gymnasium SEK II*. (F. Bader, Hrsg.) Braunschweig: Schroedel Verlag GmbH.
- Duit, R. (2004). *Piko-Brief Nr. 1 - Schülervorstellungen und Lernen von Physik*. Abgerufen am 20. Oktober 2015 von IPN Kiel: <http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/piko-briefe032010.pdf>
- Duit, R., Komorek, M., & Wilbers, J. (1997). Studien zur Didaktischen Rekonstruktion der Chaostheorie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften; Jg. 3, Heft 3*, S. 19-34.
- Elster, D. (2007). In welchen Kontexten sind naturwissenschaftliche Inhalte für Jugendliche interessant? *PLUS LUCIS 3/2007*, S. 2-8.
- Falk, M. (2011). Die Lust am Licht im Unterricht. *Sterne und Weltraum Nr. 7*, S. 78-85.
- Fey, M. (2004). *Im Brennpunkt der Nuklearen Astrophysik: Die Reaktion  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$* . Stuttgart: Institut für Strahlenphysik.

- Fischer, N. (2007). *Ein Stern (fast) zum Anfassen*. Abgerufen am 30. September 2015 von Wissenschaft in die Schulen!: <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/ein-stern-fast-zum-anfassen/1051492>
- Fischer, O. (2005). *Supernovae und ihre Überreste - Makroskopische Ereignisse mit mikroskopischem Hintergrund*. Abgerufen am 30. September 2015 von Wissenschaft in die Schulen!: <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/supernovae-und-ihre-ueberreste/1051528>
- Fowler, W. A. (1988). *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics*. Chicago: The University of Chicago.
- Gabriel, P., & Backhaus, U. (2011). Usain Bolt – Der schnellste Mensch der Welt: Entwicklung einer kontextstrukturierten Unterrichtseinheit. *Didaktik der Physik: Frühjahrstagung - Münster*.
- Gaßner, J. M. (2008). *Berechnungen zur primordialen Nukleosynthese*. München: Dissertation der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität.
- Gerhardus, A., Küsters, D., & Stinner, P. (2009). *Spektroskopie an galaktischen Gasnebeln*. Abgerufen am 30. September 2015 von [lehrer-online.de](http://www.lehrer-online.de): <http://www.lehrer-online.de/spektroskopie-gasnebel.php>
- Grehn, J., & Krause, J. (2007). *Metzler Physik SII*. 4. Auflage. Braunschweig: Schroedel Verlag GmbH.
- Heide, F. (1957). *Kleine Meteoritenkunde*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer.
- Henne, B., & Kiehlmann, S. (2011). *Sternaufbau und -Entwicklung (+9 Unterkapitel)*. Abgerufen am 10. November 2015 von LP: Online-Angebot der Georg-August-Universität-Göttingen: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7157>
- Hessisches Kultusministerium. (2010). *Bildungsstandards und Inhaltsfelder - Das neue Kerncurriculum für Hessen - Sekundarstufe I Gymnasium*. Abgerufen am 20. Oktober 2015 von Hessische Lehrkräfteakademie: [https://la.hessen.de/irj/LSA\\_Internet?cid=dc0acae7616326e11527e9084e3b1fe9](https://la.hessen.de/irj/LSA_Internet?cid=dc0acae7616326e11527e9084e3b1fe9)
- Hessisches Kultusministerium. (2014). *Kerncurriculum für die gymnasiale Oberstufe: Physik (Entwurf)*. Endgültige Textfassung zur Zeit der Bearbeitung nicht veröffentlicht.
- Kattmann, U. (2005). Lernen mit anthropomorphen Vorstellungen? – Ergebnisse von Untersuchungen zur Didaktischen Rekonstruktion in der Biologie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften; Jg. 11*, S. 165-174.

- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschafts-didaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften; Jg. 3, Heft 3*, S. 3 - 18.
- Kifondis, K. (2000). *Nucleosynthesis and Hydrodynamic Instabilities in Core Collapse Supernovae*. München: Technische Universität.
- Kircher, E., & Girwidz, R. (2009). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*. (P. Häußler, Hrsg.) 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Klafki, W. (2007). *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik: Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (6., neu ausgestattete Ausg.). Weinheim und Basel: Beltz Verlag.
- Klein, P. (1993). Das Hertzsprung-Russel-Diagramm in der Sekundarstufe. *NiU Physik 4 Nr. 20*, S. 34-38.
- Langke, K., & Stöcker, H. (2010). Universum im Labor. *Sterne und Weltraum Nr. 12*, S. 40-49.
- Larson, R. B., & Bromm, V. (2002). Die ersten Sterne. *Spektrum der Wissenschaft Nr. 2*, S. 26-33.
- Maugeri, J. V. (2007). Das Einmaleins der Sterne. *Astronomie Heute Januar/Februar*, S. 30-34.
- Meschede, D. (2006). *Gerthsen Physik*. 23. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen.
- Müller, R. (2006). Kontextorientierung und Alltagsbezug. In H. Mikelskis, *Physikdidaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 102-119). Berlin: Cornelsen.
- National Research Council. (2003). *Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century*. Washington, D.C.: THE NATIONAL ACADEMIES PRESS.
- Nawrath, D. (2010). Kontextorientierung - Rekonstruktion einer fachdidaktischen Konzeption für den Physikunterricht. In *Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion, Bd. 29*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Neumann, S. (2014). What Students Think About (Nuclear) Radiation - Before and After Fukushima. *Nuclear Data Sheets 120*, S. 166-168.
- Neumann, S., & Hopf, M. (2011). Was verbinden Schülerinnen und Schüler mit dem Begriff ‚Strahlung‘? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften; Jg. 17*, S. 157-176.
- Neumann, S., & Hopf, M. (2012). Students' Conceptions About 'Radiation': Results from an Explorative Interview Study of 9th Grade Students. *Journal of Science Education and Technology Volume 21 Issue 6*, S. 826-834.



- Okrusch, M., & Matthes, S. (2010). *Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Petrologie und Lagerstättenkunde*. 8. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Petri, J., & Niedderer, H. (2001). Kognitive Schichtenstrukturen nach einer UE Atomphysik (Sek II). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*; Jg. 7, S. S. 53 - 68.
- Povh, B., Rith, K., Scholz, C., & Zetsche, F. (2009). *Teilchen und Kerne: Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. 8. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Rapp, W. (2004). *Nukleosynthese im p-Prozess: Querschnittsmessungen und Häufigkeiten*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.
- Reinfried, S., Aeschbacher, U., Kienzler, P. M., & Tempelmann, S. (2013). Mit einer didaktisch rekonstruierten Lernumgebung Lernerfolge erzielen – das Beispiel Wasserquellen und Gebirgshydrologie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*; Jg. 19, S. 259-286.
- Röser, S., & Schilbach. (2011). Offene Sternhaufen: Bausteine der Milchstraße. *Sterne und Weltraum Nr. 8*, S. 30-41.
- Rubin, A. E. (2014). Urtümliche Meteoriten. *Spektrum der Wissenschaft März*, S. 44-49.
- Rupp, C. (2012). *Nuklidkarte mit Halbwertszeiten und Trennenergien*. Abgerufen am 13. November 2015 von Europa-Gymnasium Würth: [http://www.egwoerth.de/faecher/physik/PhysikUnterlagen/Physik\\_Nuklidkarte\\_EGW.pdf](http://www.egwoerth.de/faecher/physik/PhysikUnterlagen/Physik_Nuklidkarte_EGW.pdf)
- Sackmann, I. J., Boothroyd, A. I., & Kraemer, K. E. (1993). Our Sun. III. Present and Future. *Astrophysical Journal v.418*, S. 457.
- Scorza, C. (2011). *Die Suche nach verborgenen Sternen*. Abgerufen am 30. September 2015 von Wissenschaft in die Schulen!: <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/die-suche-nach-verborgenen-sterne/1116791>
- Taber, K. S. (2000). Multiple frameworks?: Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *International Journal of Science Education, Vol. 22, No. 4*, S. 399-417.
- Tillemans, A. (2008). *Das Spielbrett der Schöpfung*. Abgerufen am 26. November 2015 von bild der wissenschaft: [http://www.wissenschaft.de/home/-/journal\\_content/56/12054/1597327](http://www.wissenschaft.de/home/-/journal_content/56/12054/1597327)
- Unal, R., & Zollman, D. (1999). *Students' Description of an Atom: A Phenomenographic Analysis - Department of Physics - Kansas State University*. Abgerufen am 23. Oktober 2015 von CiteSeerX: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.490.3288&rep=rep1&type=pdf>

- Weiss, A. (2006). *Gleichgewicht und Veränderung*. Abgerufen am 15. November 2015 von Einstein Online Band 02, 1112 (Webangebot des Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik): [http://www.einstein-online.info/vertiefung/BBN\\_phys/?set\\_language=de](http://www.einstein-online.info/vertiefung/BBN_phys/?set_language=de)
- Weiss, A. (2012). *Nukleosynthese*. Garching: Max-Planck-Institut für Astrophysik. Abgerufen am 13. November 2015 von [http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/~weiss/Nukleosynthese\\_04/Nukleosynthese.pdf](http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/~weiss/Nukleosynthese_04/Nukleosynthese.pdf)
- Welsch & Partner. (2005). *Supernova Typ 2 (2D)*. Abgerufen am 30. September 2015 von Welsch & Partner: [http://www.welsch.com/welschware/sn2\\_2d.php](http://www.welsch.com/welschware/sn2_2d.php)
- Zimmermann, O. (1985). Zur Behandlung der Sternentwicklung im Astronomieunterricht der Sekundarstufe II. *Sterne und Weltraum Nr. 4*, S. 205-209.

# Anhang

## 1 Fragebogen

### Fragebogen zur Kernphysik

Mit diesem Fragebogen werden Ihre Vorstellungen erhoben, die Sie in der Oberstufe vor der Behandlung kernphysikalischer Themen für gewöhnlich mitbringen. Die Befragung ist anonym und keine Klausur, sodass es keine „falschen“ Antworten gibt.

- 1 Zeichnen Sie bitte Ihre Vorstellung eines Atoms und eines Atomkerns in die zwei Bereiche ein (ggf. mit Beschriftung).

Atom:	Atomkern:
-------	-----------

- 2 Was verstehen Sie unter einem chemischen Element?

- 3 Was wissen Sie vom Urknall?

- 4 Welche Vorgänge laufen im Inneren eines typischen Sterns ab?

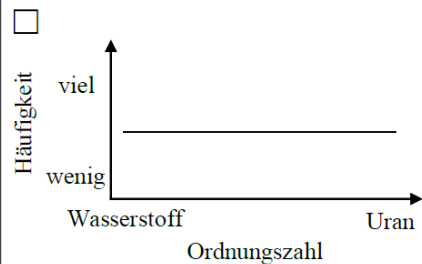
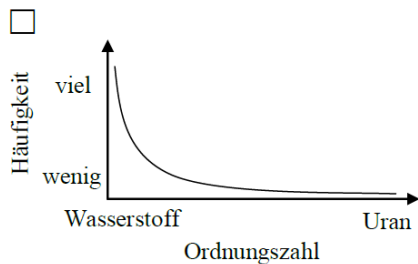
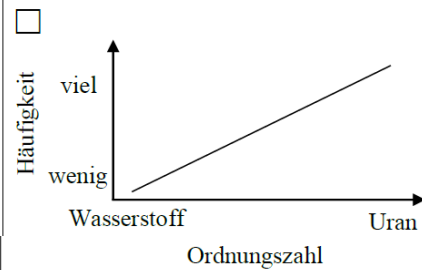
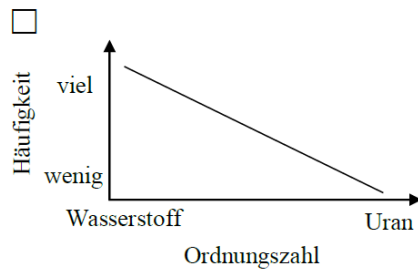
- 5 Was verbinden Sie mit dem Begriff der Radioaktivität?

Bitte geben Sie an, wie groß Ihr Interesse für die folgenden Fragen ist: gering - sehr groß

- 6.1 Wie die verschiedenen Stoffe (chemischen Elemente) entstanden sind.
- 6.2 Welche Bedeutung die Sterne für die Herkunft der Materie haben.
- 6.3 Wie sich das Universum seit dem Urknall entwickelt hat.
- 6.4 Was sich kernphysikalisch beim radioaktiven Zerfall abspielt.

- 7.1 Welchen Aussagen würden Sie zustimmen? Mehrfachantwort möglich!
- 7.2  Alle chemischen Elemente sind seit dem Urknall da.
- 7.3  Die ersten radioaktiven Kerne entstanden während der Kernspaltung des Urans.
- 7.4  Beim radioaktiven Zerfall finden Kernumwandlungen statt.
- 7.5  Es können mehrere stabile Isotope eines chemischen Elements existieren.
- 7.6  Radioaktiven Zerfall gibt es nur in der Nähe von Kernkraftwerken oder Atommülllagern.
- 7.7  Die Kernfusion ist eine Energiequelle, die es außer in der Sonne nicht in der Natur gibt.
- 7.8  Radioaktivität hat einen natürlichen Ursprung.
- 7.9  Die Erforschung der Radioaktivität hat der Menschheit mehr geschadet als genutzt.
- 7.10  Wir sind auch im Alltag ionisierender Strahlung ausgesetzt.

- 8 Welches Diagramm entspricht Ihrer Meinung nach am ehesten der Realität?  
Gemeint ist die Häufigkeit der chemischen Elemente im Universum.



*Vielen Dank für Ihre Mithilfe!*

## 2 Spielfeld

### Nuklid-Domino

Modellieren Sie zu zweit Entstehungswege der schweren Elemente! Legen Sie dazu abwechselnd einen der Bausteine in das Z-N-Diagramm. Das Ziel ist es, einen Weg vom stabilen Saatnuklid aus in den gestrichelten Bereich zu legen.

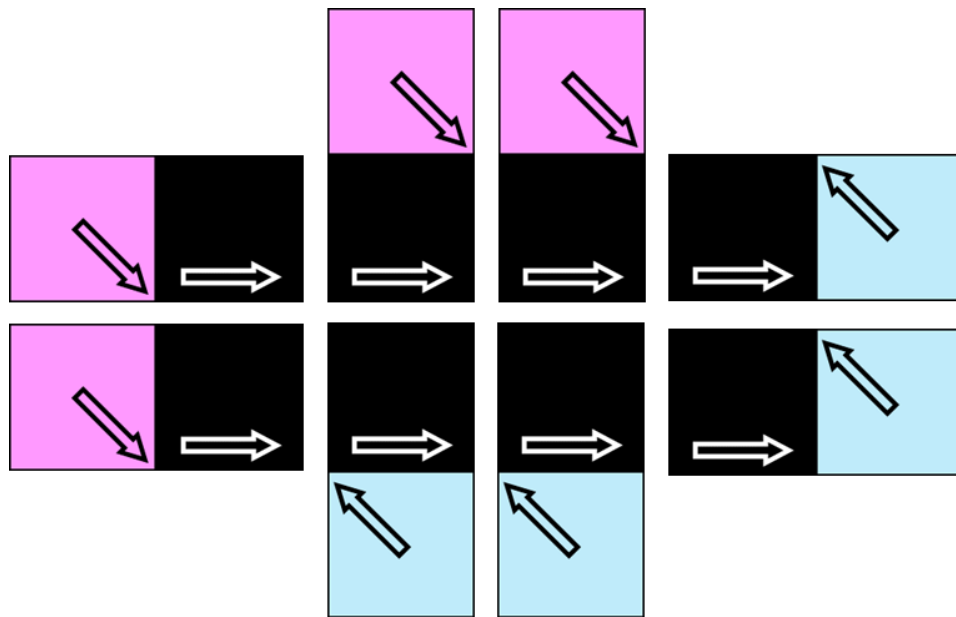
Wer als erstes ein stabiles Nuklid in den Zielbereich legt, gewinnt. Zählen Sie nach jeder Runde nach, wie viele stabile Isotope es in einer Zeile gab!

Zusatzfragen:

- Können Elemente kein stabiles Isotop in einer Zeile haben?
- Gibt es Neutronenzahlen ohne stabile Nuklide in einer Spalte?

stabil Neutroneneinfang  
 instabil  $\beta^-$ -Zerfall  
 instabil  $\beta^+$ -Zerfall

## 3 Bausteine



## 4 Unterstützung der Planungsphase

Welche Fragen ergeben sich nach dem Film?

„Durch den Urknall sind die leichten Elemente Wasserstoff und Helium entstanden.“

„Schwerere Elemente mussten durch massereiche Sterne erbrütet werden.“

„Die Brennprozesse bilden die Energiequelle des Sterns.“

„Das Element Nickel entsteht erst in der Explosion.“

„Wenn ein Kern aus Eisen besteht, geht dem Stern der Brennstoff aus.“

The collage includes a bright star, a supernova explosion, and a cross-section of a star's core showing layers of elements: H, He, C, O, Ne, Mg, Si, S, and Fe.

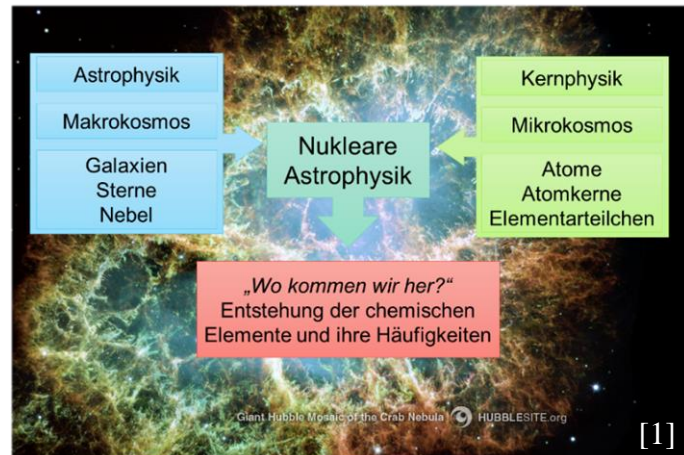
Abbildungen und leicht abgeänderte Aussagen aus „Supernovae – Was passiert, wenn Sterne sterben?“ (2013) von fluxfilm.de Filmproduktion - Nicola Wettmarshausen: <http://fluxfilm.de/video/supernovae.html>.

## 5 Skript

Der Nachthimmel bietet nicht nur einen Blick auf die Sterne, sondern auch auf das, was nach ihrem Tod übrig bleibt. Selbst mit den einfachsten Teleskopen können die schwach leuchtenden Wolken aus Staub und Gas als graue, nebelartige Flecken entdeckt werden. Sie markieren die Überreste einer Supernova, in der ein massereicher Stern sein Ende fand. Das Material aus dem auch wir entstanden sind.

### 1. Woher weiß man das alles so genau?

Die Astrophysik liefert das Verständnis solcher Vorgänge im Universum, während sich die Kernphysik mit den kleinsten Bausteinen der Materie beschäftigt. Die Verschmelzung der Erkenntnisse aus beiden Bereichen erlaubt der Nuklearen Astrophysik



die Beantwortung der Frage nach der Herkunft der Materie und unserer eigenen Entstehungsgeschichte. Nach dem folgenden Einblick in die physikalischen Prozesse bei der Entstehung der Elemente wird die Aussage, dass wir alle aus Sternenstaub bestehen, weniger unglaublich erscheinen.

### 2. Was macht die Elemente so interessant?

In der Chemie werden Stoffe in dem Periodensystem der Elemente geordnet. Ihre traditionellen Elementbezeichnungen hängen eindeutig mit der Ordnungszahl des Elements zusammen. Diese steht für die Anzahl der Protonen im Atomkern. Die Anzahl der positiv geladenen Kernbausteine im Atomkern bestimmt die Anzahl der Elektronen in der Elektronenhülle. Damit wird festgelegt, welche Bindungen das Atom eingehen kann. Davon hängen alle chemischen Reaktionen ab, was die Elemente zu den kleinsten Bausteinen der Materie für die Chemiker

1																	8
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub						

[2]

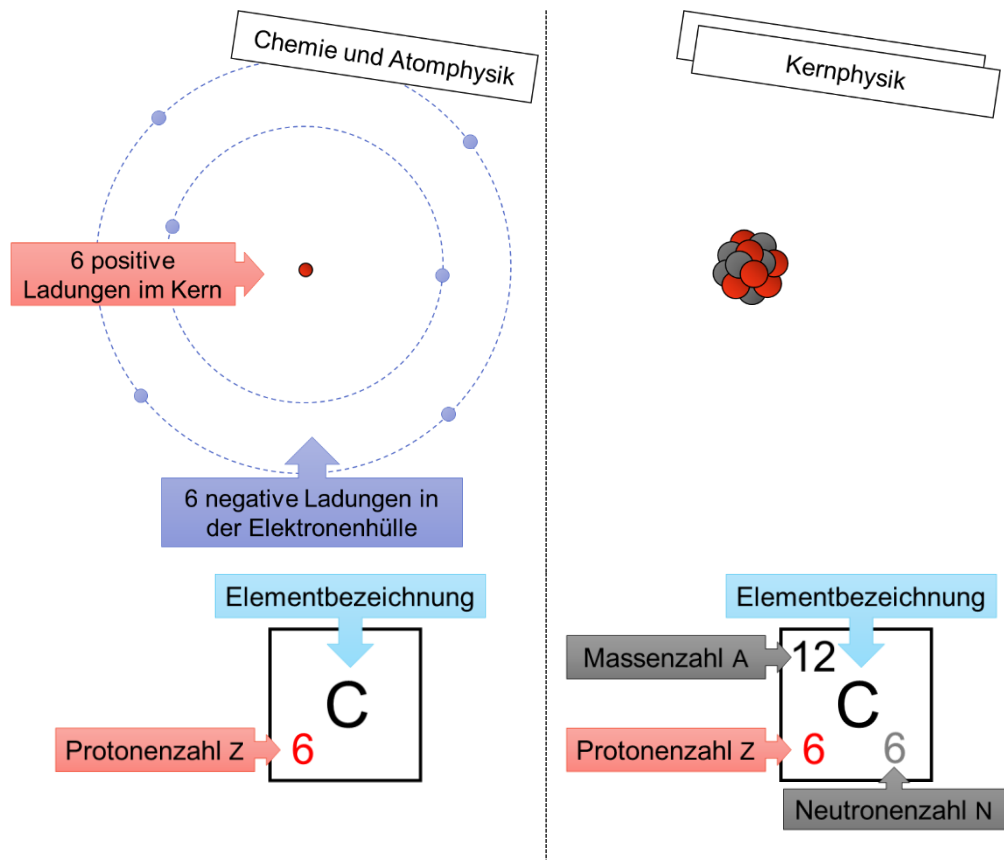
Periodensystem der Elemente

Elementbezeichnung

5	B	6	C	7	N	8	O	9	F
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

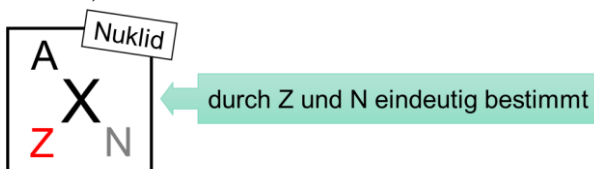
Ordnungszahl = Anzahl der Protonen im Atomkern

macht. Die Kernphysik beschäftigt sich mit Reaktionen, bei denen die Elektronenhülle meistens keine Rolle spielt. Auf dieser Ebene ist nicht nur die Ladung, sondern auch die Masse des Atomkerns wichtig.



Die Massenzahl  $A$  steht für die Anzahl der Kernbausteine (Nukleonen) im Atom. Sie setzt sich aus der Anzahl der Protonen  $Z$  und der Anzahl der ungeladenen

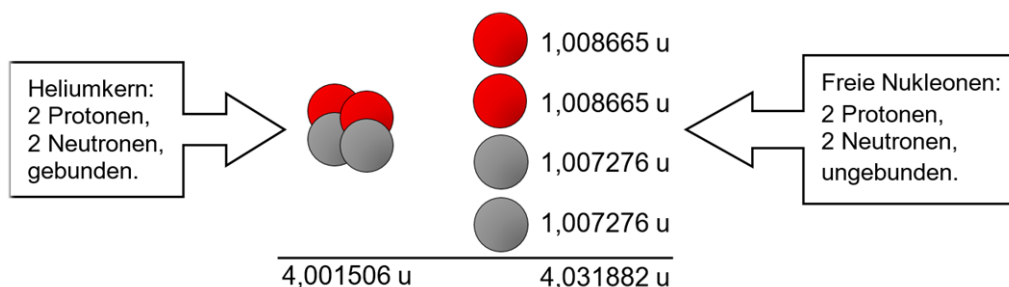
Neutronen  $N$  zusammen. Aufgrund unterschiedlicher Neutronenzahlen in den Kernen besteht eine Menge desselben Elements meist aus Atomen mit unterschiedlicher Masse. Man nennt sie Isotope des jeweiligen Elements. Die Angabe von  $Z$  und  $N$  eines Atomkerns bestimmt, um welches Nuklid es sich handelt. Die Elementbezeichnung ist nur im Zusammenhang mit der Masse ein eindeutiges Bestimmungsmerkmal der Atomsorte.



Um die Entstehung der verschiedenen Atomsorten verstehen zu können, muss man nicht nur die Zusammensetzung der Atomkerne, sondern auch ihre Eigenschaften kennen.



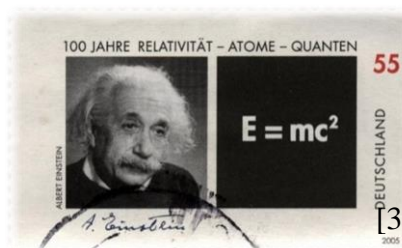
## 3. Woher kommt die Energie für den Brennprozess?



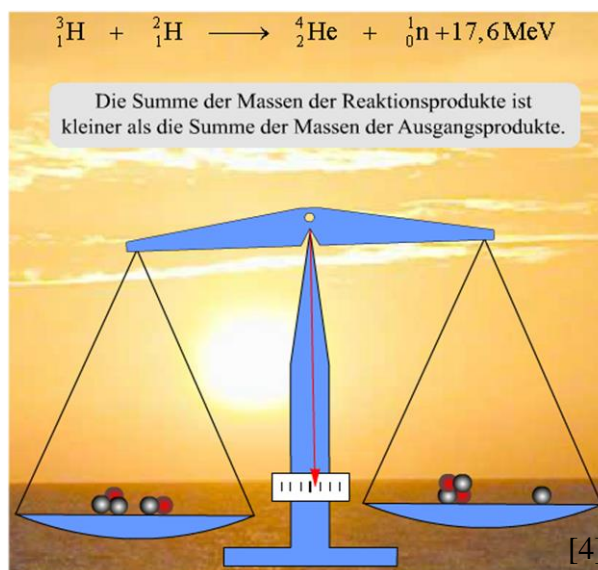
Die Masse eines Atomkerns ist stets etwas kleiner als die Summe der Ausgangsmassen freier Nukleonen. Dieser Unterschied wird als Massendefekt  $\Delta m$  bezeichnet:

$$\Delta m = m_{\text{Nukleonen}} - m_{\text{Kern}}$$

Das kann mit der von Einstein entdeckten Äquivalenz von Masse und Energie erklärt werden. Im gebundenen Zustand können sich Nukleonen nicht mehr frei bewegen, ihre potenzielle Energie ist deshalb etwas kleiner. Die fehlende Energie macht sich als fehlende Masse im Kern bemerkbar, da beide Größen über die Beziehung  $E = \Delta m \cdot c^2$  miteinander verknüpft sind.



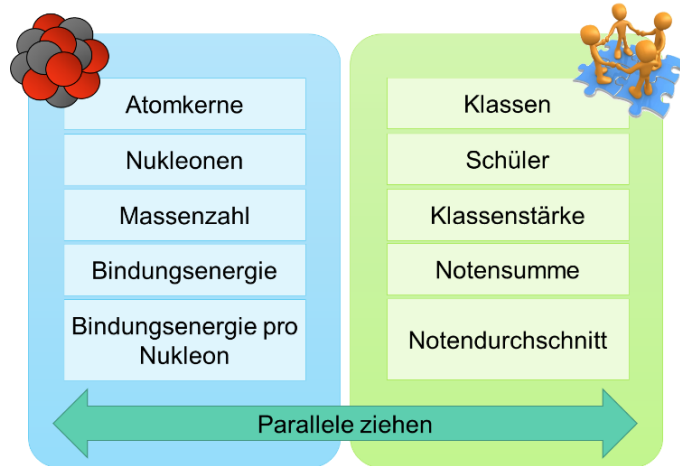
Diese Energie nennt man auch Bindungsenergie und sie macht sich immer dann bemerkbar, wenn Kerne ihre Gestalt ändern. So können Kerne miteinander verschmelzen und tun es schon seit Milliarden von Jahren in den Sternen. Im Beispiel rechts ist die Reaktionsgleichung der Fusion von Tritium und Deuterium, zweier Wasserstoff-Isotope, abgebildet. Der Massendefekt zwischen den Ausgangs- und Reaktionsprodukten ergibt umgerechnet eine freigesetzte Energie von



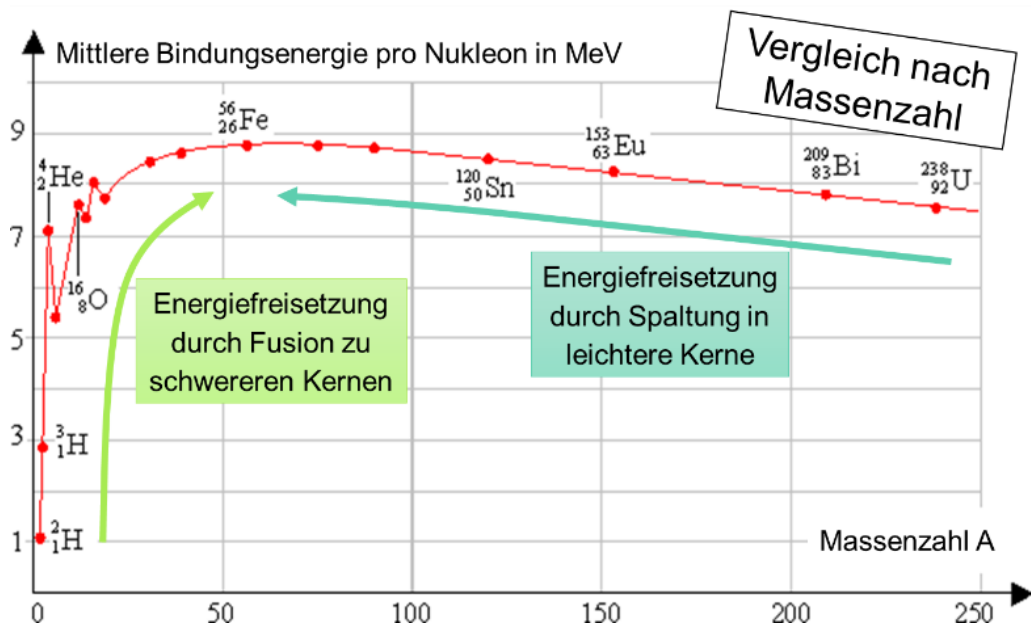
17,6 MeV. Eine enorme Summe, wenn man bedenkt, dass in einem Fusionsreaktor oder in der Sonne unzählige Atomkerne miteinander verschmelzen und nicht nur zwei. Damit es dazu kommt, benötigt man jedoch extrem hohe Temperaturen und einen enormen Druck. Also Zustände, die hauptsächlich in den Sternen herrschen.

#### 4. Wieso hört die Fusion bei Eisen auf?

Atomkerne unterscheiden sich in ihren Eigenschaften bei verschiedenen Massenzahlen. Um diese Unterschiede sichtbar zu machen, ziehen wir eine anschauliche Parallele zwischen Atomkernen und Schulklassen. In einer Vergleichsklausur reicht es nicht, die Noten-



summen von verschiedenen Klassen als Richtgröße zu nehmen. Größere Klassen bekommen allein aufgrund der höheren Klassenstärke eine größere Notensumme zusammen. Man bildet deshalb den Notendurchschnitt, der die Durchschnittsleistung jedes einzelnen Schülers angibt. Genauso verfährt man auch mit Atomkernen, bei denen nicht die gesamte Bindungsenergie zu vergleichen ist, sondern die Bindungsenergie geteilt durch die Anzahl der Nukleonen. Sie gibt demnach an, wie stark jeder einzelne Kernbaustein im Schnitt an den Kern gebunden ist. Damit lässt sich die Stabilität der Kerne vergleichen. In dem folgenden Diagramm ist die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon nach steigender Massenzahl aufgetragen.



Man erkennt an dem Verlauf des Graphen, dass bei leichten Kernen der Betrag mit steigender Massenzahl zunimmt. Bei ihrer Fusion entstehen somit Kerne, die stärker gebunden sind als ihre Vorgänger. Die Energiedifferenz wird in Form von kinetischer Energie und Strahlung frei. Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon steigt bis Eisen an und nimmt bei schwereren Kernen wieder ab. Dadurch kann nur durch Spaltung der schweren Kerne wieder Energie gewonnen werden, denn die Spaltprodukte sind stärker gebunden als ihre Vorgänger. Auf

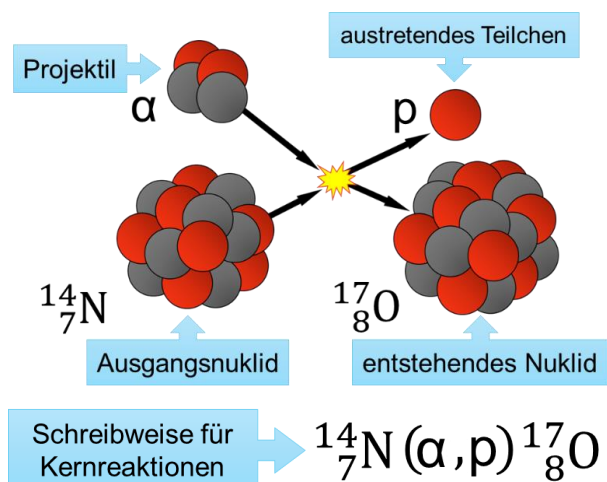
unseren Vergleich mit Schulklassen bezogen, heißt das: Wenn es eine optimale Klassenstärke gäbe, bei der die besten Noten geschrieben werden, sollte man zur Verbesserung des Schnitts kleine Klassen zusammenlegen und große auflösen.

Für die Frage nach der Entstehung der Elemente hat dieses Diagramm eine große Bedeutung. Sterne setzen mit der Fusion in ihrem Inneren nicht nur enorme Energien in Form von Strahlung frei, die unseren Planeten erreicht und Leben ermöglicht. Sie sind auch gigantische „Elementfabriken“, ohne die das Universum hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium bestehen würde. Es müssen jedoch andere Kernumwandlungsprozesse existieren, die für die Entstehung von schwereren Elementen als Eisen verantwortlich sind.

## 5. Wie entstehen schwerere Elemente?

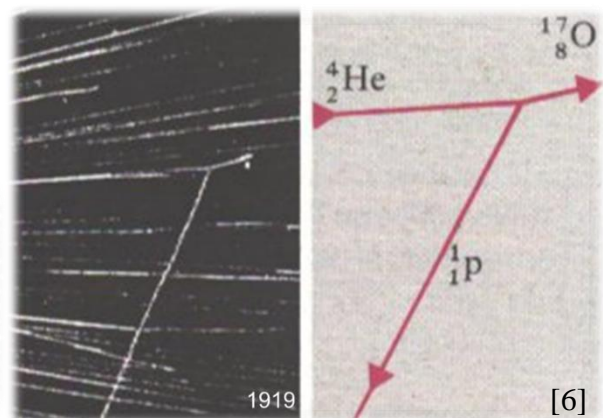
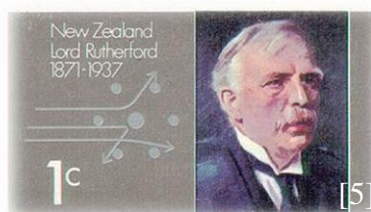
### a. Beschuss von Kernen

Man bezeichnet eine Kernumwandlung als Kernreaktion, die durch den Beschuss eines Atomkerns mit Neutronen, Heliumkernen oder anderen Teilchen ausgelöst wird. Durch den Zusammenstoß wird ein Atomkern in ein anderes, meist schwereres Nuklid umgewandelt. Bei der Kernreaktion handelt es sich daher um eine künstlich erzeugte Kernumwandlung. Der Kernzerfall wird nicht zu den Kernreaktionen gezählt, da diese Art der Kernumwandlung spontan erfolgt.



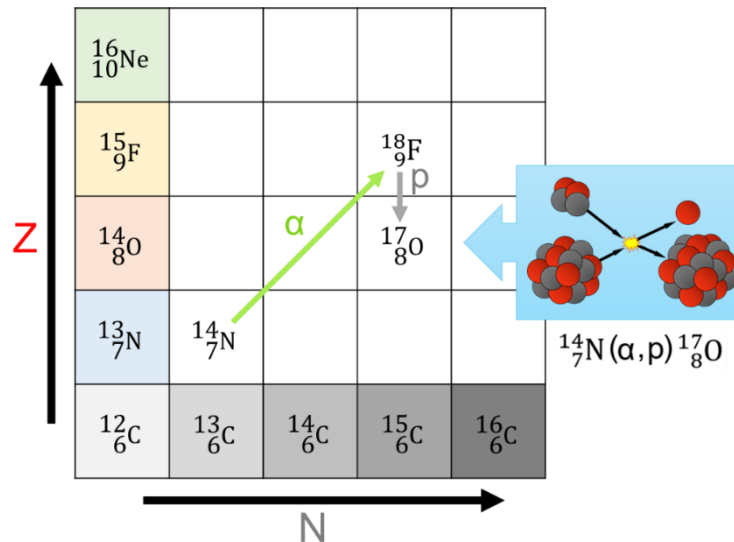
Man schreibt zunächst das Ausgangsnuklid und das entstehende Nuklid mit ihren Massenzahlen und Kernladungszahlen. Dazwischen setzt man in Klammern das Zeichen für das Projektil, mit dem das „Target“ beschossen wurde und das austretende Teilchen, das den Kern nach der Reaktion verlässt.

Diese erste künstliche Kernumwandlung wurde 1919 von RUTHERFORD in einer Nebelkammer beobachtet:



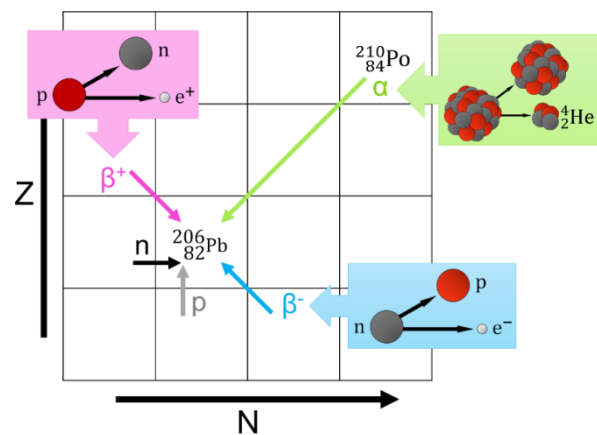
## b. Z-N-Diagramm

Nuklide sind in ihrer Zusammensetzung durch die Protonenzahl  $Z$  und die Neutronenzahl  $N$  eindeutig bestimmt. Damit lässt sich ein Z-N-Diagramm konstruieren, in dem jede Position einer eindeutigen Nuklidzusammensetzung entspricht. Die Kernreaktion des Stickstoffs mit einem  $\alpha$ -Teilchen lässt sich als Weg in dem Diagramm darstellen. Das eingefangene  $\alpha$ -Teilchen, ein  ${}^4_2\text{He}$ -Kern, erhöht  $N$  und  $Z$  um zwei. Das instabile Fluor-Isotop  ${}^{18}_9\text{F}$  sendet ein Proton aus und es entsteht ein stabiles Sauerstoff-Isotop mit neun Neutronen.

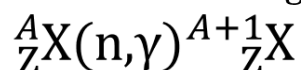


## c. Entstehungswege

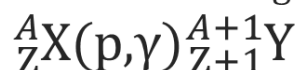
Auch beim Kernzerfall wandeln sich radioaktive Nuklide in andere Elemente um. Das stabile Blei-206 entsteht auf natürliche Weise als Endnuklid der Zerfallsreihe des Uran-238, zuletzt durch einen  $\alpha$ -Zerfall des Polonium-210. Es sind jedoch auch andere Entstehungswege vorstellbar. Beim  $\beta^+$ -Zerfall wird spontan ein Proton in ein Neutron umgewandelt, sodass aus dem instabilen Nuklid links oben Blei-206 entstehen kann. Ebenso kann ein Nuklid rechts unten mit einem  $\beta^-$ -Zerfall als Ausgangsnuklid dienen. Darüber hinaus könnte das Nuklid links davon einen Neutroneneinfang oder das Nuklid unterhalb davon einen Protoneneinfang machen:



Neutroneneinfang

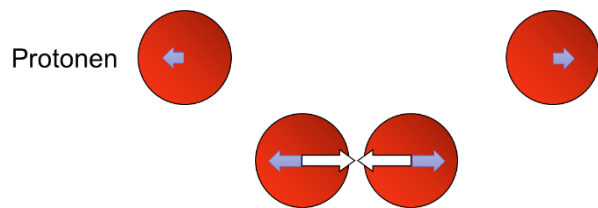


Protoneneinfang



Bei beiden Vorgängen wird die Massenzahl  $A$  erhöht, was durch keinen  $\beta$ -Zerfall geschafft werden kann. Beim Protoneneinfang entsteht sogar ein schwereres Element, doch die Wahrscheinlichkeit der beiden Vorgänge ist unterschiedlich.

Protonen sind geladene Teilchen und spüren untereinander abstoßende elektrische Kräfte (blaue Pfeile). Stark anziehende Kernkräften zwischen den Kernbausteinen halten den Kern jedoch zusammen (weiße Pfeile). Sie wirken aber erst, wenn die Nukleonen nah beieinander sind. Das heißt, dass die abstoßenden Kräfte erst überwunden werden müssen, bevor die Kernkräfte greifen können, wenn man ein geladenes Proton in den Kernverband eingliedern möchte. Ein Neutron muss lediglich in die Nähe des Kerns gebracht werden, damit es vom Kern „eingefangen“ wird:



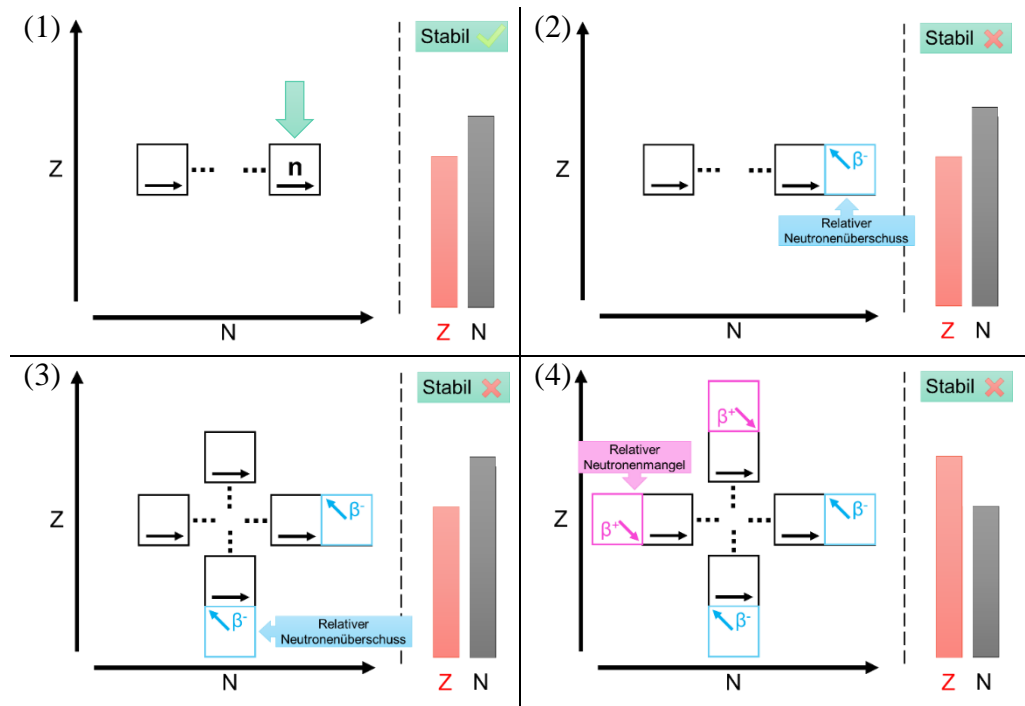
abstoßende elektrische Kräfte	stark anziehende Kernkräfte
haben große Reichweite	wirken erst bei geringer Entfernung
zwischen allen Protonen des Kerns	nur auf benachbarte Kernbausteine

Beim Protoneneinfang muss die elektrische Abstoßung der Protonen des Kerns überwunden werden, bevor die Kernkräfte greifen können!

Der Neutroneneinfang ist damit der wahrscheinlichere Schritt hin zu schwereren Atomkernen und zu schwereren Elementen.

## 6. Wie viele Neutronen können eingefangen werden?

Für gewöhnlich haben stabile Atome der uns umgebenden Materie ungefähr die gleiche Anzahl an Protonen und Neutronen im Atomkern. Es können jedoch mehrere stabile Isotope existieren, die durch Neutroneneinfänge entstanden sind (1). Bei weiteren Neutroneneinfängen kommt es unweigerlich zu einem relativen Neutronenüberschuss, der über dem Neutronenüberschuss eines stabilen Isotops liegt, und der Kern wird instabil (2). Das energetisch günstige Verhältnis zwischen Neutronen und Protonen kann jedoch durch einen oder mehrere  $\beta^-$ -Zerfälle wiederhergestellt werden, indem die „überschüssigen“ Neutronen in Protonen umgewandelt werden. Ein relativer Neutronenüberschuss kann darüber hinaus bei Nukliden vorliegen, die bei derselben Neutronenzahl weniger Protonen besitzen, als stabile Nuklide in dieser Spalte für gewöhnlich haben (3). Darauf folgt ebenfalls ein  $\beta^-$ -Zerfall. Auf der anderen Seite kann die Situation der Nuklide genau umgekehrt sein, sodass die Protonen in Vergleich zu den Neutronen in der Überzahl sind. Der relative Neutronenmangel wird durch  $\beta^+$ -Zerfälle kompensiert, indem ein Proton in ein Neutron umgewandelt wird (4).



Auf diese Weise ergeben sich vier Konstellationen von stabilen und instabilen Nukliden mit Pfeilen, die die jeweilige Wegrichtung vorgeben. Bei dem vermuteten Entstehungsprozess der schweren Elemente macht damit jedes stabile Nuklid einen Neutroneneinfang und die instabilen Kerne folgen ihrem natürlichen Zerfallsweg, wobei andere Elemente entstehen.

#### Bildquellen:

[1] <http://hubblesite.org/gallery/album/nebula/pr2005037a/>

[2] [https://online.science.psu.edu/chem101\\_sp1/node/6276](https://online.science.psu.edu/chem101_sp1/node/6276)

[3] <http://assets.catawiki.nl/assets/5/b/a/c/bac3b240-5ceb-012d-294f-0050569439b1.jpg>

[4] <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/kernspaltung-und-kernfusion>

[5] <http://www.briefmarken-bl.ch/images/rutherford.jpg>

[6] <http://www.chempage.de/theorie/kernspalt.jpg>

#### Onlinequellen und Vertiefung:

<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/kernspaltung-und-kernfusion>

<http://www.roro-seiten.de/physik/10/kernphysik.pdf>

[http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap\\_2/vlu/radioaktivitaet.vlu/Page/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap\\_2/kap2\\_4/kap24\\_8/text.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap_2/vlu/radioaktivitaet.vlu/Page/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap_2/kap2_4/kap24_8/text.vscml.html)

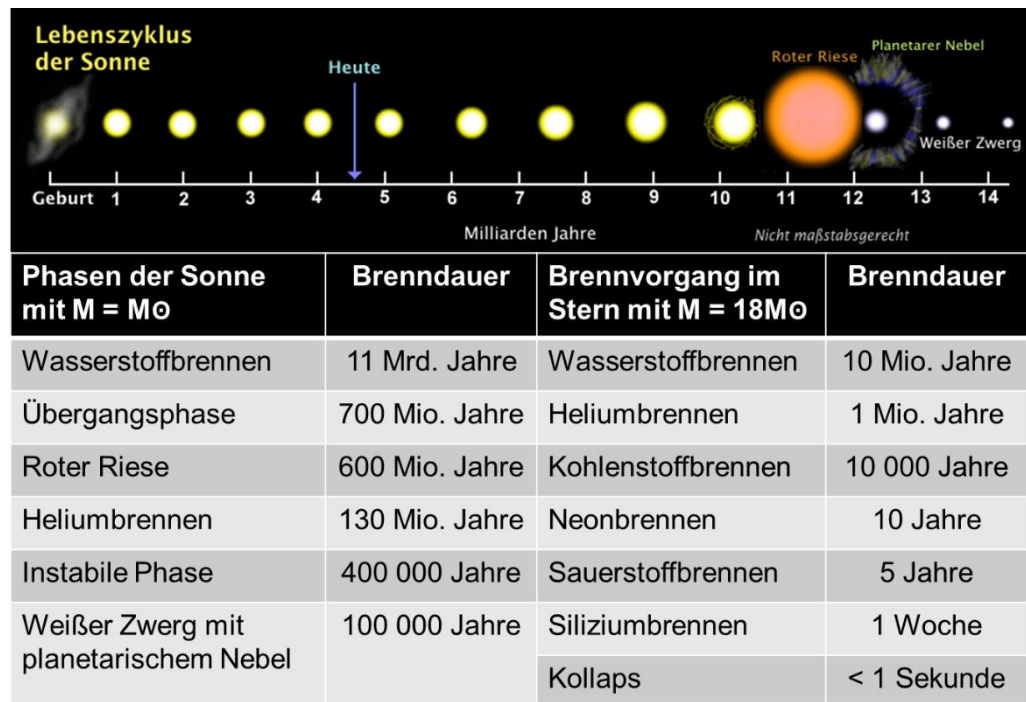
[http://www.lernort-mint.de/Physik/Atomphysik/kernphysik\\_kernumwandlung.html](http://www.lernort-mint.de/Physik/Atomphysik/kernphysik_kernumwandlung.html)

<http://www.uni-oldenburg.de/physik/forschung/ehemalige/uwa/rad/po-210/>

→ Alle zuletzt abgerufen am 1. Dezember 2015.



### 8 Lebensdauer von Sternen







Bildquelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Sonne#/media/File:Sun\\_Life\\_DE.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Sonne#/media/File:Sun_Life_DE.png).  
Angaben aus Demtröder, 2014, S. 351 und Sackmann, Boothroyd & Kraemer 1993.

### 9 Kosmischer Materiekreislauf

<p>Hauptreihenstern ggf. mit Planetensystem</p>	<p>Die längste Zeit seines Lebens von etwa 1 Million bis 100 Milliarden Jahren verbringt ein Stern auf der Hauptreihe. In diesem stabilen Zustand wird im Kern Wasserstoff zu Helium fusioniert und der dabei entstehende Strahlungsdruck gleicht sich mit dem eigenen Gravitationspotential aus. Der Prozess hält an, solange im Kern Wasserstoff vorhanden ist. Je schwerer ein Hauptreihenstern ist, umso kurzlebiger ist er.</p>
<p>Proto-sterne</p>	<p>Der Ursprung eines Sterns ist eine Gaswolke, also ein Teil der interstellaren Materie. Diese besteht im Wesentlichen aus Wasserstoff, kann aber auch schwerere Elemente beinhalten, die in vorherigen Sternengenerationen erzeugt und in die interstellare Materie überführt wurden. Ein möglicher Auslöser für Sternentstehung sind beispielsweise Supernovae, deren Stoßfronten mit Gaswolken kollidieren. Eine Gaswolke kollabiert unter ihrer eigenen Schwerkraft, wenn ihre Eigengravitation größer ist als ihr Druck.</p>

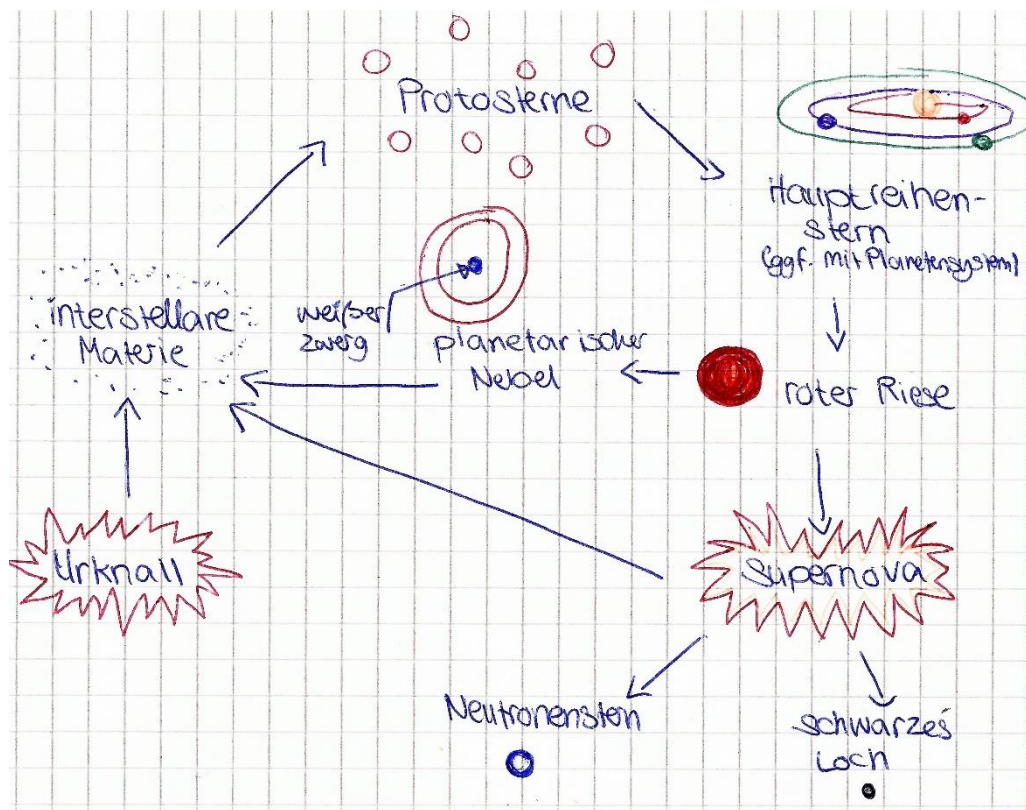
→ Vorder- und Rückseite der Karten jeweils nebeneinander abgebildet!



 <p>roter Riese</p>	<p>Ein Stern verlässt die Hauptreihe, wenn der Wasserstoff im Kern gänzlich zu Helium fusioniert wurde. Das Wasserstoffbrennen läuft aber in einer Schale um den Kern fort, was zu einer Expansion der Sternhülle führt. Der Stern bläht sich auf und wird zu einem Roten Riesen. Die Wasserstoff brennende Schale läuft nach außen, während der Heliumkern anwächst. Bei einer kritischen Masse des Kerns beginnt die Heliumfusion. Abhängig von der Gesamtmasse können immer höhere Brennstufen auftreten.</p>
 <p>planetarischer Nebel weißer Zwerg</p>	<p>Rote Riesen mit einer Masse von <math>&lt; 8M_{\odot}</math> haben nicht die Temperatur, um im Kern die Fusion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu zünden. Die Fusion von Helium und Wasserstoff in den Schalen geht weiter, während sich der Stern mehrmals ausdehnt und wieder zusammenzieht. Im Laufe der Zeit gehen große Anteile der Sternhülle verloren. Das abgestoßene Gas ist als planetarischer Nebel sichtbar, der Teil der interstellaren Materie wird. Übrig bleibt ein dichter, heißer Stern mit einer geringen Leuchtkraft, der als weißer Zwerg genannt wird.</p>
 <p>Supernova</p>	<p>Sterne mit einer Masse <math>&gt; 8M_{\odot}</math> durchlaufen alle Fusionsprozesse bis hin zur Produktion von Eisen. Der Kern kollabiert, sobald die Fusion aufhört und kein Strahlungsdruck mehr dem Gravitationspotential entgegenwirkt. Die Verdichtung führt zur Erzeugung von Neutronen aus Protonen und Elektronen. Es entsteht ein Neutronengas, das weiteres auf den Kern einströmendes Material reflektiert. Die Explosion nennt man eine Supernova. Schwerere Elemente als Eisen werden hier erzeugt.</p>
 <p>Neutronenstern schwarzes Loch</p>	<p>Ein Neutronenstern hat bei einem Radius von 10 km eine Masse von bis zu <math>3M_{\odot}</math>. Es handelt sich im Wesentlichen um ein extrem dichtes Neutronengas. Überschreitet die Masse des Supernova-Überrestes etwa <math>3M_{\odot}</math>, kann dem Gravitationspotential keine kompensierende Kraft mehr entgegen gesetzt werden. Das Objekt kollabiert noch weiter und wird zu einem schwarzen Loch. Innerhalb eines bestimmten Abstandes (dem Ereignishorizont) kann selbst Licht nicht mehr entweichen.</p>

 <p>neutrales Gas ionisiertes Gas Staub Moleküle Interstellare Materie</p>	<p>Als interstellare Materie (ISM) wird das Material bezeichnet, das sich innerhalb einer Galaxie zwischen den Sternen befindet. Es besteht aus neutralem und ionisiertem Gas (etwa 90% Wasserstoff, 10% Helium und Spuren schwererer Elemente), Molekülen und Staub. Das interstellare Medium macht sich im Wesentlichen dadurch bemerkbar, dass es Strahlung reflektiert, absorbiert und emittiert. Es ist ein essentieller Bestandteil des kosmischen Materiekreislaufs.</p>
 <p>Urknall</p>	<p>Mit dem Begriff Urknall ist der Anfangspunkt der Entstehung von Materie, Raum und Zeit gemeint. Ein solcher Anfang ergibt sich, wenn man die von Astronomen beobachtete Expansion des Universums bis zu einem Zeitpunkt zurückrechnet, an dem Materie und Strahlung sehr eng konzentriert waren. Ein Teil der gebildeten Protonen und Neutronen konnte drei Minuten lang hauptsächlich zu Helium fusionieren. Für weitere Fusionen hat die Temperatur des expandierenden Universums nicht mehr ausgereicht. Als Ergebnis blieben 75% Wasserstoff und 25% Helium.</p>

Abbildungen und Text nach Henne & Kiehlmann, 2011.



Ergebnis einer Schülerin.

## 10 Fragen zum Film

Kategorie (Anzahl):	
Frage	Thema (Anzahl)
astrophysikalische Prozesse (20):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie entsteht ein neuer Stern?</li> <li>• Entsteht dadurch [Supernova, Anm. d. Verf.] ein neuer Stern?</li> <li>• Wie entstehen Sterne?</li> <li>• Und wie werden Sterne „geboren“?</li> <li>• Wie entstehen Sterne überhaupt?</li> <li>• Können sich neue Sterne bilden und wenn ja, wie?</li> <li>• Woher kamen zuerst die Sterne?</li> </ul>	Sternentstehung (7)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Was passiert nach der Explosion mit den entstandenen Stoffen?</li> <li>• Wie lange bleiben die Stoffe, die durch die Explosion entstehen, im All?</li> <li>• Bleibt nach der Explosion das „Gebilde“ immer so oder löst es sich irgendwann auf oder verändert es sich?</li> <li>• Was sind die Folgen [nach einer Supernova]?</li> </ul>	Materiekreislauf (4)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Rolle spielt der Eisenkern bei der Explosion?</li> <li>• Warum implodiert der Stern, wenn er keinen Brennstoff mehr hat?</li> <li>• Warum passiert das [Supernova]?</li> <li>• Was passiert bei einer Supernova Explosion?</li> </ul>	Explosionsvorgang (4)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Könnten Explosionen der Sterne die Erde in irgendeiner Weise beeinflussen?</li> <li>• Kann eine Supernova zu einer Kettenreaktion führen, also [...] andere Sterne „vernichten“ [...]?</li> </ul>	Auswirkungen einer Supernova (2)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• In welchem Stadium befindet sich unsere Sonne?</li> <li>• Könnte die Sonne in einer ähnlichen Form explodieren?</li> </ul>	Zukunft der Sonne (2)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie entstand der Urknall?</li> </ul>	Entstehung des Urknalls (1)
ihre Dauer und Häufigkeit (15):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Was ist die durchschnittliche Lebenszeit eines Sterns?</li> <li>• Wie lange „lebt“ ein Stern?</li> <li>• Wie lange leben Sterne?</li> <li>• Wie lange dauert es bis ein Stern explodiert?</li> <li>• Wie lange bleibt die Sonne noch bestehen?</li> <li>• Wie lange dauert es noch, bis unsere Sonne bzw. der Kern dieser nur noch aus Eisen besteht also explodiert?</li> </ul>	Lebenszeit eines Sterns (6)

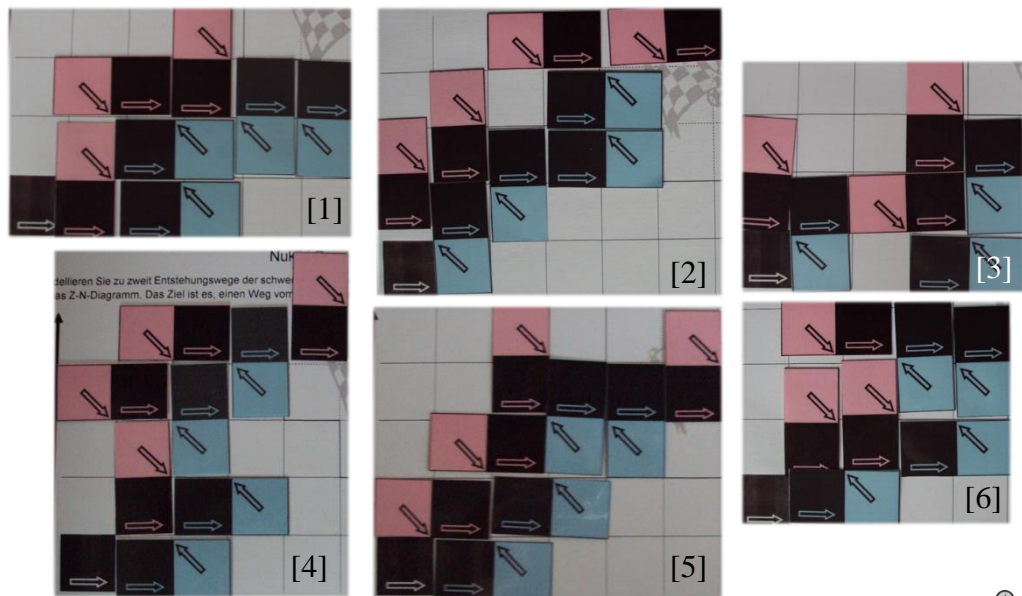
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie lange dauert das [eine Supernova]?</li> <li>• Wie lange dauert eine Supernova?</li> <li>• Wie lange dauert eine Supernova?</li> <li>• Wie lange dauert/läuft eine Supernova ab?</li> <li>• Wie lange dauert der Explosionsvorgang?</li> </ul>	Dauer einer Supernova (5)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie oft passiert das [eine Supernova]?</li> <li>• Wie viele Explosionen gab es schon?</li> <li>• Wie viele Sterne explodieren ca. pro Tag?</li> </ul>	Häufigkeit der Supernovae (3)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie lange dauert das [Entstehung eines Sterns]?</li> </ul>	Dauer der Sternentstehung (1)
Elemententstehung (11):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Durch Urknall → Wasserstoff + Helium entstanden“ → Wie und was ist mit den restlichen Elementen?</li> <li>• Wie entsteht das Eisen im Inneren eines Sterns?</li> <li>• Entsteht dabei [Brennprozess] jedes Element oder nur bis zu Fe (Eisen)?</li> <li>• Wie „erbrütet“ der Stern die Elemente. Wie entsteht bspw. aus Wasserstoff Helium?</li> <li>• Wie werden die schweren Elemente „erbrütet“?</li> </ul>	Brennprozesse (5)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie kommt es dazu, dass sich ein Element z.B. Nickel neu bildet bei einer Explosion?</li> <li>• Entstehen unterschiedliche Elemente in verschiedenen Explosionen oder reicht eine Explosion dafür schon aus?</li> <li>• Wie entsteht in der Explosion das Nickel?</li> <li>• Warum entsteht bei der Explosion das Element Nickel und wie entsteht ein anderes?</li> </ul>	Elemente nach Eisen (4)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie können Elemente wie Wasserstoff und Helium aus dem Urknall entstehen?</li> <li>• Wie kommt es, dass zuerst Wasserstoff gebildet wird?</li> </ul>	primordiale Nukleosynthese (2)
Erkenntnisgewinnung (7):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Woher weiß man, dass das passiert, wenn undurchsichtige Materiemassen dazwischen liegen?</li> <li>• Wie geht man am Max-Planck-Institut vor, um so etwas zu entdecken?</li> <li>• Wie haben die Forscher herausgefunden, wie der Vorgang abläuft?</li> <li>• Wie kann man [im Stern] die Elemente bestimmen?</li> <li>• Könnte man einen Stern in einer sehr kleinen Form nachkonstruieren?</li> </ul>	experimentelle Methoden (5)

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wurden Supernovae mit den menschlichen Augen von der Erde aus schon einmal beobachtet?</li> <li>• Warum kann man die Supernovae nicht sehen (von anderen Sternen, die wir nachts sehen)?</li> </ul>	Beobachtung von Supernovae (2)
Energie- und Kernfragen (6):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Woher kommt die Energie?</li> <li>• Was genau ist die Energiequelle eines Sterns? (Umwandlung von Wasserstoff → Helium → Kohlenstoff ... ?)</li> <li>• „Besteht Kern aus Eisen → Kein Brennstoff mehr“ → Warum?</li> <li>• Wozu braucht ein Stern Brennstoff? → Kann er nicht komplett aus z.B. Eisen bestehen?</li> <li>• Wenn der Brennstoff eines Sterns ausgeht, erlischt er dann nur [...] oder ist er komplett „gestorben“ [...]?</li> </ul>	Energiequelle (5)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Was unterscheidet leichte und schwere Elemente?</li> </ul>	Unterschiede zw. Elementen (1)
Beschaffenheit der Materie (4):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ändert sich der Aggregatzustand der verschiedenen Elemente während der unterschiedlichen Prozesse?</li> <li>• „Element Nickel → entsteht bei der Explosion“ → ist es dann flüssig, fest oder gasförmig?</li> <li>• Ist das im Kern des Sterns entstandene Eisen ein Feststoff?</li> </ul>	Aggregatzustände (3)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besteht ein Stern nur aus diesen Elementen oder hat er auch feste Bestandteile (materielle Bestandteile)?</li> </ul>	Elemente und Materie (1)
Begriffsklärung (4):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Was ist ein Krebsnebel?</li> <li>• Warum entsteht der Krebsnebel?</li> <li>• Was sind Neutrinos?</li> <li>• Was war die Neutronensternhülle?</li> </ul>	Begriffsklärung (4)
Größenverhältnisse (2):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Anziehungskraft hätte ein Neutronenstern im Gegensatz zur Erde (<math>9,8 \text{ m/s}^2</math>)?</li> <li>• Wie groß ist eine Supernova im Verhältnis zum explodierenden Stern?</li> </ul>	Größenverhältnisse (2)

## 11 Feedback

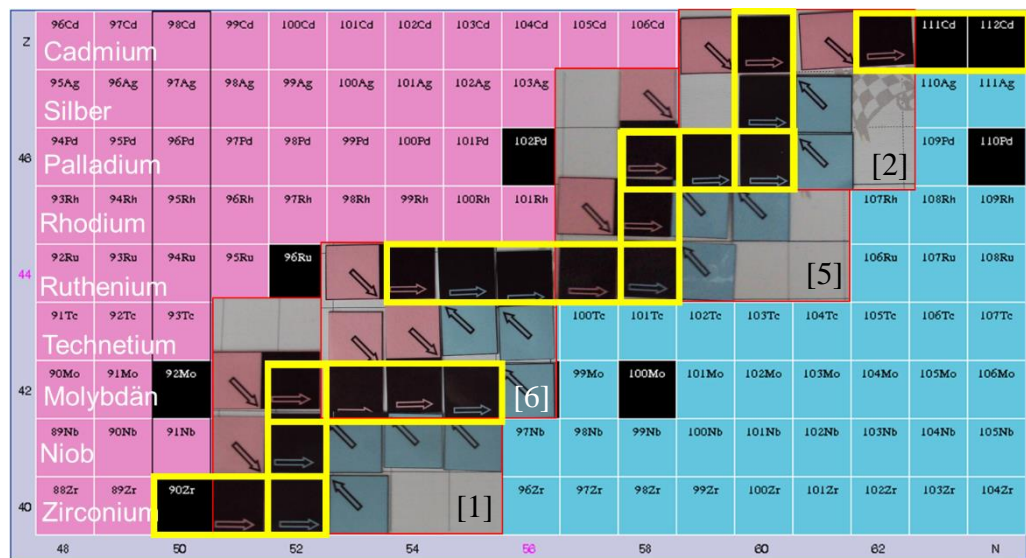
Feedback zum Nuklid-Domino	
positiv	negativ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spaßig, imposant, weiterbildend, knifflig, schön, physikalisch.</li> <li>• Optisch äußerst ansehnlich.</li> <li>• Uns hat es gefallen das Thema spielerisch zu erlernen. Man konnte es sich so besser einprägen.</li> <li>• Bildlich dargestellt → veranschaulichend.</li> <li>• Spielerische Basis.</li> <li>• Rumgegangen und erklärt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verständlichere Erklärung des Spiels.</li> <li>• Das Spiel wurde etwas zu schnell erklärt und zu ungenau, aber Prinzip war gut.</li> <li>• Zu schnell erklärt.</li> <li>• Genauere Anleitung was die Pfeilrichtung betrifft.</li> <li>• Keine Sachverhältnisse verdeutlicht.</li> <li>• Kompliziert, anspruchsvoll.</li> <li>• Unverständlich im ersten Gedanken.</li> <li>• Anfänglich war der Arbeitsauftrag nicht ganz klar.</li> <li>• Es ist relativ unverständlich und für die Unterrichtseinheit wird mehr Zeit benötigt.</li> </ul>
Anregungen zum Spiel	Feedback zur Präsentation
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Größeres Feld und mehr Steine.</li> <li>• Mit alpha-Zerfall für Fortgeschrittene.</li> <li>• Eher wie ein Puzzle.</li> <li>• Einmal beispielhaft vorspielen → besseres Verständnis.</li> <li>• Probedurchlauf.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr gelungene Präsentation.</li> <li>• Gut verständliche Folien.</li> <li>• Ordentlich gegliedert.</li> <li>• Einfach dargestellt.</li> <li>• Verständliche mündliche Begleitung.</li> <li>• Bildliche Darstellung (Vergleichsklausur).</li> </ul>

### 12 Schülerergebnisse und Aufgabe 1



1) Beschreibe die verschiedenen Strukturen. Nenne Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Anordnung der stabilen und instabilen Nuklide. (stabil: schwarz, instabil: rosa und hellblau). Wenn nötig, mit Skizze.

### 13 Nuklidkarte und Aufgabe 2



2) Nenne einen Grund für die gelbe Anordnung aus mehreren stabilen Nukliden in einer Zeile oder Spalte. Vergleiche dazu die Anzahl der Protonen- und Neutronen in diesen Reihen (Z und N).

## **Eigenständigkeitserklärung**

Name: Albert Teichrew      Matrikelnummer: 4542454

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende schriftliche Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Die Stellen, die anderen benutzten Druck- und digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, sind durch Quellenangaben im Text deutlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung eingereicht worden.

*(In die Versicherung sind gegebenenfalls auch Zeichnungen, Skizzen sowie bildliche und sonstige Darstellungen sowie Ton- und Datenträger einzuschließen.)*

---

Ort, Datum

Unterschrift