Thomas Schulenberg

Die vierte Generation der Kernreaktoren

Grundlagen, Typen und Nutzen verständlich erklärt

SACHBUCH

Springer

Die vierte Generation der Kernreaktoren

Thomas Schulenberg

Die vierte Generation der Kernreaktoren

Grundlagen, Typen und Nutzen verständlich erklärt

Springer

Thomas Schulenberg
Institut für Thermische Energietechnik und
Sicherheit
Karlsruher Institut für Technologie
Eggenstein-Leopoldshafen
Baden-Württemberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-61604-8 ISBN 978-3-662-61605-5 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-662-61605-5

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Lisa Edelhaeuser
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Kerntechnik	7
3	Innovative wassergekühlte Reaktoren	41
4	Hochtemperaturreaktoren	61
5	Der Brennstoffkreislauf	81
6	Natriumgekühlte schnelle Reaktoren	103
7	Bleigekühlte schnelle Reaktoren	127
8	Gasgekühlte schnelle Reaktoren	149
9	Salzschmelzenreaktoren	163
10	Bedeutung für Wirtschaft und Gesellschaft	185
Glossar		191
Literatur		197

Abkürзungen

AEG	Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft
AMU	Atomic Mass Unit
ARE	Aircraft Reactor Experiment
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BREST	Быстрый Реактор ЕСТественной безопасности (Schneller Reaktor mit inhärenter Sicherheit)
CANDU	CANada Deuterium Uranium
CEFR	China Experimental Fast Reactor
CRIEPI	Central Research Institute of Electric Power Industry
DIAMEX	DIAMide EXtraction
DOE	Department of Energy
EBR	Experimental Breeder Reactor
EPR	European Pressurized water Reactor
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
FBTR	Fast Breeder Test Reactor
GTHTR	Gas Turbine High-Temperature Reactor
GTMHR	Gas Turbine Modular Helium Reactor
HD	Hochdruck
HDR	Heißdampfreaktor
HPLWR	High Performance Light Water Reactor
HTR	High Temperature Reactor
HTR-PM	High-Temperature Pebble Bed Modular Reactor
HTTR	High-Temperature Test Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
IPPE	Institute for Physics and Power Engineering
JSFR	Japanese Sodium-cooled Fast Reactor

KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
KWU	KraftWerk Union
MD	Mitteldruck
MOSART	MOlten Salt Actinide Recycler and Transmuter
MOX	Mischoxid aus UO_2 und PuO_2
MSFR	Molten Salt Fast Reactor
MSRE	Molten Salt Reactor Experiment
MYRRHA	Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications
ND	Niederdruck
NEA	Nuclear Energy Agency
NITI	Научно-Исследовательский Технологический Институт им. А. П. Александрова (Nautschno-Issledovatelskij Technologitscheskiji Institut im. A. P. Aleksandrova, A. P. Aleksandrov Scientific Research Technological Institute)
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor
PFBR	Prototype Fast Breeder Reactor
PUREX	Plutonium Uranium Extraction
RBMK	Реактор Большой Мощности Канальный (Reaktor Bolschoj Moschnosti Kanalnyj, Hochleistungs-Reaktor mit Kanälen)
SANEX	Selective ActiNide EXtraction
SCK-CEN	StudieCentrum voor Kernenergie – Centre d'Étude de l'énergie Nucléaire
SNR	Schneller Natriumgekühlter Reaktor
SVBR	Свинцово-Висмутовый Быстрый Реактор (Svintsovo-Vismutovyi Bystryi Reaktor, Lead-Bismuth Fast Reactor)
SWB	Speisewasserbehälter
SWR	SiedeWasserReaktor
TBP	Tributylphospat
THTR	Thorium-HochTemperatur-Reaktor
TMSR	Thorium Molten Salt Reactor
TRISO	TRistructural-ISOtropic
UK	United Kingdom
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation
USA	United States of America
VVER	Водо-Водяной Энергетический Реактор (Wodo-Wodjanoj Energetischeskij Reaktor, Wasser-Wasser-Energie-Reaktor)

Formelzeichen

A	Aktivität [Bq = 1/s]
β	Anteil verzögerter Neutronen im Verh. zu prompten Neutronen [–]
E_f	Energie pro Spaltung [eV, J]
Φ	Neutronenfluss [1/cm^{2}s]
F	Dosiskoeffizient [Sv/Bq]
k	Boltzmann-Konstante, $8{,}617 \cdot 10^{-5}$ eV/K
λ	Zerfallskonstante [1/s]
N	Nukliddichte [1/cm^3]
q	Leistungsdichte [W/cm^3]
R	Reaktionsrate [1/cm^{3}s]
ρ	Reaktivität [–]
σ_a	Wirkungsquerschnitt für die Absorption [barn, cm^2]
σ_f	Wirkungsquerschnitt für die Kernspaltung [barn, cm^2]
T	absolute Temperatur [K]
$t_{1/2}$	Halbwertszeit [s]

Check for updates

1

Einleitung

Die Geschichte der Kernenergie in den USA und Europa begann während des Zweiten Weltkriegs, oder sagen wir besser kurz nach dessen Ende. Bereits gegen Ende der 1960er Jahre wurden in Deutschland und in den USA erste Kernkraftwerke mit einer Leistung von einigen Hundert Megawatt gebaut, die wir heute als die erste Generation von nuklearen Kraftwerken bezeichnen. Das waren sowohl Druckwasserreaktoren als auch Siedewasserreaktoren, von denen heute nur noch wenige im Ausland in Betrieb sind. Ihnen folgten Kernkraftwerke von etwa 1000 MW Leistung oder mehr, die standardisiert wurden, also in Serie gebaut werden konnten; in Deutschland z. B. die Konvoi-Anlagen der Kraftwerk Union (KWU), ein Druckwasserreaktortyp mit mehr als 1200 MW elektrischer Leistung. Wir bezeichnen diese Kernkraftwerke als die zweite Generation. Sie gingen gegen Ende der 1970er Jahre und in den 1980er Jahren in Betrieb, in den USA ebenso wie in Europa.

Die stürmische Entwicklung der Kernkraftwerke in den 1970er Jahre blieb nicht ohne Folgen für die Sicherheit. Als im Jahr 1979 der Kern des Druckwasserreaktors Three Mile Island in Harrisburg, USA, durch einen Mangel an Kühlwasser überhitzte und anfing zu schmelzen, begann man, durch Sicherheitsanalysen mögliche Unfälle zu simulieren und die Konsequenzen auf die Anlage systematisch zu analysieren. Damit konnte man bereits in der Bauphase geeignete Sicherheitsmaßnahmen vorsehen. Kernkraftwerke, die in den 1980er Jahren in Deutschland in Betrieb gingen, mussten bereits eine „probabilistische Sicherheitsanalyse“ vorweisen. Das ist eine Rechnung, bei der für jede sicherheitsrelevante Komponente des

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

T. Schulenberg, *Die vierte Generation der Kernreaktoren,*
https://doi.org/10.1007/978-3-662-61605-5_1

Kraftwerks eine Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt wird, um daraus die Eintrittswahrscheinlichkeit eines folgenschweren Unfalls zu bestimmen. Als Risiko bezeichnet man das mathematische Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Folgeschaden. War das Risiko zu hoch, musste das Sicherheitssystem verbessert werden. Für die älteren Kraftwerke, die 1980 schon in Betrieb waren, wurde diese Sicherheitsanalyse leider nicht nachgefordert. Auch nicht für die Siedewasserreaktoren des Kraftwerks Fukushima I, die 1971 in Betrieb gingen. Sie waren ja schon genehmigt.

Der Schaden in Harrisburg blieb ohne Folgen für die umliegende Bevölkerung. Der Reaktordruckbehälter blieb während des Unfalls intakt und schützte weiterhin die Umgebung vor radioaktiven Strahlen. Dass so ein Unfall auch ganz anders ausgehen kann, zeigte sich 1986 in Tschernobyl bei der Explosion eines Druckröhrenreaktors. Das ist zwar ein ganz anderer Reaktortyp als die Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren der westlichen Welt, und einen derartigen Unfall könnte man schon konstruktionsbedingt bei Druckwasserreaktoren ausschließen. Der Unfall schärfte jedoch das Bewusstsein, dass mehr getan werden muss, um die Bevölkerung zu schützen. Daraus entstand einerseits ein verbesserter Katastrophenschutz, denn niemand in der Umgebung des Tschernobyl-Reaktors hätte eine nennenswerte Strahlung abbekommen, wären alle gleich informiert worden und wären entsprechende Maßnahmen eingeleitet worden. Andererseits führte dieser Unfall zu einer weiteren Verbesserung von Druck- und Siedewasserreaktoren, die wir heute als die dritte Generation bezeichnen. Der Europäische Druckwasserreaktor „EPR“, der in den 1990er Jahren von Siemens in Deutschland und Framatome in Frankreich gemeinsam entwickelt wurde, wurde so konstruiert, dass selbst im Fall einer Explosion des Reaktors niemand in der umliegenden Bevölkerung evakuiert werden müsste. Das erreicht man mit viel Beton und einer durchdachten Kühlung. Zu jedem Zeitpunkt, also auch dann, wenn alles schiefgegangen sein sollte, muss bei diesem Reaktor die Möglichkeit bestehen, ihn wieder unter Kontrolle zu bringen. Solche EPR-Reaktoren finden wir heute in Finnland und in Frankreich, in China und demnächst im Vereinigten Königreich (UK).

Was ist dann die vierte Generation? Ich vergleiche die Reaktorgenerationen gern mit dem Automobilbau. Die zweite Generation ist in dieser Analogie ein Mittelklassefahrzeug. Eine ausgereifte Technik, kostengünstig hergestellt und viel verkauft. Die dritte Generation entspricht eher einer S-Klasse. Sie ist nicht nur schöner und komfortabler, sondern hat auch viele zusätzliche Sicherheitseinrichtungen zum Schutz der Insassen und der anderen Verkehrsteilnehmer. Wenn man sie anständig fährt, also nicht die

höhere Sicherheit durch höhere Geschwindigkeit kompensiert, sollte das S-Klasse-Fahrzeug weniger tödliche Unfälle verursachen. Die S-Klasse ist dadurch aber erheblich teurer, und da ich mir eine S-Klasse nicht leisten kann, bleibe ich lieber bei der Mittelklasse und nehme das höhere Risiko in Kauf.

Sagen Sie jetzt bitte nicht, das wäre nicht vergleichbar, das Risiko eines Kernkraftwerks wäre doch deutlich höher als das von Autos. Das Gegenteil ist der Fall: Jedes Jahr bringen wir weltweit mehr als eine Millionen Menschen mit Autos um. Allein in Deutschland rund zehn Personen pro Tag. Und wir sind stolz darauf, dass es nur noch so wenige sind. An den Folgen eines Reaktorunfalls ist in Deutschland meines Wissens noch niemand gestorben.

In dieser Analogie entspricht die vierte Generation von Kernkraftwerken den Rennwagen. So ein Formel-1-Rennwagen ist weder sicherer noch preiswerter als ein normales Auto. Er ist weder sparsamer im Verbrauch noch umweltfreundlicher oder leiser. Ganz im Gegenteil. Er taugt eigentlich zu gar nichts, denn er hat keine Straßenzulassung. Und Sie würden auch kaum damit in den Urlaub fahren. Er hat ja noch nicht einmal einen Kofferraum. Warum entwickelt und baut man dann so einen Rennwagen? Diese Frage ist schwer zu beantworten und die Antwort ist wohl kaum überzeugend, aber ich versuche es trotzdem einmal:

- Weil Rennwagen uns faszinieren. Ein Job in der Racing-Abteilung eines Automobilherstellers ist wohl der Traum eines jeden jungen Ingenieurs in dieser Branche, wo verrückte Ideen erlaubt sind und niemand sofort fragt „was kostet denn das …?“. Sicher, um eine verrückte Idee in eine zuverlässige Komponente eines Rennautos zu verwandeln, wird ziemlich viel Vernunft nötig sein, und die Frage nach den Kosten wird ebenso zu beantworten sein. Der Job bleibt aber trotzdem visionär.
- Weil man als Ingenieur schon mal nach den Sternen greifen muss, um mehr zu erreichen. Ein Ingenieur sollte nie aufhören, bestehende Grenzen infrage zu stellen, selbst wenn die älteren Kollegen darüber lächeln, weil die geltenden Regeln und Normen das gar nicht erlauben.

In der Kerntechnik ist analog die vierte Generation ein Sammelbegriff für Konzepte, die zwar spannend sind, die der Markt aber heute noch gar nicht benötigt. Es ist auch nicht sicher, ob der Markt diese Konzepte jemals benötigen wird. Die vierte Generation gab es eigentlich schon seit Beginn der Entwicklung von Kernkraftwerken. Es gab nur noch nicht diese Bezeichnung dafür. Es ist damit also nicht ein bestimmter Zeitraum

gemeint, sondern eher eine Vision, die die Forschung antreibt. Sie wurde um die Jahrtausendwende revitalisiert durch eine Initiative des Department of Energy (DOE) der USA und hat seitdem viele junge Ingenieure begeistert.

Die Initiative „Generation IV" war von Anfang an international ausgerichtet. Im Jahr 2001 schlossen sich zunächst Argentinien, Brasilien, Frankreich, Japan, Kanada, Südafrika, Südkorea, das Vereinigte Königreich und die USA zusammen zu einem „Generation IV International Forum", mit dem gemeinsamen Ziel, die Forschung auf diesem Gebiet voranzutreiben. Gemeinsam erreicht man mehr und man kann sich die Kosten teilen. Die vielen internationalen Absprachen, die damit verbunden sind, machen die Zusammenarbeit jedoch nicht immer einfach. In den folgenden Jahren schlossen sich die Schweiz, die Euratom als Vertreterin der Europäischen Union, die Volksrepublik China und Russland dem internationalen Bündnis an. Die technischen Ziele waren bewusst sehr allgemein formuliert – etwas, das jedes Land bedenkenlos unterschreiben konnte. Wir sollten aber dennoch einen kurzen Blick darauf werfen:

Nachhaltigkeit Dieser Begriff wird viel verwendet und er ist leider schon ein wenig abgedroschen. Unter „Nachhaltigkeit" versteht dieses Internationale Forum zum einen eine deutlich bessere Nutzung des Rohstoffs Uran. Der alte Brennstoff aus Kernreaktoren kann in der Tat wiederverwertet werden. Nicht nur einmal, sondern bei einigen Reaktorkonzepten nahezu unbegrenzt, wie wir später sehen werden. Das sichert die Brennstoffversorgung für Jahrtausende. Uran ist heute zwar sehr preisgünstig und reichlich verfügbar. Aber die heutigen Uranvorkommen reichen dennoch „nur" für einige Jahrhunderte. Grund genug, um sich über ein Recycling Gedanken zu machen.

Zum anderen ist mit Nachhaltigkeit eine Minimierung der Abfälle gemeint. Leider ist nicht alles so wertvoll, was im alten Brennstoff vorhanden ist, und wir würden es nur ungern recyceln. Viele radioaktive Spaltprodukte zerfallen innerhalb von wenigen Hundert Jahren zu stabilen, also harmlosen Stoffen. Es bleiben aber einige sehr langlebige Radionuklide, die wir in bestimmten Reaktorkonzepten der vierten Generation spalten könnten, also in kurzlebige radioaktive Stoffe umwandeln könnten. Das würde das langfristige Entsorgungsproblem deutlich entschärfen.

Sicherheit und Zuverlässigkeit Nein, das ist nicht das Gleiche. Sicherheit und Zuverlässigkeit sind sogar eher konkurrierende Ziele. Ein Auto, das sich nicht starten lässt, wenn irgendein kleines Problem vorliegt, ist vermutlich

sehr sicher. Aber Sie würden es dennoch nicht kaufen, denn Sie könnten es nicht zuverlässig nutzen. Ein Auto ohne Airbag kann dagegen sehr zuverlässig fahren, aber im Fall eines Unfalls sind Sie darin nicht sicher. Für die vierte Generation bedeutet das, wir hätten gern Kernkraftwerke, die so zuverlässig sind wie die zweite Generation, aber mindestens so sicher wie die dritte Generation. Das ist nicht einfach. Ein Prototyp ist in der Regel erst einmal unzuverlässig, bis wir ihn langjährig erprobt haben und alle Konstruktionsfehler gefunden und behoben sind. Für einen zuverlässigen Prototyp verwenden wir daher möglichst nur Komponenten, die schon viele Jahre lang erprobt wurden. Das schränkt die Auswahl an innovativen Systemen allerdings erheblich ein.

Wirtschaftlichkeit Dieses Ziel interessiert mich vor allem als Stromkunde. Natürlich möchte ich die Kilowattstunde möglichst preisgünstig bekommen. Für Kernkraftwerke bedeutet das zunächst einmal möglichst niedrige Herstellkosten. Man erreicht das z. B. durch Minimierung der Anzahl an Komponenten. Was nicht mehr benötigt wird, wird weggelassen. Das kostet dann nichts und kann auch nicht kaputt gehen. Zum anderen gehen in die Stromkosten auch die Bauzeit, die Brennstoffkosten und die Entsorgungskosten ein. Ein anderer Ansatz ist, möglichst viel Leistung mit dem Kraftwerk zu erzeugen. Das senkt die Investitions- und Fixkosten pro Kilowatt. Bei der vierten Generation spielen darüber hinaus auch die Entwicklungskosten eine große Rolle. Wenn das Kraftwerk zu innovativ ist, benötigen wir viele Jahre Probebetrieb, bis es zuverlässig läuft, und das kostet nicht nur Zeit, sondern auch viel Geld, da wir Kapital investiert haben, aber kaum Einnahmen haben.

Große, leistungsstarke Kraftwerke sind zwar – bezogen auf die Kilowattstunde – kostengünstiger als kleine, aber insbesondere Schwellenländer haben damit ein Problem. Wer leiht mir so viel Geld? Kann ich die erzeugten Kilowattstunden überhaupt verkaufen? Wer trägt das finanzielle Risiko, wenn sich der Bau verzögert? In diesen Fällen sind kleine Kraftwerke mitunter wirtschaftlicher.

Schutz vor Proliferation Unter Proliferation versteht man den Missbrauch von Kernbrennstoff zur Herstellung von Kernwaffen. Während des kalten Kriegs wurden einige Kernreaktoren so gebaut, dass man davon so ganz nebenher Waffenplutonium abzweigen konnte. Das Ziel ist hier genau das Gegenteil. Ähnlich wie man Alkohol als Spiritus vergällt, damit er nicht getrunken wird, kann man auch Kernreaktoren so konstruieren,

dass kein kernwaffenfähiges Plutonium entsteht, sondern eine Plutoniumzusammensetzung, mit der man wohl kaum eine Atombombe bauen würde. Proliferationsresistent (englisch: *proliferation resistant*) nennt man einen Kernbrennstoff, der nicht direkt sondern mit nur mit hohem Aufwand zur Herstellung von Kernwaffen verwendet werden kann. Einen absoluten Schutz vor Proliferation bietet so ein Brennstoff allerdings nicht. Daher kontrolliert die Internationale Atomenergie-Organisation IAEA auch die Bestände an Kernbrennstoffen, aus denen man nur indirekt Kernwaffen herstellen kann, sogar Natururanbestände, jedoch nicht Uranerz. Ein proliferationsresistenter Kernbrennstoff muss aber seltener kontrolliert werden, etwa jährlich oder vierteljährlich, als ein Kernbrennstoff, der direkt zur Herstellung von Kernwaffen geeignet wäre.

Als eine erste Aktion dieses Forums wurden die vielen bis dahin bekannten Reaktorkonzepte in sechs Kategorien eingeteilt, über die ich in diesem Buch berichten möchte. Ich halte diese Einteilung für den wichtigsten Schritt überhaupt, denn erst dadurch wurde eine internationale Zusammenarbeit möglich. Für jedes der sechs Konzepte gründete sich dann auch schon bald ein Lenkungsausschuss, der jeweils eine Roadmap [1] erarbeitete. Darin wird skizziert, was im Prinzip zu tun wäre, um eines Tages einen solchen Reaktor gemeinsam bauen zu können. Man muss dazu aber erwähnen, dass das Forum nie ein eigenes Budget hatte, um die notwendigen Forschungsarbeiten beauftragen zu können. Sämtliche Beiträge von internationalen Forschungsgruppen waren freiwillig. Die Gruppen brauchten dazu jeweils Fördermittel ihres eigenen Lands, aus der Industrie oder, in Europa, von der Euratom. Die Zuwendungsgeber ließen sich aber noch weniger koordinieren und das gemeinsame Forschungsmanagement erforderte viel Geduld und Überzeugungskraft. Es ist daher nicht verwunderlich, dass der Zeitplan der Roadmap kaum einzuhalten war. Die überarbeitete Version der Roadmap aus dem Jahr 2014 [2] sollte man ebenso wenig mit einem strikten Entwicklungsplan verwechseln. Sie gibt aber Neueinsteigern in diese Technologie einen ersten Hinweis darauf, wo man sich sinnvoll engagieren sollte.

Bevor wir tiefer in die Technologien der einzelnen Reaktorkonzepte einsteigen, sollte ich Ihnen einige Grundlagen der Kerntechnik erläutern. Wenn Sie das schon kennen, können Sie gern zu Kap. 3 weiterblättern.

Check for updates

2

Grundlagen der Kerntechnik

Wir beginnen zunächst mit einem Ausflug in die Kernphysik. Ein Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen. Die Protonen sind elektrisch positiv geladen, mit der gleichen Ladung wie ein Elektron, nur halt mit positivem Vorzeichen. Die Neutronen sind elektrisch neutral. Protonen und Neutronen bezeichnet man zusammen als Kernbausteine oder Nukleonen. Sie werden durch die Kernkräfte zusammengehalten, die sehr viel stärker sind als die elektrostatischen Kräfte, jedoch eine sehr viel kürzere Reichweite haben. Deshalb sitzen die Nukleonen dicht zusammengedrängt im Kern und fliegen nicht auseinander, obwohl die Protonen sich gegenseitig elektrisch abstoßen. Die Anzahl der Elektronen in der Hülle um den Atomkern ist gleich der Anzahl der Protonen im Kern, es sei denn, das Atom ist ionisiert. Ein nicht ionisiertes Atom ist somit elektrisch neutral. Die Elektronen sind für die chemischen Reaktionen verantwortlich, und damit ist es auch die Zahl der Protonen. Ein chemisches Element hat daher immer die gleiche Anzahl von Protonen; man nennt diese Zahl auch die Ordnungszahl im Periodensystem. Atome desselben Elements können aber eine unterschiedliche Anzahl an Neutronen haben. Die Chemie merkt davon nichts, und wir müssen schon ein Massenspektrometer nehmen, um einen Unterschied festzustellen. Das Atomgewicht ist dann ungefähr die Anzahl an Nukleonen mal dem mittleren Gewicht eines Protons oder Neutrons; wir bezeichnen diese Zahl daher auch als die Massenzahl und das mittlere Gewicht eines Nukleons als die atomare Masseneinheit *(AMU).*

Die Vielzahl unterschiedlicher Atome, unter Berücksichtigung der Anzahl an Neutronen, bezeichnet man als Nuklide. Es gibt viel mehr Nuklide als

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020
T. Schulenberg, *Die vierte Generation der Kernreaktoren,*
https://doi.org/10.1007/978-3-662-61605-5_2

chemische Elemente, deren Periodensystem mühelos auf ein DIN A4-Blatt passt. Für eine Nuklidkarte braucht man dagegen schon eher ein Poster. Alle Nuklide eines Elements, also solche mit gleicher Anzahl an Protonen, aber unterschiedlicher Neutronenzahl, bezeichnet man als Isotope des Elements. Viele Elemente, die wir in der Natur finden, haben mehrere stabile Isotope. Eisen mit der Ordnungszahl 26 gibt es z. B. in vier verschiedenen stabilen Versionen, und zwar den Massenzahlen 54, 56, 57 und 58. Um das Nuklid genau zu bezeichnen, schreiben wir die Ordnungszahl unten links neben das chemische Zeichen und die Massenzahl oben links. Also z. B. $^{54}_{26}\mathrm{Fe}$ oder $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$. Die rechte Seite lassen wir weiterhin den Chemikern. Verkürzt kann man auch Fe-54 oder Fe-56 schreiben, denn die Ordnungszahl ist für alle Isotope eines Elements gleich und damit schon durch das Elementsymbol festgelegt.

Nuklide und radioaktiver Zerfall

Wenn Sie dieses Buch verstehen wollen, brauchen Sie eine Nuklidkarte, in der Sie immer wieder mal nachschlagen können, wie die Nuklide sich physikalisch verhalten. In meinem Büro hängt noch so ein Poster an der Wand, allerdings mehr als Erinnerungsstück, denn moderne Nuklidkarten gibt es eher als interaktive Software oder online. Die Vielzahl an Informationen, die wir über ein Nuklid berichten können, passt inzwischen auch nicht mehr auf ein Poster.

Eine recht professionelle Nuklidkarte (und etwas Billigeres möchte ich Ihnen auch gar nicht anbieten) ist der *Isotope Browser* der Internationalen Atomenergie-Organisation IAEA. Ich möchte Ihnen gern die Kernphysik anhand dieser Nuklidkarte erklären. Laden Sie daher bitte dieses Programm auf Ihr Smartphone herunter, z. B. aus dem Google Play Store. Die App ist kostenlos und enthält keine Werbung. Sie können zwischen verschiedenen Sprachen wählen, aber nicht Deutsch, denn von Deutschen ist bekannt, dass sie gut Englisch verstehen. Ich helfe Ihnen aber gern, die Fachbegriffe zu übersetzen.

In einer Nuklidkarte sind alle Nuklide verzeichnet, die jemals beobachtet wurde. Auf der *x*-Achse ist die Anzahl der Neutronen im Nuklid angegeben und auf der *y*-Achse die Protonenzahl. Einen kleinen Ausschnitt aus der Nuklidkarte finden Sie zur Anschauung in Abb. 2.1. Die Isotope eines Elements bilden jeweils eine Zeile der Nuklidkarte. Bei stabilen Nukliden ist die Häufigkeit *(Abundance)* angegeben, also zu wie viel % dieses Isotop in der Natur vorkommt. Bei instabilen Nukliden steht dort stattdessen die

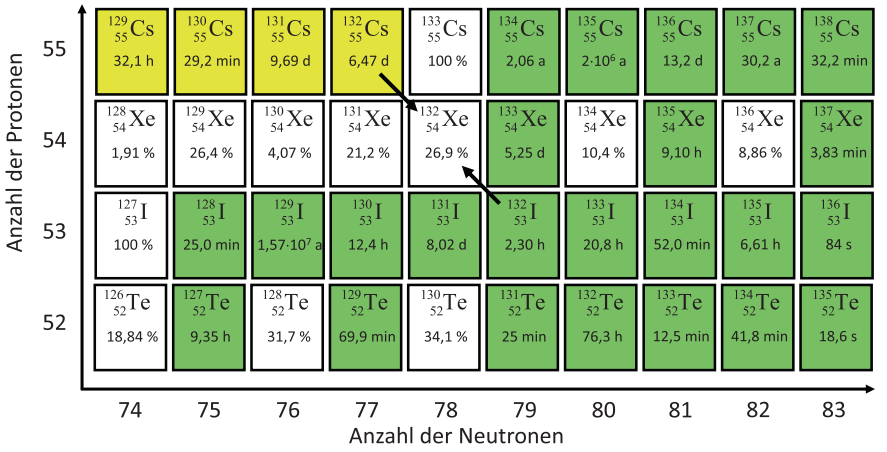

Abb. 2.1 Ausschnitt aus der Nuklidkarte; weiß: stabil, gelb: β^+-Strahler, grün: β^--Strahler

Halbwertszeit *(Half-life),* also die Zeit, die vergeht, bis jeweils die Hälfte der noch vorhandenen Exemplare des Nuklids zerfallen ist.

Nachdem Sie die App installiert haben, können Sie zunächst mal auf *Chart* tippen. Dann erscheint die Nuklidkarte als ein buntes Band, das sich von links unten nach rechts oben erstreckt. Bei leichteren Nukliden ist die Zahl der Neutronen ungefähr so groß wie die der Protonen, denn die Kernkräfte binden beide Arten von Nukleonen gleich gut. Mit zunehmender Massenzahl sehen wir jedoch einen zunehmenden Neutronenüberschuss, denn die Kernkräfte haben nur eine kurze Reichweite. Jetzt machen sich zunehmend die schwächeren abstoßenden elektrostatischen Kräfte zwischen den positiven Ladungen bemerkbar, sodass ein Neutron leichter an den Kern gebunden werden kann als ein Proton. Das bunte Band biegt daher etwas nach rechts ab.

Wenn Sie jetzt in die *Chart* hineinzoomen, erkennen Sie die stabilen Nuklide in Weiß und die instabilen, also radioaktiven, farbig. Stellen Sie sich ein Neutron vor als eine Kombination aus einem Proton und einem Elektron; das ist dann elektrisch neutral. Hat ein Nuklid zu viele Neutronen, wirft einfach ein Neutron ein negativ geladenes Elektron raus und wird zum Proton. Wir sprechen dann von einem β^--Zerfall. Der *Isotope Browser* kennzeichnet solche Nuklide in grün. In der Nuklidkarte wandern wir dann nach oben links, etwa von $^{132}_{53}\mathrm{I}$ zu $^{132}_{54}\mathrm{Xe}$.

Wenn Sie auf ein Nuklid tippen, bekommen Sie alle weiteren Informationen über das Nuklid, also z. B. wie häufig es auf welche Weise zerfällt und welche Strahlung dabei emittiert wird. Ähnlich wie die

Elektronen der Hülle sitzen die Nukleonen auf festen Plätzen mit ganz bestimmten Energieniveaus, den Quantenzuständen. Wird ein Neutron zu einem Proton, muss der Kern sich erstmal wieder zurechtrütteln. Bei diesen Änderungen seines Quantenzustands wird jeweils ein γ-Quant emittiert, ein sogenanntes Photon, so wie die Elektronenhülle ein viel energieärmeres Lichtquant emittiert, wenn die Elektronen auf andere Quantenzustände runterfallen. Der β^--Zerfall ist daher oft begleitet von γ-Strahlung. Die β^--Teilchen, also Elektronen, fliegen in der Regel nur einige mm weit, bevor sie von einem benachbarten Atom aufgenommen werden. Die γ-Strahlen können sich dagegen auch einige m weit ausbreiten. Wir benötigen daher schwere Metalle, z. B. Bleiplatten, um uns vor γ-Strahlung zu schützen.

Hat ein Nuklid viel zu viele Neutronen, wirft es auch mitunter gleich das ganze Neutron raus. Im *Isotope Browser* sind solche Zerfälle mit β^- n bezeichnet, z. B. beim Iod $^{137}_{53}\mathrm{I}$ oder Tellur $^{136}_{52}\mathrm{Te}$. Dann werden gleichzeitig ein Elektron und ein Neutron emittiert. Diese Nuklide haben nur eine kurze Halbwertszeit von wenigen Sekunden, aber ihre Neutronen haben eine große Bedeutung für die Regelung eines Reaktors, wie wir später sehen werden.

Das entstandene Tochternuklid ist oft auch selbst wieder instabil. Es zerfällt so lange weiter, bis ein stabiles Nuklid entstanden ist. Der *Isotope Browser* zeigt uns diese Zerfallskette *(decay chain)* in der Nuklidkarte, wenn wir darauf tippen. Ebenso können wir auch die Eltern *(parents)* erfahren, aus denen dieses Nuklid entstanden sein kann.

Die Zerfallsenergie wird in keV oder MeV angegeben. Ein Elektronenvolt (eV) ist die Energie, die ein Elektron hat, nachdem es von einer Spannungsdifferenz von 1 Volt beschleunigt wurde. Da wir die Elementarladung und damit die Ladung eines Elektrons kennen, nämlich $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C, können wir diese Energieeinheit umrechnen in Joule: $1\,\mathrm{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J. Das ist sehr wenig Energie, aber wir sprechen ja auch nur von einem einzigen Elektron.

Hat ein Nuklid zu viele Protonen, hat es zwei Möglichkeiten: Entweder, es schnappt sich ein Elektron aus der Hülle und ein Proton wird dadurch zum Neutron; das kennzeichnet der *Isotope Browser* als *Electron Capture* (ec). Oder das Proton wirft ein positives Anti-Elektron, also ein Positron mit einer positiven Elementarladung raus und wird dadurch zum Neutron; das bezeichnet der *Isotope Browser* als β^+-Zerfall. Beides wird gelb gekennzeichnet. Wir gelangen auf der Nuklidkarte dann nach unten rechts, wie etwa vom $^{132}_{55}\mathrm{Cs}$ zum $^{132}_{54}\mathrm{Xe}$. Das Positron kommt nicht weit. Trifft es auf ein Elektron, bleiben nur noch zwei γ-Quanten übrig. Anhand dieser beiden

γ-Quanten, im Unterschied zu den Röntgenquanten der Elektronen beim Elektroneneinfang, kann der Physiker dann auch klar zwischen beiden Zerfallsarten unterscheiden.

Oberhalb von Blei, also oberhalb einer Ordnungszahl von 82, sind alle Nuklide instabil. Selbst das Bismut-Isotop $^{209}_{83}\mathrm{Bi}$, das wir lange Zeit als stabil bezeichnet hatten, ist bei genauer Betrachtung instabil. Allerdings mit einer Halbwertszeit von $2 \cdot 10^{19}$ Jahren, und das ist praktisch so gut wie stabil. Eine häufige Zerfallsart dieser schweren Nuklide ist der α-Zerfall. Im *Isotope Browser* sind diese Nuklide rosa gekennzeichnet. Dabei wirft der Kern gleich einen ganzen Helium-4-Kern raus, also eine besonders stabile Einheit aus zwei Neutronen und zwei Protonen. In der Nuklidkarte wandern wir dann um zwei Stellen nach links und um zwei Stellen nach unten. Die α-Teilchen haben nur eine Reichweite von wenigen μm. Sie schnappen sich in der Regel umgehend zwei Elektronen von benachbarten Atomen und werden damit zu Helium-Atomen. Das Material rings um den α-Strahler bildet auf die Dauer dann Heliumblasen, die wir im Elektronenmikroskop beobachten können.

Bei den schweren Nukliden gibt es zwei Besonderheiten: das Uran und das Thorium. Alle Uran-Isotope sind instabil, aber die Isotope $^{235}_{92}\mathrm{U}$ und $^{238}_{92}\mathrm{U}$ zerfallen so langsam, dass wir sie trotzdem in der Natur finden. Deshalb sind in der Nuklidkarte sowohl eine Häufigkeit als auch eine Halbwertszeit angegeben. Wenn man annimmt, dass diese zwei Isotope bei der Entstehung unseres Sonnensystems gleichermaßen vorhanden waren, kann man aus dem Verhältnis der Häufigkeit dieser Isotope auf das Alter unseres Sonnensystems zurückschließen: von den schneller zerfallenden Isotopen ist heute weniger übrig geblieben. Das dabei entstehende Thorium-Isotop $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ ist mit einer Halbwertszeit von $1{,}4 \cdot 10^{10}$ Jahren auch noch ziemlich stabil und daher relativ häufig zu finden.

Wenn wir mit dem Geigerzähler durch den Schwarzwald laufen, finden wir manchmal Pechblende, ein uranhaltiges Gestein, und darin Spuren von $^{234}_{92}\mathrm{U}$, Radium ($^{226}_{88}\mathrm{Ra}$) und mitunter Radon ($^{222}_{86}\mathrm{Rn}$). Das sind Nuklide entlang der Zerfallskette von $^{238}_{92}\mathrm{U}$. Wenn Sie im *Isotope Browser* auf die Zerfallskette von $^{238}_{92}\mathrm{U}$ tippen, können Sie verfolgen, wie daraus im Lauf von Millionen von Jahren letztendlich das stabile Blei-Isotop $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$ wird. Radium und Radon werden folglich ständig nachgebildet, zerfallen also scheinbar nicht.

Manchmal gibt es in der Nuklidkarte auch zwei Isotope mit gleicher Massenzahl und gleicher Ordnungszahl, z. B. die Bismut-Isotope $^{210}_{83}\mathrm{Bi}$ und $^{210m}_{83}\mathrm{Bi}$. Das kleine „m“ hinter der Massenzahl kennzeichnet dabei einen metastabilen Zustand. Die Nukleonen beider Isotope sitzen dann auf

verschiedenen Quantenzuständen und die Isotope zerfallen entsprechend recht unterschiedlich.

Der *Isotope Browser* gibt uns auch die Bindungsenergie pro Nukleon eines Nuklids an *(Binding energy/A)*. Bei Uran ist diese Bindungsenergie geringer als bei den leichteren Nukliden und die stabilen Nuklide habe die höchste Bindungsenergie pro Nukleon. Aus der Differenz können wir im Prinzip berechnen, wie viel Energie frei wird, wenn wir Uran spalten, vorausgesetzt wir kennen die Spaltprodukte. Das hängt aber ganz davon ab, wie ein Neutron den Uran-Kern zufällig trifft. Im Mittel bekommen wir pro Spaltung 193 MeV plus die Energie von einigen Neutrinos, die aber schnell entkommen. Ihre Energie ist technisch nicht nutzbar. Umgerechnet in Energieeinheiten, die für uns anschaulicher sind, erzeugt 1 g $^{235}_{92}\mathrm{U}$ eine Energie von ca. 24 MWh, also 1 Megawatt-Tag (MWd), wenn wir es spalten. Das ist so viel wie 2600 Liter Benzin, wenn wir es im Motor verbrennen.

Die durchschnittliche Ausbeute eines bestimmten Spaltprodukts, das typischerweise bei der Kernspaltung entsteht, im Verhältnis zu allen erzeugten Spaltprodukten gibt uns der *Isotope Browser* als *Fission Yield (FY)* für jedes Nuklid an. Eine hohe Spaltausbeute von mehr als 5 % finden wir z. B. bei Nukliden mit einer Massenzahl von ca. 140, also im Bereich von Iod oder Caesium, oder mit einer Massenzahl von ca. 90, also in der Umgebung von Strontium oder Yttrium. Es werden also meist zwei verschieden große Bruchstücke erzeugt, ein kleineres und ein größeres Bruchstück. Zwei gleich große Bruchstücke mit einer Massenzahl von jeweils ca. 118 sind dagegen eher selten. Weil das Uran vor der Spaltung einen erheblichen Neutronenüberschuss hatte, sind die Spaltprodukte immer Nuklide mit einem hohen Neutronenüberschuss. Für diese kleineren Nuklide ist dieser Überschuss aber reichlich instabil, und so zerfallen die Spaltprodukte auch schnell durch β^--Zerfälle und unter Emission von Neutronen zu stabileren Nukliden. Erst wenn ein nahezu stabiles Nuklid erreicht wurde, geht der Zerfall langsamer voran, bis schließlich ein stabiles Nuklid entsteht.

Bei jedem Zerfallsprozess wird Energie freigesetzt. Wenn wir die Elektronenvolt, die uns die Nuklidkarte angibt, mit dem Faktor $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ in Joule umrechnen und mit der Anzahl der Zerfälle pro Sekunde multiplizieren, bekommen wir eine Heizleistung. Im Vergleich zur Heizleistung der Kernspaltung ist das zwar nur ca. 1 % bis 2 %, aber diese Heizung kann man nicht abschalten. Wenn z. B. ein Reaktor im Betrieb eine Wärmeleistung von 3000 MW hatte, dann haben die Spaltprodukte folglich nach dem Abschalten noch eine Leistung von 30 bis 60 MW. Das reicht, um den ganzen Reaktorkern zusammenschmelzen zu lassen, wenn wir ihn

nicht kühlen. Was schneller zerfällt, produziert mehr Wärme, ist aber auch schneller weg. Die Nachwärme der Spaltprodukte klingt daher mit der Zeit ab. Nach einem Jahr beträgt sie im Druckwasserreaktor nur noch etwa 0,2 %.

Nachdem wir nun eine Zeit lang in der Nuklidkarte geblättert haben, können wir folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Spaltprodukte sind radioaktiv; meist β^-- und γ-Strahler, kurzzeitig auch Neutronenstrahler. Wir müssen sie abschirmen, um uns vor ihnen zu schützen. Das Uran ist vergleichsweise harmlos, weil es extrem langsam zerfällt, also kaum strahlt. Ein frisches Brennelement mit angereichtem Uran können Sie bedenkenlos anfassen, wenn Sie mal Gelegenheit dazu haben. Das erleichtert auch die Herstellung von Brennelementen.
- Die radioaktiven Spaltprodukte produzieren Wärme, die man nicht abschalten kann. Jeder Reaktor braucht daher ein Notkühlsystem, falls der Strom ausfällt. Die verschiedenen Reaktorkonzepte der vierten Generation haben dafür recht individuelle Lösungen. Wenn wir von der Sicherheit eines Reaktors reden, meinen wir meist, wie vertrauenswürdig diese Notkühlung ist. Es gibt aber auch noch ganz andere Sicherheitsanforderungen, wie wir bereits im nächsten Kapitel sehen werden.

Kernreaktionen von Neutronen

Neutronen können Uran spalten. Sie spielen also eine wichtige Rolle bei der Auslegung eines Reaktors. Lassen Sie uns aber erst einen Blick darauf werfen, was Neutronen sonst noch so alles in einem Reaktor anstellen.

Die Kernreaktionen der Neutronen kann man einfach messen. Dazu brauchen wir zunächst einen Neutronenstrahler. Zu Zeiten Otto Hahns nahm man dazu eine Mischung aus Radiumsulfat und Berylliumsulfat. Das stabile $^{9}_{4}\mathrm{Be}$ absorbiert dann die α-Teilchen des $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ und bildet gewöhnlichen Kohlenstoff $^{12}_{6}\mathrm{C}$, wobei ein Neutron emittiert wird. Effektiver bekommen wir heute Neutronenstrahlen, wenn wir mit einer Nuklidprobe zu einem Forschungsreaktor gehen und uns dort einen Laborplatz an einem der Strahlrohre reservieren lassen, die aus dem Forschungsreaktor raus in die Laborhalle laufen.

Der Reaktor kann uns Neutronen mit einem breiten Energiespektrum liefern. Sie werden durch Kernspaltung erzeugt und haben zunächst eine Energie von ca. 1 bis 5 MeV. Man nennt sie die prompten Neutronen der Kernspaltung. Wenn sie durch ein Wasserbad laufen, werden sie durch Stöße