A dramatic scene featuring a large, glowing nuclear mushroom cloud on the left side of the frame. The cloud is bright yellow and orange, with a thick column of smoke rising from the base. The background is a sunset or sunrise over a body of water, with a sky filled with dark, heavy clouds. The water in the foreground is dark and choppy, reflecting the light from the cloud and the sun. The overall color palette is dominated by warm, fiery tones of orange, red, and yellow, contrasting with the dark, ominous sky and water.

**KLAUS BECKER**

**HERBSTÜBUNGEN**

**BLUT AUS ALLEN KÖRPERÖFFNUNGEN**

# Inhalt

## VORWORT

### 1. **Einiges über Atommodelle**

- 1.1 Das bohrsche Atommodell
- 1.2 Die Radioaktivität
- 1.3 Die spontane Kernspaltung des Urans 235
- 1.4 Die Fusion von Atomkernen
- 1.5 Die Wirkung ionisierender Strahlung

### 2. **Einiges über Atombomben**

- 2.1 Die Entwicklung der Bombe
- 2.2 Die Funktionsweise der Bombe
- 2.3 Die Kenngrößen der Bombe
- 2.4 Die Explosion der Bombe
- 2.5 Die Wirkung der Bombe
- 2.6 Die unterschiedlichsten Bomben

### 3. **Der erste Test und der erste Einsatz**

- 3.1 Der erste Test
- 3.2 Die ersten Einsätze
- 3.3 Die Atombombentests

### 4. **Über atomare Kriegsspiele**

- 4.1 Der Kalte Krieg
- 4.2 Die Strategien des Atomkriegs

- 4.3 Die Herbstübung 62
- 4.4 Die Herbstübung 64
- 4.5 Die Atomkrieger im Regierungsbunker
- 4.6 Die Herbstübung 66
- 4.7 Die Herbstübung 68
- 4.8 Die Winterübungen 1969-1989

## 5. **Im Räderwerk der Kriegsspiele**

- 5.1 Die ABC-Abwehrtruppe
- 5.2 Im Räderwerk der Kriegsspiele
- 5.3 Unter Trompetenzeichnern

## 6. **Kein Gebet und kein Bereuen**

## 7. **Der Zweite Kalte Krieg**

## 8. **Anhang**

- A Physikalische Gesetze
- B Maßeinheiten und Konstanten
- C Einige physikalische Angaben zur Wirkung der Bombe
- D Das Standardmodell der Elementarteilchen
- E Die vier Grundkräfte der Natur
- F Einige Elemente und ihre Eigenschaften
- G Ein Zeitdokument
- H Verträge

## **LITERATUR UND QUELLEN**

## **ABBILDUNGEN**

Die Welt schaut aus, dass man ihr keine Stunde voll ins  
Gesicht sehen kann,  
ohne verrückt zu werden.<sup>8</sup>

## **VORWORT**

Die Geschichte, von der ich erzähle, begann Ende der 1930er Jahre. Sie ist also schon ein Menschleben alt. Und sie ist noch nicht zu Ende. Lange Zeit hat sich kaum noch jemand dafür interessiert. Dies ist im Übrigen nicht verwunderlich. Denn die Menschheit hat offensichtlich aus allen ihren Geschichten nicht sehr viel gelernt, um nicht zu sagen, nichts gelernt. Sie verhält sich so, wie man es von einer geschichtsblinden Spezies erwarten würde. Man kann es natürlich auch scharfzüngiger mit Karlheinz Deschner<sup>8</sup> ausdrücken: „Die Tatsache, dass man nichts aus der Geschichte gelernt hat, heißt nicht, der Geschichtsunterricht habe sich nicht bewährt. Im Gegenteil“. Bei der Geschichte, die ich erzähle, handelt es sich um eine Geschichte aus dem Kalten Krieg, „von der uns kein Gebet und kein Bereuen je befreien kann“. Das waren die Worte des FDP-Abgeordneten Wolfram Dorn zu den teuflischen Überlegungen unserer politischen und militärischen Führer jener Zeit. Kalter Krieg, diese Bezeichnung war beinahe aus unserem Wortschatz verschwunden und in Vergessenheit geraten. Nun hört man sie wieder. Und man hört sie nicht nur. Es ist wieder Krieg, wieder in Europa und nicht weit von uns. Es ist ein schrecklicher, wenn auch noch kein atomarer, aber ein heißer, mit unerbittlicher Grausamkeit geführter Angriffskrieg gegen ein Land, das sich erbittert verteidigt.

Ich habe es nicht für möglich gehalten. Viele haben es nicht für möglich gehalten. Aber es gab Anzeichen. Unsere politischen und militärischen Führer haben sie übersehen oder wollten sie nicht sehen. Helmut Schmidt, Bundeskanzler von 1974-1982, hielt Russland für eine missionarisch geprägte, aggressiv expansive Macht (News aus Politik, Wirtschaft & Hollywood | Yahoo Nachrichten DE; Romanus Otte, 2. Mai 2022). Im ersten Kapitel „Mit den Russen leben“ seiner Memoiren, die 1987 unter dem Titel „Menschen und Mächte“ erschienen, heißt es: „Die Führer der Sowjetunion leiden an einem russischen Sicherheitskomplex, der sich erstmals schon nach der Niederlage in 1856 bemerkbar machte“ (türkisch-russischer Krieg von 1853-1856). Er fasst diese Haltung mit dem Zitat eines unbekanntes Ministers aus der Zarenzeit zusammen: „Die Grenze Russlands ist nur dann sicher, wenn auf beiden Seiten russische Soldaten stehen“. Stalin habe auch aus diesem Grund einen „Kranz vorgelagerter Satellitenstaaten“ geschaffen, die USA, darauf mit ihren Allianzen in Europa, Asien und dem Mittleren Osten reagiert. „Dies wiederum war von Moskau als bedrohliche Einkreisung empfunden worden.“

Im Wettstreit der Ideologien nach dem Zweiten Weltkrieg sei etwas anderes hinzugekommen, schreibt Schmidt: „Das Streben nach gleichwertigem global strategischem Rang und nach 'gleicher Sicherheit' wie die andere Weltmacht war nicht nur verteidigungspolitischer Natur. Es war zugleich die Kompensation für den Inferioritätskomplex der Sowjetunion angesichts ihrer Unfähigkeit, wirtschaftlich mit den westlichen Industriegesellschaften gleichzuziehen.“ In vielen Punkten wird Schmidt heute von Putin bestätigt, wenn auch nicht in allen. Auch Schmidt unterschätzte Putin: „Ich traue Putin nicht zu, dass er Krieg will.“, waren seine Worte nach der Annexion der Krim.

Aber zurück zur Gegenwart. Nach dem Krieg gegen die Ukraine, wann immer das sein wird, gibt es einen neuen Kalten Krieg, der uns in Europa noch in Atem halten wird. Ich nenne ihn den Zweiten Kalten Krieg. Er wird Jahre dauern. Das ist jedenfalls meine Prognose. Wenn es nicht noch schlimmer kommt. Politiker malen wieder den Atomkrieg an die Wand und die Gazetten zählen wieder Panzer und Raketen. Unsere politischen und militärischen Eliten hätten seinerzeit in Kauf genommen, dass unser Vaterland dem Erdboden gleichgemacht worden wäre. Mit Millionen ziviler Opfer. Dass es nicht so gekommen ist, war möglicherweise eher dem Glück als ihrer Staats- und Führungskunst zuzuschreiben. Obgleich die Militärstrategen und Realpolitiker behaupten, dass gerade ihre Strategie es war, die uns davor bewahrt hat. Und sie haben wahrscheinlich sogar recht.

Wie auch immer und aus welchem Grund auch immer, die teuflischen Überlegungen waren Gedankenspiele einer Spezies, die sich als die Krönung der Schöpfung und von Gott persönlich nach seinem Ebenbild erschaffen und von ihm betreut, behütet und geliebt wähnt. Und es haben sich erwachsene Menschen, mehrheitlich gut ausgebildete Menschen, ganze Armeen von Wissenschaftlern und Soldaten und Parlamente damit befasst und befassen sich immer noch damit. Die durch diese teuflischen Spielchen gebundenen Kräfte und Mittel hätten ausgereicht und würden ausreichen, die geschundenen Kinder dieser Welt vor Hunger und Elend und unnötigem Leid auf Dauer zu bewahren. Es ist die Vorstellung von einer besseren Welt, die in diesen Sätzen zum Ausdruck kommt. Nach allem, was wir sehen und erleben, wird die Idee von einer besseren Welt eine Wunschvorstellung bleiben müssen. In diesen Tagen wurden von dem schwedischen Friedensforschungsinstitut SIPRI (Stockholm International Peace Research Institute) die neuesten Zahlen über die



weltweiten Militärausgaben veröffentlicht: 2021 haben danach die Staaten dieser Welt 2.113 Milliarden Dollar in Militär investiert, die vorläufige Spitze einer Zunahme im siebten Jahr hintereinander. Spitzenreiter in diesem unsäglichen Ausgabenreigen sind die USA mit 38 % und China mit 14 % der weltweiten Investitionen. Diese erschreckenden Zahlen lassen nichts Gutes erwarten.

Aber kehren wir zurück zum Ersten Kalten Krieg. Ich selbst war ein - wenn auch ein extrem winziges - Rad in diesem Räderwerk des Grauens, wenn es auch papiernen gebliebenen ist, jedenfalls bis heute. Die Geschichte dieses extrem kleinen Rades erzähle ich letztlich. Es ist eine Geschichte, die ich als Mahnung verstehen möchte, obgleich ich nicht der Meinung bin, dass sie viel ausrichten kann. Aber wenn sie nur in einem Kopf zu der Einsicht beitrüge, dass Hass und Gewalt und Krieg und auch Religion keine Mittel sind, um aus dieser Welt eine bessere zu machen, dann war sie es wert gewesen, erzählt zu werden.

Um diese Geschichte zu erzählen, sodass sie auch verstanden wird, muss ich allerdings ziemlich weit ausholen. Ich beginne mit einem eher nüchternen Kapitel über den Aufbau der Atome und Atomkerne, über das Phänomen der Radioaktivität, über die Kernspaltung, die dabei freiwerdenden ungeheuren Energien und über die Wirkung der emittierten Teilchen. Im zweiten Kapitel beschäftigen ich mich mit dem, wozu diese ungeheuren Energiemengen den Menschen verleitet haben: Mit der Entwicklung der Atombombe, ihrer Technik und ihrer Wirkung. Ich weiß, dass man richtigerweise Kernwaffe sagen müsste. Aber ich denke, dass „Atombombe“ das Grauen, das von diesen Waffen ausgegangen ist und ausgeht, jedenfalls in unserer Sprache, besser ausdrückt. Das dritte Kapitel handelt von dem ersten Einsatz der Bombe auf die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki im August 1945 und von dem, was

sie angerichtet hat. Und als ob dieses Verbrechen nicht stattgefunden hätte, hantierten unsere politischen und militärischen Führer in den Folgejahren unverdrossen weiter mit dieser Bombe und spielten unvorstellbar teuflische Spiele. Davon handelt das vierte Kapitel. Über meine persönliche Mittäterschaft erzähle ich im [Kapitel 5](#). Im [Kapitel 6](#) ziehe ich ein paar wenige Schlüsse aus dieser unheilvollen Geschichte und gebe im 7. einen zugegebenermaßen bescheidenen Ausblick auf das, was noch kommen wird.

Das Meiste, von dem und über das ich schreibe, steht in den Geschichts- und Chemie- und Physikbüchern und ist allgemeines Wissen. Am Ende eines jeden Kapitels nenne ich die Quellen, die ich für das Zusammentragen der Informationen genutzt habe. Spezifische Aussagen belege ich mit den Literaturhinweisen und Quellen im Text.

Und noch etwas. Einige der Abbildungen sind nicht hinreichend hoch aufgelöst. Ich denke aber, sie erfüllen ihren Zweck.

Oberwesel, den 8. Mai 2022



Lernt man in unseren Schulen nicht auch deshalb so viel,  
was man nicht gebrauchen kann,  
um so vieles nicht zu lernen, was man brauchen könnte? <sup>8</sup>

## **1 Einiges über Atommodelle**

Zum Verständnis einiger der folgenden Ausführungen benötigen wir ein paar wenige grundlegende Kenntnisse über den Aufbau und insbesondere über die Radioaktivität von Atomkernen. Dazu genügt bereits die Kenntnis des von Niels Bohr schon im Jahre 1913 vorgestellten Atommodells. Damit können die Phänomene, um die es uns hier geht, auf anschauliche Weise erklärt werden.

### **1.1 Das bohrsche Atommodell**

Atome bestehen aus dem Atomkern einerseits und der Atomhülle andererseits. Die Hülle wird aus negativ geladenen Elektronen, der Kern aus positiv geladenen Protonen und gegebenenfalls aus elektrisch neutralen Neutronen gebildet. Eigentlich sollte man erwarten, dass die negativen Elektronen in die positiv geladenen Kerne stürzen. Das einfachste Bild ist deshalb ein Schalenmodell, in dem die Elektronen auf unterschiedlichen Schalen oder auch Bahnen um den Kern kreisen, vergleichbar mit den Planetenbahnen um die Sonne. Die Schale, auf der sich ein Elektron befindet, bestimmt seine Bindungsenergie an den Atomkern. Diese Energiewerte können nur ganz bestimmte diskrete Werte annehmen. Auf jeder Schale, die von innen nach außen mit Großbuchstaben, beginnend mit K,

bezeichnet werden, kann sich maximal eine bestimmte Anzahl Elektronen aufhalten. Diese maximale Anzahl heißt Besetzungszahl. In der [Tabelle 1.1](#) sind die Besetzungszahlen der Schalen K bis P zusammengestellt. Es gilt

$$1.1 \quad n = 2 \cdot s^2.$$

Dabei ist  $n$  die Besetzungszahl und  $s$ , von innen nach außen gezählt, die Nummer der Schale. In der [Abbildung 1.1](#) ist beispielhaft das Schalenmodell des Schwefelatoms mit 16 Elektronen dargestellt.

<b>Nummer</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Besetzungszahl</b>
1	K	02
2	L	08
3	M	18
4	N	32
5	O	50
6	P	72

Tabelle 1.1: Besetzungszahlen der Elektronenschalen

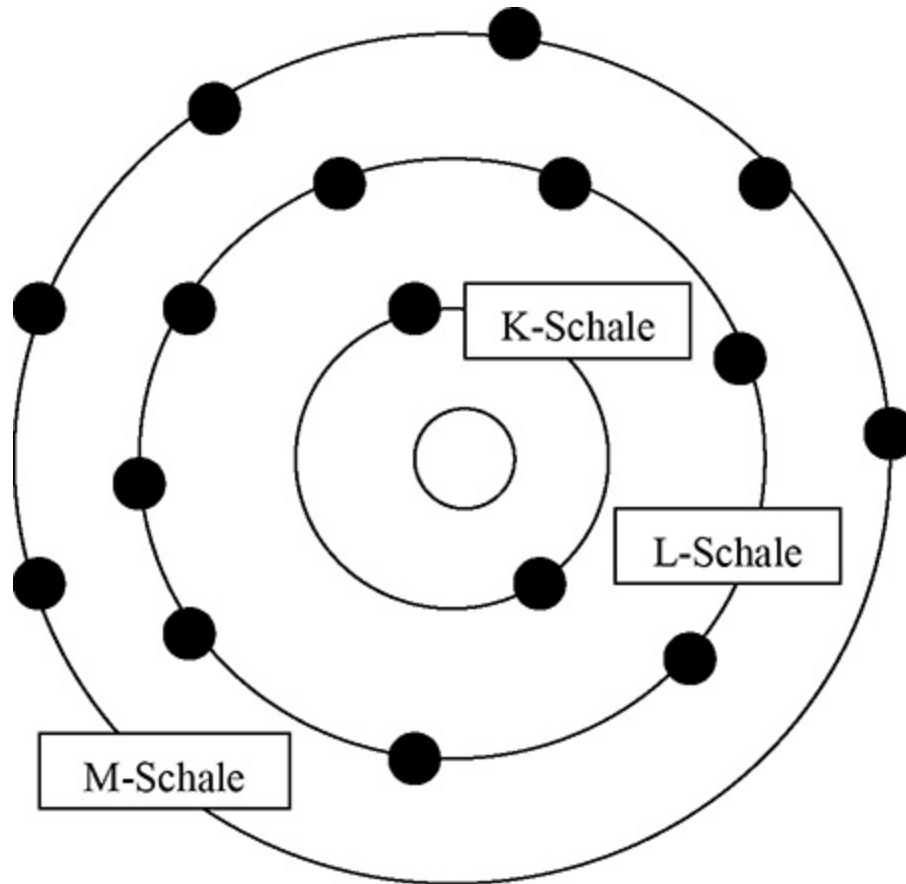


Abbildung 1.1: Das Schwefelatom mit der Schalenkonfiguration K2, L8, M6

Das beschriebene Schalenmodell kann nicht alle beobachteten Phänomene erklären, sodass schnell relativ komplizierte Erweiterungen notwendig werden. Im vorliegenden Kontext kommen wir aber mit dem beschriebenen Modell aus.

Die Elektronenhülle bestimmt maßgeblich die chemischen Eigenschaften der Elemente. Chemische Verbindungen kommen nämlich durch Wechselwirkungen der Elektronenhülle zustande.

Eine Elektronenhülle kann sich in einem energetisch angeregten oder im sogenannten Grundzustand befinden. Ein angeregter Zustand wird durch Energiezufuhr erreicht. Elektronen werden dadurch auf energetisch höher

angesiedelte Schalen „gehoben“. Eine sich selbst überlassene Elektronenhülle strebt stets ihrem niedrigsten Energieniveau zu, was dem Grundzustand entspricht. Eine Anregung wird beispielsweise erreicht durch die Absorption eines Photons, eines Lichtteilchen also. Diese Anregung wird auch als Photonenanregung bezeichnet. Eine andere Möglichkeit ist die thermische Anregung durch Erwärmung des Materials. Durch die Wärmebewegung kommt es zu Zusammenstößen zwischen den Elektronen mit anderen Teilchen (Stoßanregung). Wir sehen uns die Vorgänge anhand eines einfachen Beispiels an und wählen dazu das Wasserstoffatom mit einem Proton im Kern und einem Elektron in der Hülle. Das Elektron des Wasserstoffatoms kreist normalerweise, also im nicht angeregten Zustand, auf der Schale, die dem Atomkern am nächsten liegt. Nimmt das Atom Photonen auf, so kann das Elektron in eine dem Atomkern entferntere Bahn "springen", die einen gegenüber dem Grundzustand höheren Energiegehalt aufweist. Das Atom ist nun angeregt. Im Allgemeinen "springt" das Elektron nach sehr kurzer Zeit (Milli- bis Nanosekundenbereich) in eine energieärmere Bahn zurück (Abregung). Dabei wird ein Photon emittiert.

Der Atomkern hält beinahe die gesamte Masse eines Atoms. Das wird schnell klar, wenn man berücksichtigt, dass Protonen und Neutronen in etwa über die gleiche Masse verfügen, ein Elektron aber nur über den 1.836sten Teil eines Protons bzw. Neutrons. Die negative elektrische Ladung der Elektronen gleicht die positive Ladung des Atomkerns aus, sodass sich ein Atom im "normalen" Zustand nach außen hin elektrisch neutral verhält. Da die Ladung des Elektrons bis auf das Vorzeichen mit der des Protons übereinstimmt, enthält ein Atom im elektrisch neutralen Zustand genau so viele Protonen wie Elektronen. Atome, bei denen Elektronen aus der Hülle entfernt wurden, heißen ionisiert bzw. Ionen. Die chemischen Elemente

werden durch die Anzahl der Protonen im Atomkern definiert. Beispielsweise verfügt das Wasserstoffatom, das leichteste Atom überhaupt, über ein Proton, das Goldatom über 79 Protonen. Die Anzahl der Protonen eines Elements heißt Ordnungszahl des Elements, die Anzahl von Protonen und Neutronen zusammen Massenzahl. Es gibt Elemente, deren Kerne bei gleicher Protonenzahl über unterschiedlich viele Neutronen verfügen. Diese heißen dann Isotope des Grundelements. Wasserstoff beispielsweise mit einem Kern, der aus einem Proton und einem Neutron besteht, heißt Deuterium oder auch schwerer Wasserstoff. Wasserstoffkerne mit zwei Neutronen im Kern bilden Tritium, auch als überschwerer Wasserstoff bezeichnet. Isotope verfügen bis auf geringe Unterschiede über die gleichen chemischen Eigenschaften. Physikalisch unterscheiden sie sich hingegen gegebenenfalls dramatisch (siehe unter 1.2 Radioaktivität).

Die im Atomkern vorhandenen positiv geladenen Protonen stoßen sich gegenseitig ab. Diese als Coulomb-Kraft (siehe [Anhang A](#)) bezeichnete Kraft sollte die Atomkerne eigentlich auseinanderfliegen lassen. Wenn da nicht noch eine weitere Kraft wäre, die die Atomkerne zusammenhält. Diese, als starke Kernkraft bezeichnete Kraft, ist eine der vier Grundkräfte der Natur. Sie begegnet uns allerdings nur im Inneren der Atome. Und sie ist die stärkste der vier Grundkräfte, zu denen in abnehmender Stärke nach der starken Kernkraft die elektromagnetische Kraft, die schwache Kernkraft und die Gravitation zählen (siehe auch [Anhang E](#)). Zu der starken Kernkraft tragen auch die im Kern gebundenen Neutronen bei. Die Kernkraft verfügt nur über eine extrem kleine Reichweite von etwa  $10^{-15}$  m. Das ist in etwa die Größenordnung des Nukleon-Durchmessers. Daraus resultiert, dass es keine beliebig großen Kerne geben kann, denn ein Proton an der „Oberfläche“ eines großen Kerns spürt Anziehung nur von seinen nächsten

Nachbar-Nukleonen, die Coulomb-Abstoßung hingegen von allen anderen Protonen des Kerns. Damit die Kerne stabil bleiben und nicht auseinanderfliegen, sind bei Elementen mit hoher Ordnungszahl zunehmend mehr Neutronen notwendig, um die Coulomb-Kraft, die die Protonen auseinander treibt, zu überwinden. Mit der Protonenzahl 82 ist Blei das letzte Element, das über stabile Isotope verfügt. Isotope höherer Ordnungszahl sind allesamt instabil. Instabile Atome emittieren Kernstrahlung. Man sagt auch, sie sind radioaktiv. Mit der Radioaktivität werden wir uns im folgenden Abschnitt etwas genauer beschäftigen. Das schwerste in der Natur, wenn auch nur in Spuren, vorkommende Element, ist Plutonium mit der Kernladungszahl 94. Uran mit der Ordnungszahl 92, das im vorliegenden Zusammenhang eine besondere Rolle spielt, kommt hingegen in nennenswerten Mengen vor. Natürliches, in Mineralen gebundenes Uran besteht zu etwa 99,3 % aus dem Isotop U-238 und zu 0,7 % aus dem Isotop U-235. Elemente mit mehr Protonen als 92 werden als Transurane bezeichnet. Transurane kommen in der Natur nicht vor. Ausnahmen sind das bereits genannte Plutonium und das Neptunium mit der Ordnungszahl 93. Beide kommen nur in Spuren vor und stammen aus der Entstehungszeit unseres Sonnensystems. Transurane lassen sich künstlich aus Uran oder anderen Elementen mit hoher Ordnungszahl herstellen. Dazu werden die Atomkerne mit Neutronen oder anderen Atomkernen beschossen. Die dabei ablaufenden Kernverschmelzungen generieren dann Transurane.

Hinweis:

Auch Kerne können in Analogie zur Elektronenhülle energetisch angeregt sein oder sich im Grundzustand befinden. Anschaulich kann man sich vorstellen, dass Anordnung und Bewegungsweise der Nukleonen nur in ganz bestimmter Form stabil sind. Es würde an dieser Stelle zu

weit führen, die entsprechenden Modelle erläutern zu wollen. Wir geben uns deshalb mit der Feststellung zufrieden.

## **1.2 Die Radioaktivität**

Mit Radioaktivität bezeichnet man die Eigenschaft instabiler Atomkernen, sich spontan in andere Kerne umzuwandeln und dabei Strahlung zu emittieren. Dieser Umwandlungsprozess wird auch als radioaktiver Zerfall bezeichnet und die emittierte Strahlung als Kernstrahlung. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Zerfallsprozesse, die im Einzelnen sehr komplex sein können. Die Art der emittierten Strahlung, ihre Energie und die spezifische Aktivität sind abhängig von dem jeweiligen Radionuklid - so bezeichnet man die instabilen Atomkerne. Jede dieser Strahlungsarten ist für den Menschen gesundheitsschädlich, in Abhängigkeit von der aufgenommenen Menge sogar tödlich. Im Abschnitt 1.5 werden wir uns mit den Wirkungen der Strahlung auf den menschlichen Organismus befassen.

Grundsätzlich gibt es vier Ursachen für die Instabilität eines Atomkerns:

- Der Atomkern hat zu viele Neutronen (Neutronenüberschuss)
- Der Atomkern hat zu wenig Neutronen (Neutronenmangel)
- Der Atomkern hat überschüssige Energie
- Der Atomkern ist zu groß

Jeder dieser Gründe führt zu einer bestimmten Art der Kernstrahlung, in einigen Fällen auch zu mehreren. Wir gehen die Gründe und die daraus resultierenden Strahlungsarten der Reihe nach durch.



## **Neutronenüberschuss:**

Bei sehr großem Neutronenüberschuss werden Neutronen mit hoher Geschwindigkeit aus dem Atomkern emittiert. Dieser Vorgang führt zur sogenannten Neutronenstrahlung.

Bei geringem Überschuss wird im Kern ein Neutron in ein Proton umgewandelt und ein hochenergetisches Elektron sowie ein Elektron-Antineutrino emittiert (siehe [Anhang D](#)). Die Ordnungszahl des Ausgangskerns wird um eins erhöht, die Massenzahl bleibt erhalten. Dieser Zerfallsprozess wird als  $\beta$  -**Zerfall** bezeichnet, die emittierte Strahlung als  $\beta$  -Strahlung.

## **Neutronenmangel:**

Auch der Mangel an Neutronen kann den Kern instabil werden lassen. Im vorliegenden Kontext spielen derartige Zerfallsprozesse, die im Übrigen dem  $\beta$  -Zerfall ähneln, keine Rolle, sodass wir nicht weiter darauf eingehen.

## **Atomkerne mit überschüssiger Energie:**

Energetisch angeregte Atomkerne streben danach, den Grundzustand zu erreichen. Dabei emittieren sie Gammastrahlung, abgekürzt  $\gamma$  -Strahlen.

Genaugenommen handelt es sich dabei nicht um einen Zerfallsprozess, da weder die Ordnungszahl noch die Massenzahl verändert werden.  $\gamma$  -Strahlen bestehen aus  $\gamma$  -Quanten, also Teilchen der elektromagnetischen Strahlung mit einer Energie von über 200 keV (siehe [Anhang B](#)). Ein  $\gamma$  -Zerfall resultiert häufig aus einem vorausgegangenem  $\alpha$  -Zerfall (siehe weiter unten) oder einem  $\beta$  -Zerfall.

## **Zu große Atomkerne:**

Zu große Atomkerne zerfallen spontan entweder in zwei, seltener auch in drei oder mehr Bruchstücke. Gleichzeitig werden zwei oder drei Neutronen emittiert. Dieser Prozess wird **spontane Kernspaltung** genannt.

In anderen Fällen gibt der Kern einen kleineren Teil seiner überschüssigen Masse in Form eines  $\alpha$  -Teilchens ab. Dabei handelt es sich um einen Helium-4-Kern mit zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Ordnungszahl des Tochterkerns, wie man den entstehenden Kern nennt, wird gegenüber dem Ausgangskern also um zwei und seine Massenzahl um vier reduziert. Dieser Zerfallsprozess heißt  $\alpha$  -**Zerfall**, die emittierte Strahlung  $\alpha$  -Strahlung.

$\alpha$  -,  $\beta$  - und  $\gamma$  -Strahlen sind ionisierend. Ionisierende Strahlen sind also aus Teilchen bestehende oder elektromagnetische Strahlen, die in der Lage sind, Elektronen aus Atomen oder Molekülen „herauszuschlagen“, sodass positiv geladene Atomkerne (Ionen) oder Molekülreste zurückbleiben. Wir werden im Abschnitt 1.5 die Wirkung ionisierender Strahlung auf Materie und lebende Zellen besprechen. Zunächst beschäftigen wir uns in aller Kürze mit der spontanen Kernspaltung und dem umgekehrten Prozess, der Fusion von Atomkernen. Diese Prozesse spielen im vorliegenden Zusammenhang eine zentrale Rolle.

### **1.3 Die spontane Kernspaltung des Urans 235**

In erster Linie interessiert uns die spontane Kernspaltung des Urans 235. Wir besprechen beispielhaft nur eine der vielen möglichen Zerfallsreihen. Uran hat, wie wir bereits wissen, die Kernladungszahl 92. Der Kern des Isotops Uran-235 besitzt also 143 Neutronen. Die Spaltung des Kerns setzt ein, sobald man dem Kern, mit welcher Methode auch

immer, zum Beispiel durch Beschuss, ein Neutron hinzufügt. Der Kern zerfällt bei der beispielhaft angenommenen Zerfallsreihe in die Spaltprodukte Ba-139 (Barium) und Kr-94 (Krypton). Außerdem werden 3 Neutronen freigesetzt. Dieser Vorgang lässt sich formal wie folgt beschreiben:



Wir sehen uns an, was eigentlich passiert bei dieser Umwandlung und benutzen [Tabelle 1.2](#), in der die Atommassen in u (Unified Atomic Mass Unit, siehe [Anhang B](#)) der an der Umwandlung gemäß 1.2 beteiligten Elemente bzw. Teilchen festgehalten sind.

<b>Element/Teilchen</b>	<b>Masse in u</b>
Neutron	001,008664
U-235	235,043922
Ba-139	138,908835
Kr-94	093,934362

Tabelle 1.2: Massen der am Spaltprozess des U-235 beteiligten Elemente

Addiert man die Massen der Isotope und Neutronen auf der rechten Seite von 1.2, so erhält man eine weniger große Masse als die des Ausgangsmaterials, bestehend aus dem Uran-Isotop U-235 einschließlich des hinzugefügten Neutrons. Dieser Massendefekt, der in Form von Energie frei wird, liegt in der Größenordnung von

$$1.3 \quad \Delta m = 0,183u.$$

Wir verschaffen uns mit Einsteins berühmter Formel (siehe [Anhang A](#))

$$1.4 E = m \cdot c^2$$

eine Vorstellung von der Energiemenge, die dabei frei wird. Gemäß [Anhang B](#) ist

$$1.5 1u = 1,660538921 \cdot 10^{-27} \text{ kg .}$$

Damit wird bei der Spaltung des U-235-Kerns eine Energie in der Größenordnung von

$$1.6 \quad \Delta E \approx 0,183 \cdot 1,660538921 \cdot 10^{-27} \cdot c^2 \approx 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

freigesetzt. Um Vergleichbarkeit mit chemischen Prozessen, zum Beispiel mit der Verbrennung von Kohlenstoff herzustellen, ist es notwendig, sich auf vergleichbare Massen zu beziehen. Da bei chemischen Reaktionen in der Regel die Einheit Mol (siehe [Anhang B](#)) verwendet wird, gehen wir auch hier von einem Mol des Uran-Isotops aus. Ein Mol Uran 235 verfügt über ca. (siehe [Anhang B](#))

$$1.7 1 \text{ mol} = 6,02214129 \cdot 10^{23}$$

Atomkerne. Die Spaltung einer Masse von einem Mol Uran 235 führt damit zu einer Energiefreisetzung von

$$1.8 \quad \Delta E \approx 2,7 \cdot 6,02214129 \cdot 10^{12} \approx 1,6 \cdot 10^{13} \text{ J.}$$

Wir berechnen, wie viel Gramm einem Mol U-235 entsprechen. Es gilt

$$1.9 1 \text{ mol U-235} = 235 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 1,661 \cdot 10^{-27} \approx 235 \text{ g.}$$

Die Spaltung von 235 g U-235 führt also zur Freisetzung einer Energiemenge in Höhe von etwa  $1,6 \cdot 10^{13}$  J. Wir vergleichen dieses Ergebnis mit der Energie, die bei der Verbrennung von 235 g Kohlenstoff frei wird. Es gilt



Die Verbrennung von einem Mol Kohlenstoff erzeugt demnach eine Wärmeenergie von  $3,93 \cdot 10^5 \text{ J}$ . Das Atomgewicht von Kohlenstoff beträgt **12** u. Damit hat ein Mol Kohlenstoff eine Masse von 12 g. Das ist nicht verwunderlich, denn so ist die Einheit Mol gerade definiert (siehe [Anhang B](#)):



Aus 1.10 folgt, dass bei der Verbrennung von 235 g Kohlenstoff eine Wärmeenergie von ca.  $0,77 \cdot 10^6 \text{ J}$  erzeugt wird. Das Verhältnis der erzeugten Energien bei der gleichen Menge in g des Ausgangsstoffes liegt damit bei zwei Millionen zugunsten der Kernspaltung. Letztlich kommt diese enorme Energiedifferenz dadurch zustande, dass unterschiedlich starke Naturkräfte im Spiel sind. Im Fall der Kernspaltung die stärkste der Grundkräfte, die starke Kernkraft und im Falle der Verbrennung von Kohlenstoff die elektromagnetische Kraft.

## **1.4 Die Fusion von Atomkernen**

Wir machen einen kurzen Ausflug in die Welt der Kernfusionen. Die Kernfusion ist quasi der zur Kernspaltung umgekehrte Prozess. Kernfusionen sind die Prozesse, die in den Sternen die schweren Elemente ausbrüten. Um eine Kernfusion in Gang zu setzen, sind wie in den stellaren Brütern extrem hohe Temperaturen und Drücke notwendig. Wie bei der Kernspaltung wird auch bei der Fusion die Masse geringer und Energie freigesetzt. Uns interessiert an dieser Stelle die Fusion von Lithium-6 mit Deuterium. Dieses Gemisch wird nämlich in der sogenannten Wasserstoffbombe als Fusionsmaterial verwendet. Wir

kommen noch darauf. Erst einmal aber zur Fusionsformel. Es gilt:



Wir machen uns die Höhe der Energiefreisetzung klar in Analogie zur Vorgehensweise beim Spaltungsprozess. Dazu benötigen wir zunächst die Atomgewichte der beteiligten Atome. Siehe dazu [Tabelle 1.3](#). Danach ergibt sich bei der Fusion eines Lithium-6-Kerns mit einem Deuteriumkern zu 2 Helium-4-Kernen ein Masseverlust von

$$1.13 \quad \Delta m = 0,024 \text{ u} .$$

Wir rechnen 1.13 um in Kilogramm und nach der einsteinschen Formel in Joule. Im Ergebnis ergibt sich eine Energiefreisetzung von

$$1.14 \quad \Delta E \approx 0,024 \cdot 1,660538921 \cdot 10^{-27} \cdot c^2 \approx 3,6 \cdot 10^{-12} \text{ J} .$$

<b>Element/Teilchen</b>	<b>Masse in u</b>
Lithium-6	6,015123
Deuterium	2,014101
Helium-4	4,002602

Tabelle 1.3: Fusion von Lithium-6 und Deuterium

Die Fusion von einem Mol des Ausgangsmaterials führt damit zu einer Energiefreisetzung von ca.

$$1.15 \quad \Delta E = 2,2 \cdot 10^{12} \text{ J} .$$

Wir vergleichen die Energiefreisetzung mit der des Spaltprozesses für 235 Gramm der Ausgangsmasse.

Ein Mol des Lithium-Deuterium-Gemischs hat ein Gewicht von

1.16 1 mol LiD  $\approx$  8,029 g.

Damit ergibt sich bei der Fusion einer Menge von 235 g des Materials eine Energiefreisetzung von

$$1.17 \quad \Delta E = 6,4 \cdot 10^{13} \text{ J.}$$

Aus einer Menge von 235 g des Ausgangsmaterials wird also durch eine Fusion das Vierfache der Energiemenge produziert wie bei der Kernspaltung. Das ist ein sehr theoretisches Ergebnis. Die Bombenbauer sprechen in diesem Zusammenhang „nur“ von dem Dreifachen. Die Höhe des Faktors spielt im vorliegenden Kontext keine Rolle. Wesentlich ist nur, dass H-Bomben mit einer deutlich höheren Sprengkraft ausgestattet werden können, als Spaltungsbomben. Die Bombenbauer haben es zu schätzen gewusst. Wir kommen noch darauf.



## **1.5 Die Wirkung ionisierender Strahlung**

### **1.5.1 Wechselwirkung mit Materie**

Wir besprechen die Wirkung ionisierender Strahlung mit Materie. Wir wissen bereits: unter dem namensgebenden Mechanismus Ionisierung oder auch Ionisation verstehen wir die Freisetzung von Elektronen aus Atomhüllen. Ionisierende Strahlung bricht chemische Verbindungen auf. Es entstehen Ionen, Molekülbruchstücke und sogenannte chemische Radikale, die hoch reaktiv und bestrebt sind, die durch die Freisetzung fehlenden Elektronen aus ihrer Umgebung „einzufangen“. Gelingt dabei die Wiederherstellung des ursprünglichen Atoms bzw. Moleküls, spricht man von Rekombination. In anderen Fällen entstehen durch die Abspaltung von Elektronen weitere fragmentierte Atome und Moleküle. Diese reagieren wiederum mit anderen Molekülen, die dadurch zum Beispiel ihre biologische Funktion verlieren können.

Die Ionisation erfolgt auf unterschiedlichen Wegen, abhängig vom Typ des Strahlers:

#### **Ionisation durch $\alpha$ - und $\beta$ -Strahlung:**

$\alpha$  - und  $\beta$  -Teilchen wirken direkt ionisierend, das heißt, sie sind in der Lage, durch Stoßprozesse Elektronen direkt aus der Atomhülle zu entfernen.

#### **Ionisation durch $\gamma$ -Strahlung:**

Auch Gammaquanten sind mit einer Energie von mehr als 200 keV in der Lage, Atome direkt zu ionisieren. Diese

Energie reicht nämlich aus, um Elektronen direkt aus Atomhüllen herauszulösen. Auch Röntgenstrahlen und kurzwellige ultraviolette Strahlen verfügen über genügend Energie, um Atombindungen aufzubrechen.

### **Ionisation durch Neutronen:**

Freie Neutronen haben keine Wechselwirkung mit Elektronen. Insofern sind Neutronen auch nicht in der Lage, Elektronen aus Atomhüllen zu lösen. Eine Ionisation erfolgt deshalb nur indirekt, und zwar über Kernreaktionen, die zu instabilen radioaktiven Atomkernen führen, die wiederum ionisierende Teilchen emittieren. Die so erzeugte neutroneninduzierte Strahlung besteht in der Regel aus Gammastrahlung, auch Neutroneninduzierte Gammaaktivität, abgekürzt NIGA, und  $\beta$ -Strahlung.

## **1.5.2 Reichweiten und Abschirmung ionisierender Strahlung**

Prinzipiell kann Materie vor ionisierende Strahlung schützen. Die Teilchen verlieren durch den Zusammenstoß mit Materie Energie. Darauf beruht die Abschirmwirkung gegen die verschiedenen Strahlungsarten. Wir gehen die einzelnen Teilchenarten durch:

$\alpha$ -Teilchen verfügen über eine geringe Reichweite und Durchdringungstiefe. Sie lassen sich mit einem Blatt Papier abschirmen und sind beispielsweise nicht in der Lage, gesunde menschliche Haut zu durchdringen. Bei einer Inkorporation kommt es allerdings zu massiven Schäden. Siehe dazu weiter unten.

Die Reichweite der  $\beta$ -Teilchen ist größer als die der  $\alpha$ -Teilchen und beträgt einige Meter.  $\beta$ -Teilchen können aber