

# Grundlagen der Kernphysik

## (Erläuterungen)

Die Kernphysik ist wesentlicher Bestandteil der Atomphysik und untersucht den Aufbau der Atomkerne, die Eigenschaften der Atomkerne und deren Elementarteilchen, sowie die Veränderungen von Atomkernen (z.B. Radioaktivität).

	Seite
Atomkern, Aufbau	2
Atomkern, Veränderung	3
Atomreaktor, Kernreaktor	9
Halbwertszeit	5
Isotope	2
Kernspaltung	7
Kernumwandlung	6
Kettenreaktion	8, 9
Radioaktive Isotope	4
Radioaktive Isotope, Herstellung	6
Radioaktive Strahlung	3
Zerfallsreihen	10

## **1. Eigenschaften der Atomkerne**

Atomkerne besitzen eine Kernladung, eine Kernmasse und Kernenergie. Es existieren stabile und instabile Atomkerne.

Die Kernladung wird bestimmt durch die Kernladungszahl welche mit der Anzahl der Protonen gleichbedeutend ist.

Die Kernmasse wird bestimmt durch die Massenzahl. Die Massenzahl ist gleichbedeutend mit der Anzahl der Nukleonen im Atomkern. Zu den Nukleonen werden die Protonen und die Neutronen gezählt.

### **1.1. Stabile Atomkerne**

Stabile Atomkerne zeichnen sich durch eine hohe Beständigkeit hinsichtlich der Protonen- und Neutronenzahl und ihrer Kernenergie gegenüber äußeren Einwirkungen aus.

### **1.2. Instabile Atomkerne (Radionuklide)**

Instabile Atomkerne sind Atomkerne, die ohne mechanische, thermische oder andere äußere Beeinflussung durch Energieabgabe in Form von radioaktiver Strahlung zerfallen, bis ein stabiler Atomkern entstanden ist.

## **2. Kernaufbau**

Atomkerne bestehen im wesentlichen aus Protonen und Neutronen. Diese beiden Kernteilchen werden unter dem Begriff Nukleonen zusammengefasst.

### **2.1. Protonen**

Protonen sind elektrisch positiv geladene Masseteilchen des Atomkerns. Die Anzahl der Protonen im Atomkern bestimmt die Kernladung sowie die Kernladungszahl. Die Kernladungszahl ist mit der Ordnungszahl eines chemischen Elementes gleichlautend.

### **2.2. Neutronen**

Neutronen sind elektrisch neutrale Masseteilchen im Atomkern. Die Anzahl der Neutronen kann für Atomkerne des gleichen chemischen Elements unterschiedlich sein.

Die Anzahl der Neutronen nimmt im Verhältnis zur steigenden Protonenzahl im Atomkern schneller zu, weil die elektrischen Abstoßungskräfte ebenfalls immer stärker zunehmen.

## **3. Isotope**

Atome des gleichen chemischen Elements mit der gleichen Anzahl an Protonen (gleiche Kernladungszahl) können eine unterschiedliche Anzahl Neutronen besitzen. Diese werden jeweils als Isotope bezeichnet. Da nur die Anzahl der Neutronen unterschiedlich ist, während der Aufbau der Atomhülle bei Isotopen gleich bleibt, haben Isotope eines chemischen Elements gleiche chemische Eigenschaften.

## 4. Veränderungen von Atomkernen

Veränderungen von Atomkernen können durch Spontanzerfall instabiler Kerne oder durch auftreffende, beschleunigte Elementarteilchen zustande kommen.

### 4.1. Spontanzerfall

Spontanzerfall ist ein Vorgang, bei dem instabile Atomkerne ohne äußeren Anlass durch Energieabgabe in Form von Strahlung in stabile Atomkerne zerfallen.

### 4.2. Instabile Atomkerne

Instabile Atomkerne sind Kerne, die durch ein Missverhältnis zwischen Protonen und Neutronen oder durch eine zu hohe innere Energie ohne äußeren Anlass und unabhängig von mechanischer, thermischer oder anderer Beeinflussung durch Energieabgabe in Form von radioaktiver Strahlung mehr oder weniger schnell zerfallen, bis ein stabiler Atomkern mit normalem Protonen-Neutronen-Verhältnis entsteht und ein energetisch stabiler Endzustand erreicht wird.

### 4.3. Kernzerfall mit $\alpha$ -Emission ( $\alpha$ -Strahlung)

Die  $\alpha$ -Emission besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumkernen. Sie sind durch magnetische und elektrische Felder ablenkbar. Die Reichweite beträgt nur wenige Zentimeter an der Luft. Es entsteht ein Isotop, dessen Kernladungszahl um zwei und Massenzahl um vier Einheiten verringert ist.

### 4.4. Kernzerfall mit $\beta^-$ -Emission ( $\beta^-$ -Strahlung)

Die  $\beta^-$ -Emission besteht aus Elektronen. Sie sind durch magnetische und elektrische Felder ablenkbar. Es entsteht ein Isotop mit gleicher Massenzahl, aber Kernladungszahl um eine Einheit erhöht.

### 4.5. Kernzerfall mit $\beta^+$ -Emission (Positronstrahlung)

Die  $\beta^+$ -Emission besteht aus Positronen. Sie sind durch magnetische und elektrische Felder ablenkbar. Es entsteht ein Isotop mit gleicher Massenzahl, aber Kernladungszahl um eine Einheit verringert.

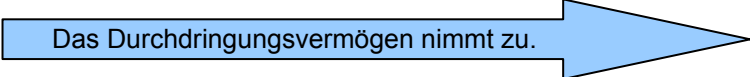
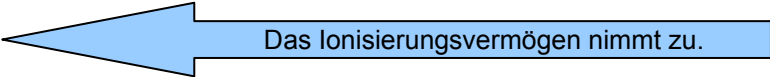
### 4.6. $\gamma$ -Strahlung

Die  $\gamma$ -Strahlung ist eine energiereiche elektromagnetische Strahlung (Welle) mit sehr hoher Frequenz. Die Frequenz ist noch höher als bei Röntgenstrahlung. Die Strahlung kann weder elektrisch noch magnetisch abgelenkt werden. Ein energetisch angeregter Atomkern gibt  $\gamma$ -Strahlung ab, Massenzahl und Kernladungszahl bleiben gleich.

## 5. Radioaktive Strahlung

Radioaktive Strahlung ist die räumliche Ausbreitung von Energie in Form von abgestrahlten (emittierten) Teilchen oder in Form von elektromagnetischer Strahlung ( $\gamma$ -Strahlung). Beim Durchgang durch Stoffe gibt die radioaktive Strahlung Energie an diese Stoffe ab, diese werden ionisiert, die radioaktive Strahlung wird dabei geschwächt.

### 5.1. Arten der radioaktiven Strahlung

Strahlungsart	Alphastrahlung	Betastrahlung	Positronstrahlung	Gammastrahlung
Symbol	$\alpha$ oder ${}^4_2\text{He}$	$\beta^-$ oder ${}^0_{-1}\text{e}$	$\beta^+$ oder ${}^0_{+1}\text{e}$	$\gamma$
Teilchen	Heliumkerne, zweifach positiv geladen	Elektronen	Positronen	keine Teilchen, elektromagnetische Strahlung
Ablenkung	Ablenkung durch magnetische und elektrische Felder			nicht ablenkbar
Durchdringungsvermögen				
Ionisierungsvermögen				

### 5.2. Nachweis der radioaktiven Strahlung

Der Nachweis der radioaktiven Strahlung gelingt durch Ausnutzung des physikalischen Vorgangs der Ionisation (siehe Elektrizitätslehre). Durch die Energiezufuhr der radioaktiven Strahlung können aus den elektrisch neutralen Teilchen (Moleküle eines Gasgemisches) Ionen und Elektronen gebildet werden. Diese elektrisch geladenen Teilchen sind im Gas frei beweglich. Erzeugt man mit einer sehr hohen Gleichspannung ein elektrisches Feld, werden diese geladenen Teilchen beschleunigt. Sie stoßen mit weiteren Gasteilchen zusammen und ionisieren diese. Sie lösen eine Elektronenlawine aus, die sich in einem Messgerät (Geiger-Müller-Zählrohr) elektrisch auswerten lässt.

### 5.3. Radioaktive Isotope

Radioaktive Isotope sind Atome mit instabilen Atomkernen, die unter Aussendung (Emission) von radioaktiver Strahlung sehr schnell oder auch sehr langsam (siehe Halbwertszeit) in Isotope mit stabilen Atomkernen zerfallen.

## 5.4. Halbwertszeit

Halbwertszeit ist die Zeit, in der die Hälfte der jeweils (noch) vorhandenen Atome zerfällt.

	Beispiel: Halbwertszeit beträgt 10 Jahre	vorhandene Anzahl der Atome des ursprünglichen Isotops
1. Ablauf der Halbwertszeit	nach 10 Jahren	50,000 %
2. Ablauf der Halbwertszeit	nach 20 Jahren	25,000 %
3. Ablauf der Halbwertszeit	nach 30 Jahren	12,500 %
4. Ablauf der Halbwertszeit	nach 40 Jahren	6,250 %
5. Ablauf der Halbwertszeit	nach 50 Jahren	3,125 %
6. Ablauf der Halbwertszeit	nach 60 Jahren	1,563 %
7. Ablauf der Halbwertszeit	nach 70 Jahren	0,781 %
8. Ablauf der Halbwertszeit	nach 80 Jahren	0,391 %
9. Ablauf der Halbwertszeit	nach 90 Jahren	0,195 %
10. Ablauf der Halbwertszeit	nach 100 Jahren	0,098 %

Halbwertszeiten können sehr langfristig oder auch sehr kurzfristig sein.

Beispiele:	Uran-238	4 510 000 000 Jahre
	Uran-235	684 000 000 Jahre
	Uran-234	252 000 Jahre
	Polonium-209	103 Jahre
	Polonium-210	138,40 Tage
	Polonium-204	3,8 Stunden
	Polonium-203	42 Minuten
	Polonium-218	3,05 Minuten
	Polonium-216	0,158 Sekunden
	Polonium-215	0,001 83 Sekunden
	Polonium-214	0,000 164 Sekunden
	Polonium-212	0,000 000 304 Sekunden

## 6. Kernumwandlungen, Herstellung radioaktiver Isotope

### Kernumwandlungen

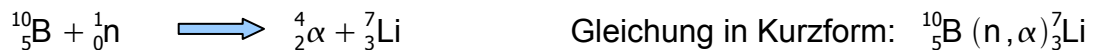
Kernumwandlungen sind Vorgänge, welche nach dem Auftreffen eines beschleunigten Elementarteilchens auf einen stabilen Atomkern ablaufen. Es entsteht ein instabiler, angeregter Zwischenkern, der sich spontan mehr oder weniger schnell unter Aussendung von Teilchen oder Gammastrahlung in einen stabilen Kern umwandelt. Dabei wird Energie frei. Es ist die kinetische Energie der ausgesandten Teilchen oder die Gammastrahlung.

Hinweis: Bei einer Kernumwandlung müssen die Summen der Massenzahlen und die Summe der Kernladungen auf beiden Seiten der Umwandlungsgleichung gleich sein.

#### **Kernumwandlung durch $\alpha$ -Teilchen (Heliumkerne)**

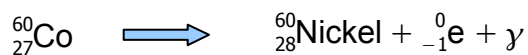


#### **Kernumwandlung durch Neutronen**



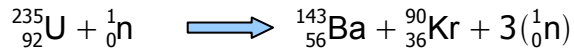
### Herstellung radioaktiver Isotope

Die Herstellung radioaktiver Isotope erfolgt in Kernreaktoren. Die dafür vorgesehenen Stoffe werden mit Neutronen bestrahlt. Die Neutronen dringen in die Atomkerne ein und bilden durch Kernumwandlung radioaktive Isotope.



## 7. Kernspaltung, Energiefreisetzung durch Kernspaltung

Durch Aufnahme eines auftreffenden Neutrons geht ein Uran-235-Kern in einen instabilen Uran-236-Kern über. Dieser wird in zwei fast gleich große Bruchstücke unter Aussendung von 3 Neutronen gespalten.



Dabei wird Kernenergie in Form von Bewegungsenergie der Bruchstücke, Neutronen und Gammastrahlung frei. Ein weiterer geringer Anteil der freiwerdenden Kernenergie entfällt auf die Betastrahlung und Gammastrahlung beim weiteren Zerfall der Bruchstücke.

Das Barium-143 zerfällt über vier Stufen zu stabilem Neodym-143.

Das Krypton-90 zerfällt über vier Stufen zu stabilem Zirkonium-90.

Bei der Kernspaltung wird Kernenergie in Form von kinetischer Energie der Spaltstücke, der Neutronen und durch Strahlung freigesetzt. Die Bewegungsenergie der Spaltstücke verwandelt sich beim Abbremsen durch die umgebenden Körper in Wärme.

Bei der Spaltung eines Urankerns wird Energie in Höhe von etwa  $32 \cdot 10^{-15}$  kJ frei.

1 kg trockenes Holz setzt	16 MJ frei.
1 kg Methanol setzt	19,5 MJ frei.
1 kg Braunkohle setzt	20 MJ frei.
1 kg Ethanol setzt	27 MJ frei.
1 kg Steinkohle setzt	30 MJ frei.
1 kg Benzin setzt	42 MJ frei.
1 kg Erdöl setzt	43 MJ frei.

1 kg Uran-235 setzt 85 000 000 MJ frei.

Die Kernspaltung von 1 kg Uran-235 ist mit der Energiefreisetzung von etwa 2800 t Steinkohle vergleichbar.

## 8. Die ungesteuerte Kettenreaktion

Nach jeder Kernspaltung werden 3 Neutronen frei. Diese spalten wiederum 3 Atomkerne. Dabei werden 9 Neutronen freigesetzt, welche 9 Atomkerne spalten und jeweils 3 Neutronen freisetzen, zusammen 27 Neutronen.

Diese 27 Neutronen spalten zeitgleich 27 Kerne unter Freisetzung von 81 Neutronen.

Diese 81 Neutronen spalten Kerne unter Freisetzung von 243 Neutronen.

Durch die Spaltung werden 729 Neutronen freigesetzt ... usw.

1. Spaltungszyklus	$3^1$	3 Neutronen
2. Spaltungszyklus	$3^2$	9 Neutronen
3. Spaltungszyklus	$3^3$	27 Neutronen
4. Spaltungszyklus	$3^4$	81 Neutronen
5. Spaltungszyklus	$3^5$	243 Neutronen
6. Spaltungszyklus	$3^6$	729 Neutronen
7. Spaltungszyklus	$3^7$	2 187 Neutronen
8. Spaltungszyklus	$3^8$	6 561 Neutronen
9. Spaltungszyklus	$3^9$	19 683 Neutronen
10. Spaltungszyklus	$3^{10}$	59 049 Neutronen
11. Spaltungszyklus	$3^{11}$	177 147 Neutronen
12. Spaltungszyklus	$3^{12}$	531 441 Neutronen
13. Spaltungszyklus	$3^{13}$	1 594 323 Neutronen
14. Spaltungszyklus	$3^{14}$	4 782 969 Neutronen
15. Spaltungszyklus	$3^{15}$	14 348 907 Neutronen
16. Spaltungszyklus	$3^{16}$	43 046 721 Neutronen
17. Spaltungszyklus	$3^{17}$	129 140 163 Neutronen
18. Spaltungszyklus	$3^{18}$	387 420 489 Neutronen
19. Spaltungszyklus	$3^{19}$	1 162 261 467 Neutronen
20. Spaltungszyklus	$3^{20}$	3 486 784 401 Neutronen
21. Spaltungszyklus	$3^{21}$	10 460 353 203 Neutronen
...		
30. Spaltungszyklus	$3^{30}$	205 891 132 094 649 Neutronen $\approx 2,059 \cdot 10^{14}$ Neutronen
...		
40. Spaltungszyklus	$3^{40}$	$\approx 1,216 \cdot 10^{19}$ Neutronen
...		
50. Spaltungszyklus	$3^{50}$	$\approx 7,179 \cdot 10^{23}$ Neutronen
51. Spaltungszyklus	$3^{51}$	$\approx 21,537 \cdot 10^{23}$ Neutronen
52. Spaltungszyklus	$3^{52}$	$\approx 64,611 \cdot 10^{23}$ Neutronen
53. Spaltungszyklus	$3^{53}$	$\approx 193,833 \cdot 10^{23}$ Neutronen

Die komplette Kettenreaktion läuft in wenigen Mikrosekunden ( $\approx 5 \cdot 10^{-6}$  s) ab.

Hinweis: Je nach Reinheitsgrad beträgt die kritische Masse für Uran-235 etwa 10...15 kg und für Plutonium-239 etwa 5...6 kg, für die Auslösung einer unkontrollierten nuklearen Kettenreaktion. 5,3 kg Plutonium entspricht einer Kugel von 8 cm Durchmesser! (Dichte  $19,84 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Die Aufnahme weniger Mikrogramm Plutonium führt zu kurzandauernder Strahlenkrankheit mit Todesfolge.

Die Avogadro-Konstante besagt, dass in 1 mol Uran-235 =  $6,022\,045 \cdot 10^{23}$  Atome Uran-235 vorhanden sind. 1 mol Uran-235 hat eine Masse von 235 g.

10 kg Uran-235 sind daher  $\approx 42,55$  mol Uran-235, das entspricht  $256,24 \cdot 10^{23}$  Atome Uran-235. Theoretisch würden nach 53 Spaltungszyklen innerhalb weniger Mikrosekunden mehr als 10 kg Uran-235 gespalten sein.



## 9. Die gesteuerte Kettenreaktion, Kernreaktoren

Wird ein großer Anteil der bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen durch spezielle Materialien (z.B. Kadmium) aufgenommen und stehen daher zur weiteren Spaltung nicht mehr zur Verfügung, kann die Kettenreaktion in ihrem Verlauf gesteuert werden.

**Je mehr Neutronen absorbiert werden, desto weniger Spaltprozesse finden statt.**

Dieses Grundprinzip zur Steuerung einer Kettenreaktion wird in einem Kernreaktor (Atomreaktor) zur Energiegewinnung ausgenutzt. Die freiwerdende Energie wird mit Energieträgern (Wasser, Wasserdampf) abgeleitet und zur Energiegewinnung eingesetzt (Antrieb von Turbinen).

### Wirkungsweise eines Kernreaktors

#### Druckwassereaktor

Schwach angereichertes Uran mit einem Mantel aus Stahl befindet sich in einem Behälter mit Wasser unter hohem Druck. Das Wasser leitet die entstehende Wärme ab und fungiert gleichzeitig als Bremssubstanz (Moderator) für schnelle Neutronen um die Kernspaltung zu verlangsamen. Mit Hilfe von Regelstäben erfolgt eine Steuerung des Reaktorprozesses. Der hohe Druck im Behälter sorgt dafür, dass das Wasser nicht siedet. Die abgeführte Wärme wird in einem Wärmetauscher aus dem geschlossenen Wasserkreislauf abgegeben zum Antreiben von Turbinen.

#### Siedewasserreaktor

In diesem Reaktor kommt das Wasser an der Oberfläche der Uranstäbe zum Sieden. Diese aufgenommene Energie wird vom Wasserdampf in einem Wärmeaustauscher wieder abgegeben zum Antrieb von Turbinen. Auch hier ist Wasser zugleich Wärmeableiter und Moderator (Neutronenbremse). Mit Hilfe von Regelstäben erfolgt eine Steuerung des Reaktorprozesses.

### Verwendungszweck von Kernreaktoren

- a) Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren zur **Energiegewinnung**
- b) Brutreaktoren zur Erzeugung von spaltbarem Material
- c) Forschungsreaktoren
  - als Neutronenquelle für Forschungszwecke
  - zur Erzeugung radioaktiver Isotope
  - zum Studium der Reaktorphysik

## 10. Zerfallsreihen

Beim Zerfall eines radioaktiven Atoms entsteht meist wieder ein radioaktives Atom. So ergeben sich verschiedene Zerfallsreihen. Am Ende einer Zerfallsreihe steht ein stabiler Atomkern.

### 10.1. Uran-Radium-Reihe

Ausgangskern:  ${}_{92}^{238}\text{U}$

stabiler Endkern:  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$

### 10.2. Thorium-Reihe

Ausgangskern:  ${}_{90}^{232}\text{Th}$

stabiler Endkern:  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$

### 10.3. Uran-Aktinium-Reihe

Ausgangskern:  ${}_{92}^{235}\text{U}$

stabiler Endkern:  ${}_{82}^{207}\text{Pb}$

### 10.4. Neptunium-Reihe

Ausgangskern:  ${}_{93}^{237}\text{Np}$

stabiler Endkern:  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$

## 11. Elementarteilchen

Die bisher bekannten einfachsten Bausteine der Materie, welche sich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht weiter zerlegen lassen, nennt man Elementarteilchen. Elementarteilchen sind am Bau der Atome beteiligt.

Bisher sind bereits mehr als 200 Elementarteilchen bekannt, deren Lebensdauer von Sekundenbruchteilen bis unendlich (das heißt stabil) reicht. Sie treten nicht nur als Bestandteile der Atome auf, sondern sind auch in der Höhenstrahlung oder bei Kernumwandlungen anzutreffen.

Elementarteilchen können positiv, negativ oder neutral geladen sein.

Elementarteilchen besitzen eine Masse von 0 bis 25 000  $m_e$  (Elektronenmassen).

Jedes Elementarteilchen kennt ein Antiteilchen, diese unterscheiden sich im Vorzeichen der Ladung (+ / -).

Trifft ein Elementarteilchen auf sein Antiteilchen, zerstrahlen sie unter Freisetzung der Energie.

Man unterscheidet vier Gruppen von Elementarteilchen (Tabelle mit einigen Beispielen).

Photonen	Photon	$\gamma$
Leptonen (leichte Teilchen)	Elektron Neutrino	$e^-$ $\nu$
Mesonen (mittelschwere Teilchen)	$\pi$ -Meson K-Meson	$\pi^0, \pi^+$ $K^0, K^+$
Baryonen (schwere Teilchen)	Proton Neutron	p n

### Nachweis der Elementarteilchen

Der Nachweis von Elementarteilchen erfolgt mit

- Kernspurplatte (Fotoplatte)
- Ionisationskammer
- Zählrohr ( $\rightarrow$  Kapitel 5.2.)
- Nebelkammer
- Blaskammer
- Spintariskop
- Szintillationszähler