

Hansruedi Völkle

Kernenergie

Chancen und Risiken

SACHBUCH

EBOOK INSIDE

 Springer

Kernenergie

Hansruedi Völkle

Kernenergie

Chancen und Risiken

 Springer

Hansruedi Völkle
Physics Departement
University of Fribourg
Fribourg, Schweiz

ISBN 978-3-662-59300-4 ISBN 978-3-662-59301-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59301-1>

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.

Einbandabbildung: © NinjaStudio/stock.adobe.com

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

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

Geleitwort

Die Kernenergie ist die umstrittenste Stromerzeugungstechnologie, vor allem im deutschsprachigen Raum. Ausstieg ist die Losung, während in anderen Regionen dieser Welt neue, moderne Kernkraftwerke gebaut werden. Hierzulande soll der nuklear erzeugte Strom durch solchen aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden. Da auch in der Schweiz die Wasserkraft nurmehr unbedeutend ausgebaut werden kann, wenn überhaupt, ruhen die Hoffnungen auf den so genannten neuen erneuerbaren Energien Fotovoltaik, Wind, Biomasse und Geothermie. Es bestätigt sich aber immer deutlicher, dass deren Entwicklung bei Weitem nicht genügt, um die Kernenergie fristgerecht zu ersetzen. Einzig die Fotovoltaik erreicht etwa den für die Zielerreichung der Energiestrategie 2050 notwendigen Zubau. Wind und Biomasse stagnieren, ob jemals in der Schweiz Strom aus Geothermie erzeugt wird, ist offen. Zudem wird die Subventionierung der neuen erneuerbaren Stromquellen in absehbarer Zeit enden.

Die Schweiz verfügt längst nicht mehr über genügend eigene Elektrizität, vor allem im Winter. Die Stromlücke wird sich mit dem Ausstieg aus der Kernenergie ausweiten und die Abhängigkeit von Stromimporten zunehmen. Diese stammen überwiegend aus fossiler Erzeugung, vor allem aus Kohlekraftwerken; die Schweiz verbraucht damit vermehrt CO₂-belasteten Strom. Ihre Versorgungsstrategie beruht auf der trügerischen Hoffnung, Strom könne immer importiert werden. Dies wird immer weniger der Fall sein, denn Deutschland legt in Kürze seine restlichen Kernkraftwerke still und will auch aus der Kohle aussteigen, und Frankreich plant die Reduktion des Nuklearstromanteils.

Damit ist die schweizerische Stromversorgungssicherheit immer weniger gewährleistet. Dies ist gravierend angesichts der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Risiken länger dauernder Strommängel. Ohne Strom läuft bekanntlich nichts.

Der Ersatz der Kernenergie erfordert nicht nur genügend neue erneuerbare Energieproduktion, sondern auch den Aus- und Umbau des Stromsystems. Insbesondere benötigt die Netzintegration der fluktuierenden Stromerzeugung aus Fotovoltaik und Wind zwingend einen massiven Ausbau der Saisonspeicherung durch Vergrößerung der Stauseen sowie Netzanpassungen, vor allem auf der Verteilnetzebene. Auch die Bewältigung dieser Herausforderungen ist noch nicht einmal ernsthaft angegangen worden.

All dies macht deutlich: Die Substitution nuklear erzeugter Bandenergie durch Fotovoltaik und Wind ist energiewirtschaftlich alles andere als sinnvoll. Und sie ist auch für Klima und Umwelt nachteilig, wie die von den maßgeblichen Forschungsinstituten PSI und Empa für die verschiedenen Stromerzeugungstechnologien ermittelten Technologieindices zeigen. Einzig die Wasserkraft ist bezüglich des spezifischen Treibhausgasausstoßes vorteilhafter als die Kernenergie. Wer es ernst meint mit dem Klimaschutz, der muss die weitere Nutzung der Kernenergie und gleichzeitig den Ausstieg aus den fossilen Energien fordern. Die bestehenden Kernkraftwerke sollen so lange weiter betrieben werden, als sie sicher sind und dann durch neue fortgeschrittene Anlagen ersetzt werden. Dies ist nicht nukleare Nostalgie, sondern eine sachlich begründete Forderung, trotz der weiterhin zu erwartenden politischen Widerstände.

Die Kernenergie muss weiterhin eine Säule der schweizerischen Energieversorgung sein, zusammen mit der Energieeffizienz und den erneuerbaren Energien. Mit ihr kann der Umbau des Energiesystems von den fossilen zu den erneuerbaren Energien nicht nur wesentlich wirtschaftlicher, sondern auch ökologischer realisiert werden.

Der Verfasser des vorliegenden Sachbuchs ist ein ausgezeichnete Strahlenschutz-Fachmann und Kenner der Energieszene. Ich bin ihm sehr dankbar für den Beitrag, den er – im Interesse der Energieversorgung und des Klimaschutzes – zur dringend notwendigen Versachlichung der Diskussion um die Kernenergie leistet.

Kirchlindach bei Bern
im April 2019

Dr. rer. pol. Eduard Kiener, Dipl. Ing. ETHZ
ehemaliger Direktor des Schweizer Bundesamtes
für Energie von 1977 bis 2001

Vorwort

Die griechische Mythologie berichtet, wie Prometheus den Göttern das Feuer stahl. Zeus bestrafte ihn dafür, indem er ihn im Kaukasusgebirge an einen Felsen schmieden ließ. Regelmäßig kam ein Adler und fraß von seiner Leber, die danach stets wieder nachwuchs. Schließlich befreite ihn Herakles und erlöste ihn von seiner Pein. Pandora – von Hephaistos auf Weisung von Zeus aus Lehm geschaffen – sollte die Strafe der Menschheit sein für das gestohlene Feuer. Von Zeus erhielt sie die berühmte Büchse der Pandora, jedoch mit der strikten Weisung, diese nicht zu öffnen. Aus Neugierde tat sie es dennoch und es entwichen der Büchse alle Übel, Laster und Untugenden der Welt. Von da an eroberte das Schlechte die Welt. Übrig blieb lediglich die Hoffnung.

Das Feuer, oder das Verbrennen, ist eine exotherme Redoxreaktion, bei der Energie in Form von Licht und Wärme frei wird. Es bietet Vorteile für uns, birgt aber auch große Gefahren. Der Mensch nutzt das Feuer bereits seit einer Million Jahren. Vor 80 Jahren entdeckt er die Kernspaltung und macht sich seither auch diese zunutze. Man könnte die Kernenergie als das zweite Feuer bezeichnen, mit ebenfalls großen Vorteilen, aber noch größeren Risiken und Gefahren als das erste Feuer. Ist sie auch eine Buchse der Pandora?

Der Mensch, neugierig und innovativ wie er ist, hat sich auch dieses zweite Feuer angeeignet, mit all seinen Vorteilen, aber auch Gefahren und Risiken. Wie beim ersten Feuer musste er lernen (und ist immer noch dabei) diese Energiequelle so zu zähmen, dass sie ihm mehr Nutzen als Schaden bringt [209].

Ein solcher Lernprozess ist lang und verläuft nicht ohne Fehlschläge und Pannen. Die Geschichte lehrt uns auch, dass der Mensch nie auf eine neue

Entdeckung, eine neue Technologie, verzichtet hat, weil diese ihm zu gefährlich erschien. Es liegt in der menschlichen Natur, dass es für ihn immer eine Herausforderung ist, neue Errungenschaften zu beherrschen und nutzbar zu machen. Diese Freiheit ist eine wesentliche Triebkraft menschlichen Handelns und die Neugierde ist größer als die Angst vor etwas Unbekanntem.

Die Entdeckung der Kernspaltung im Jahre 1938 ermöglichte die technische Nutzung der – wie sie die Physiker nennen – starken Wechselwirkung. Diese ist die weitaus größte der vier Grundkräfte¹ der Natur, denn sie muss Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhalten. Sie ist weit stärker als die abstoßende Coulomb-Kraft zwischen den positiv geladenen Protonen im Atomkern und verhindert, dass dieser auseinanderfällt.

Bei der Kernspaltung wird nicht mehr die chemische – also die atomare – Bindungsenergie genutzt wie bei der Verbrennung, sondern die rund eine Million Mal stärkere Bindungsenergie der Protonen und Neutronen im Atomkern. Daher erzeugt ein Gramm schwach angereichertes Uran, so wie es in einem Leichtwasserreaktor verwendet wird, bei der Spaltung rund 100.000-mal mehr Energie als das Verbrennen von einem Gramm Steinkohle.

Mit der Entdeckung der Kernspaltung erschloss sich der Mensch eine neue, bis dahin ungenutzte Energiequelle die sowohl zur Produktion von Elektrizität durch Kernreaktoren, aber auch für Kernwaffen verwendet werden kann.

Die erste Anwendung waren die Atombomben, die während des Zweiten Weltkrieges zur Zerstörung der japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki eingesetzt wurden und Hunderttausenden Menschen Gesundheit oder gar das Leben kosteten. Die Kernenergie bleibt somit für immer mit der apokalyptischen Vision einer Atombombenexplosion verbunden. Leider kam es auch bei der friedlichen Anwendung der Kernspaltung zu Unfällen oder gar zu Katastrophen mit erheblichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Die Reaktorkatastrophe von Fukushima hat schließlich in Staaten wie der Schweiz und Deutschland zum Entscheid geführt, ganz aus der Nutzung der Kernenergie zur Energieerzeugung auszusteigen.

Der Klimawandel, verursacht durch den Ausstoß von CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger, und die damit einhergehende Ressourcen-

¹Die vier Kräfte der Natur sind die Gravitation, die elektromagnetische Kraft, die starke und schwache Wechselwirkung. Die Stärke der ersten beiden nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab, dagegen haben die beiden andern eine extrem kurze Reichweite im Bereich von Femtometern (10^{-15} m) oder gar noch kleiner. Relativ zur starken Wechselwirkung ist die elektromagnetische Kraft hundertmal geringer, die schwache Wechselwirkung ist um etwa 15 Zehnerpotenzen kleiner, die Gravitation gar um rund 40 Größenordnungen. Die Physiker konnten bereits zwei der Kräfte - die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung - in einer Kraft, der elektro-schwachen, vereinen. Man hofft, mit der *Grand Unified Theory* (GUT) auch die starke Kraft sowie mit der *Theory of Everything* (ToE) auch noch die Gravitation in ein einziges Modell integrieren zu können.

verknappung haben uns die Notwendigkeit einer Energiewende vor Augen geführt. Unsere Wirtschaft muss sich aus der Abhängigkeit von fossilen Brenn- und Treibstoffen befreien. Um das CO₂-Budget der Klimafachleute einzuhalten, müssen wir den CO₂-Ausstoß innerhalb einer Generation auf null reduzieren. Andernfalls werden wir es nicht schaffen, die Erwärmung der Erde bei 2 °C aufzuhalten. Viele Fachleute bezeichnen den Klimawandel denn auch als die größte Herausforderung, mit der die Menschheit je konfrontiert war. Es geht um drei Hauptziele:

- Energie- und Rohstoffverbrauch senken und Stoffe systematisch rezyklieren
- Freisetzung von CO₂ und anderer anthropogener Schadstoffe und Treibhausgase drastisch senken
- Anpassung an eine durch den Klimawandel veränderte (Um-)Welt

Die entscheidende Frage ist, wo die Prioritäten zu setzen sind: Beim Ausstieg aus den fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Gas oder beim Ausstieg aus der Kernenergie?

Dieses Buch möchte aufzeigen, dass der Ausstieg aus den fossilen Energieträgern angesichts der realen Bedrohung durch den Klimawandel oberste Priorität haben sollte. Die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energiequellen mit der erforderlichen Stabilität und Versorgungssicherheit, braucht Zeit. Beim Übergang in eine CO₂-neutrale Energieversorgung kann die Kernenergie nützlich sein, denn sie trägt zur Versorgungssicherheit und Diversifizierung der Elektrizitätsversorgung bei. Wir müssen auch berücksichtigen, dass eine Reduktion beim Verbrauch fossiler Energien zu einem erheblichen Mehrbedarf an Strom z. B. für Elektromobilität und für Wärmepumpen bei der Gebäudeheizung führen wird. Die Kernenergie ist damit auf absehbare Zeit eine sinnvolle Ergänzung zu den volatilen neuen, erneuerbaren Energien aus Photovoltaik und Windkraft.

Die Kernenergie ist keine größere Gefahrenquelle als die Energiegewinnung aus fossilen Brenn- und Treibstoffen oder die fast ausschließlich auf fossilen Energieträgern basierende individuelle Mobilität. Insbesondere sind die Auswirkungen der Kernenergie auf Mensch und Umwelt deutlich geringer als jene der Kohle-Verstromung. So unglaublich dies erscheinen mag, dieser Vergleich mit der Kohle stimmt auch noch nach Tschernobyl und Fukushima.

Bei den Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima hat nicht die Technik versagt, sondern der Mensch. Selbstverständlich bleibt die Kernenergie nur dann eine beherrschbare Technologie, wenn die Anlagen regelmäßig gewartet, geprüft und nachgerüstet werden und die Sicherheitskultur – aber

auch die Notfallvorsorge – auf einem Niveau sind, das dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht.

Die Energiewende bedingt Investitionen in die Energieforschung und -entwicklung in allen Bereichen. Neben Kernenergie und Kernfusion gehören dazu der Ausbau der Stromnetze, Methoden zur Stromspeicherung, intelligente Stromnetze und die Planung einer CO₂-freien Zukunft bei Industrie, Mobilität, Gebäudeheizung und Warentransport. Damit einher gehen müssen selbstverständlich auch Bestrebungen, die nukleare Sicherheit wie jene aller technischen Einrichtungen weltweit laufend zu verbessern.

Der Autor ist der Meinung, dass wir uns nicht im Streit für oder gegen die Kernenergie die Köpfe einschlagen sollten, sondern uns gemeinsam den Herausforderungen des Klimawandels stellen und eine wirksame Strategie zum raschen Ausstieg aus den fossilen Brenn- und Treibstoffen entwickeln sollten. Er möchte mit diesem Buch zur Versachlichung der Energie- und Klimadebatte, aber auch der Diskussion um die Kernenergie, beitragen. Die Herausforderungen, vor der wir heute stehen, bewältigen wir nur durch ein gemeinsames und lösungsorientiertes Vorgehen aller Länder und Gesellschaften, mit einer aktiven Beteiligung von Wissenschaft, Politik und Wirtschaft.

Freiburg/Schweiz
im September 2019

Hansruedi Völkle

Erklärung

Der Verfasser legt Wert darauf, dass er die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst hat, dass diese seine persönliche Meinung darstellt, und dass er von keiner Seite weder ideell noch materiell beeinflusst, unterstützt oder gefördert wurde. Wörtliche oder sinngemäß verwendete Textteile, Grafiken oder Bilder sind entsprechend als Zitate mit Quellenangabe kenntlich gemacht. Die Aussagen und Meinungen in diesem Buch basieren auf dem derzeitigen Wissensstand. Dieser ändert sich rasch, insbesondere in den Bereichen Umwelt, Klima und Energie, ebenso auch deren Wahrnehmung durch Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit. Gewisse Aussagen und Folgerungen dieses Buches sind in diesem Sinne zu relativieren und bedürfen gegebenenfalls der Aktualisierung.

Literatur

1. Prêtre S (2005) Die Domestizierung des zweiten Feuers. <http://www.second-fire.ch/publications/publications.htm>. Zugegriffen: 6. Sept. 2019

Danksagung

Mein Dank geht an Sébastien Delabays für das Cartoon in Kap. 9 und für die Hilfe beim Erstellen der Grafiken, an Frau Dr. Sybille Estier vom Bundesamt für Gesundheit für das Bereitstellen von Rohdaten für die Abbildungen in den Kap. 1 und 2 und vor allem an die Lektorin Frau Vera Palmer, den Springer-Verlag, Frau Dr. Lisa Edelhäuser und ihr Team für die Möglichkeit, dieses Buch zu veröffentlichen.

Zehn Kernthesen

Das Buch präsentiert Fakten und Argumente zur Diskussion über die nachfolgend aufgelisteten zehn Kernthesen.

1. Die Kernenergie ist sicherer als viele andere Technologien

Wie jede Technologie ist die Kernenergie unter gewissen Voraussetzungen beherrschbar und kann sicher genutzt werden. Bei den meisten Pannen und Unfällen, wie das Tschernobyl und Fukushima erneut bestätigt haben, versagte nicht die Technik, sondern der Mensch. Voraussetzung für einen sicheren Betrieb ist die Einhaltung höchster Sicherheitsanforderungen. Sicherheitskultur beginnt bereits bei Konzeption und Bau einer Anlage, erstreckt sich über die gesamte Betriebsdauer und betrifft auch Entsorgung und Rückbau.

2. Internationale Sicherheitskonzepte tragen wesentlich zur Zuverlässigkeit und Akzeptanz der Kernenergie bei

Viele Pannen und Unfälle sind auf menschliches Versagen und Fehlverhalten zurückzuführen. Was bei der Zivilluftfahrt schon lange Stand der Technik ist, sollte daher auch auf die Kernenergie angewendet werden. Bei der Luftfahrt werden nämlich alle Vorkommnisse, Störfälle und Unfälle systematisch analysiert, nicht um die Schuldigen zu ermitteln und zu bestrafen, sondern um daraus die Lehren zu ziehen und die Sicherheit laufend zu verbessern. Ein internationaler und offener Erfahrungsaustausch könnte auch bei der Nutzung der Kernenergie das Sicherheitsniveau weltweit angleichen und verbessern.

Hierzu bedarf es internationaler Behörden mit entsprechenden Kompetenzen, Normen und Regeln sowie regelmäßiger Sicherheitsüberprüfungen durch neutrale Experten gemäß entsprechenden Checklisten. Diese Expertenberichte sind uneingeschränkt zu veröffentlichen und die nationalen Bewilligungs- und Aufsichtsbehörden haben dafür zu sorgen, dass die in den Berichten beanstandenden Mängel von den Betreibern innerhalb gesetzter Frist behoben werden.

3. Die Kernenergie verursacht nur geringe Emissionen

Die Auswirkungen der Kernenergie auf Mensch und Umwelt sind bei bestimmungsgemäßem Betrieb unerheblich; bei Unfällen können sie jedoch verheerend sein. Dies bedingt eine hohe Sicherheitskultur und entsprechende Notfallmaßnahmen.

Das Problem der radioaktiven Abfälle ist eine große Herausforderung. Zur Lösung ist ein sozio-politischer Entscheidungsprozess unter Einbezug aller Stakeholder und in internationaler Zusammenarbeit unabdingbar. Die Notwendigkeit einer nachhaltigen und sicheren Entsorgung gilt jedoch nicht nur für radioaktive Abfälle, sie betrifft alle anthropogenen Schadstoffe und Rückstände.

4. Ein Ausstieg aus den fossilen Energieträgern ist temporär nicht ohne Kernenergie umsetzbar

Der Stromverbrauch beträgt zwar heute nur gerade ein Viertel des Energieverbrauchs, er wird aber massiv zunehmen, wenn die Verwendung fossiler Energien reduziert wird. Es ist die Frage, ob sich dieser Mehrbedarf ohne Kernenergie decken lässt – erst recht, wenn einige Länder auf eine weitere Nutzung der Kernenergie verzichten. Die Kernenergie wird es uns erleichtern die Energiewende und damit den Ausstieg aus der CO₂-Wirtschaft rasch zu vollziehen, denn dieser wird zu einem massiven Anstieg beim Strombedarf führen. Für die Übergangszeit können Abscheidung und Speicherung von CO₂ zwar nützlich sein; sie sind jedoch auf die Dauer keine nachhaltige Lösung.

5. Die Kernenergie bleibt konkurrenzfähig

Das volatile Angebot von subventioniertem Wind- und Sonnenstrom, der zeitweise im Überfluss anfällt, jedoch bislang nicht in großem Ausmaß gespeichert werden kann, führt zu einer Verzerrung des Europäischen Strommarktes, wie wir ihn bisher kannten. Der Strompreis darf aber nicht zum Gegenstand von Spekulationen werden. Wenn das zeitweilige

Überangebot an mit Steuergeldern subventioniertem grünem Strom unter Preis ins Ausland verkauft wird, sollte man das Konzept überdenken.

Da Versorgungssicherheit und Netzstabilität ihren Preis haben, sollte der Konsument über den Strompreis auch für die Transport- und Rohstoffpreise (Wasserzinsen, Kohle, Öl-, Gas- und Uranpreis) aufkommen sowie für alle Sekundärkosten wie Bau, Erneuerung und Unterhalt der Infrastruktur und mindestens anteilmäßig auch für Ausbau und Ertüchtigung der Stromnetze in Richtung Smart Grid. Weiter sollten die Energiepreise auch zu den folgenden Bereichen einen Beitrag leisten: Forschung für neue Energiequellen, für Stromspeicherung, Sicherheit und Notfallschutz sowie für die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Mobilität und einen CO₂-armen Warentransport.

6. Der Klimawandel ist eine ernsthafte Bedrohung für unsere und für die kommenden Generationen

Möglicherweise ist der Klimawandel gar die größte Herausforderung in der Geschichte der Menschheit. Damit unser Planet auch in Zukunft noch für die Menschheit bewohnbar bleibt, muss unsere Wirtschaft den CO₂-Ausstoß in spätestens einer Generation auf null reduzieren. Zu warten, bis die Öl- und Gasreserven der Erde aufgebraucht sind, was bereits in ein bis zwei Generationen der Fall sein dürfte, wäre unklug. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines raschen Ausstiegs aus den fossilen Brenn- und Treibstoffen. Eine Gesellschaft ohne fossile Brenn- und Treibstoffe muss somit das Hauptziel sein.

7. Die größte Herausforderung ist ein CO₂-freier Personenverkehr und Gütertransport

Verkehr und Warentransport auf Straße, Wasser und Luft basieren fast ausschließlich auf fossilen Treibstoffen, verursachen ein Drittel der CO₂-Emissionen und verbrauchen 60 % des Erdöls. Verkehr und Warentransport sind zudem auch mehrheitlich für die Belastung der Umwelt mit Abgasen und Schadstoffen verantwortlich, was gemäß WHO weltweit mehrere Millionen Tote pro Jahr fordert. Zusätzlich fordert der Straßenverkehr insgesamt jedes Jahr 1,35 Mio. Unfallopfer².

²Gemäß WHO sterben jährlich weltweit 1,35 Mio. Menschen bei Verkehrsunfällen (NZZ vom 07.12.2018). Dazu sagt der WHO-Direktor Tedros Adhanom Ghebreyesus «Das ist ein inakzeptabler Preis, den wir für die Mobilität zahlen.» [3].

Die Befreiung der individuellen Mobilität und des Gütertransports von den fossilen Energien wird zu einem massiven Mehrbedarf beim Strom führen. In der Schweiz dürfte allein die Umstellung des privaten Autoverkehrs auf Elektroautos den Verbrauch an elektrischer Energie um mindestens ein Drittel erhöhen. Dieser Mehrbedarf lässt sich durch Strom aus Wind und Sonne erst decken, wenn das Problem der Stromspeicherung großtechnisch gelöst wird.

8. Eine europaweite Zusammenarbeit bei der Energieversorgung ist wichtiger als nationale Alleingänge

Europa wächst wirtschaftlich, politisch und sozio-kulturell immer stärker zusammen. Das schafft zwar eine gegenseitige Abhängigkeit, ermöglicht aber auch eine Zusammenarbeit in vielen Bereichen und stärkt die Solidarität und damit die Stellung Europas im globalen Rahmen. Es erleichtert zudem den Austausch von Waren, Energie und Dienstleistungen innerhalb Europas.

Allerdings sind Rohstoffhandel und damit auch die Preise von Öl, Treibstoffen, Gas, Kohle und den anderen Rohstoffen immer mehr in den Händen der ölproduzierenden Länder oder von multinationalen Konzernen und entziehen sich meist staatlichem Einfluss.

9. Unsere Zukunft muss nachhaltig sein

Zum 1. Januar 2016 hat die UNO die UN Sustainable Development Goals in Kraft gesetzt. Sie bestehen aus 17 Hauptzielen, ergänzt durch zahlreiche Unterziele und einem Zeitplan für deren Umsetzung. Diese Ziele sollen bis 2030 verwirklicht sein. Sie betreffen alle Länder der Erde, alle Bereiche unserer Gesellschaft und jeden einzelnen von uns. Alle Staaten wurden von der UNO gleichermaßen aufgefordert, die drängenden Herausforderungen der Welt gemeinsam anzugehen.

10. Globalisierung muss auch politisch und sozio-kulturell sowie unter Berücksichtigung der Menschenrechte umgesetzt werden

Die Globalisierung ermöglicht eine praktisch unbegrenzte Mobilität, den weltweiten Austausch von Rohstoffen, Waren und Produkten jeglicher Art, aber auch von Informationen und Daten, von technischem Know-How, von Wissen und Bildung oder von medizinischer Versorgung. Was damit nicht Schritt gehalten hat, sind entsprechende Regeln für die Zusammenarbeit der Länder, Gesellschaften, Kulturen und Menschen.

Die Nachhaltigkeitsziele der UNO und deren Unterziele umfassen daher auch die Themenbereiche Menschenrechte, Solidarität und respektvolles Verhalten, Gleichberechtigung und Selbstbestimmung – ganz besonders für

der Frauen – Schutz der Kinder, stabile demokratische Strukturen, Schutz der Umwelt und der natürlichen Ressourcen. Was wir anstreben sollten, ist eine Welt im Sinne des Küng'schen Weltethos³, mit einem Codex von religionsneutralen Verhaltensgrundsätzen sowie von Wert- und Moralvorstellungen, die auf philosophisch-humanistischen Ansätzen, auf den Menschenrechten und auf gegenseitigem Respekt und Vertrauen aufbauen.

Literatur

2. Stiftung Weltethos https://www.weltethos.org/was_ist_weltethos/. Zugegriffen: 20 Juli 2019
3. Verkehrstote <https://www.nzz.ch/panorama/jedes-jahr-135-millionen-verkehrstote-weltweit-ld.1442748>. Zugegriffen: 31 Aug. 2019

³«Eine Weltepoche, die anders als jede frühere geprägt ist durch Weltpolitik, Welttechnologie, Weltwirtschaft und Weltzivilisation, bedarf eines Weltethos.» Hans Küng, 1993 [2]

Inhaltsverzeichnis

1	Das Spiel mit dem Feuer	1
1.1	Die Entdeckung der Uran-Spaltung	1
1.2	Entwicklung, Bau und Test von Kernwaffen	5
1.3	Überwachung der Umweltradioaktivität	12
1.4	Die Genfer Konferenz «Atoms for Peace»	15
1.5	Die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung	15
	Literatur	18
2	Folgen nuklearer Tätigkeiten	21
2.1	Hiroshima und Nagasaki	21
2.2	Kernwaffen-Testgelände und Folgen der Kernwaffenversuche	24
2.3	Andere Unfälle und Zwischenfälle mit Radioaktivität	28
2.4	Die Reaktorunfälle von Tschernobyl und Fukushima	35
2.5	Die Auswirkungen der Katastrophe von Tschernobyl	39
2.6	Die Folgen der Reaktorkatastrophe von Fukushima	47
2.7	Maßnahmen nach Tschernobyl und Fukushima	51
	Literatur	53
3	Die Kernenergie als Herausforderung	57
3.1	Strahlenexposition in der Umgebung von Kernkraftwerken	58
3.2	Kinderleukämie in der Umgebung von Kernkraftwerken	63
3.3	Strahlenexposition der Mitarbeitenden in Kernkraftwerken	69

3.4	Zukünftige Nutzung der Kernenergie: Die Reaktorgenerationen I bis IV	72
3.5	Entsorgung radioaktiver Abfälle	77
3.6	Nuklearterrorismus, Sabotage und Cyberkriminalität	88
3.7	Strahlenangst und Risikowahrnehmung	93
	Literatur	98
4	Wie gefährlich ist ionisierende Strahlung?	103
4.1	Einleitende Bemerkungen	104
4.2	Physikalische Betrachtungen	105
4.3	Die Antwort der Zelle auf Strahlung	121
4.4	Risiko-Projektions-Modelle	129
4.5	Dosis-Wirkungs-Beziehung	131
4.6	Risikofaktoren	134
4.7	Epidemiologische Studien	144
4.8	Abschließende Betrachtungen	149
	Literatur	151
5	Mit welchen Risiken leben wir?	155
5.1	Risiken der Technik und Risikowahrnehmung	156
5.2	Die Kohleverstromung in Europa	165
5.3	Die PSI-Studie zu den Risiken der Stromerzeugung	167
5.4	Risiken durch Naturkatastrophen und Epidemien	170
5.5	Risiken der globalen Erwärmung	172
	Literatur	176
6	Aussteigen oder die Sicherheit verbessern?	179
6.1	Aus der Kernenergie aussteigen oder weitermachen?	181
6.2	Ist die Kernenergie eine Bedrohung für uns?	184
6.3	Die ethische Frage bei der Kernenergie	186
6.4	Die nukleare Sicherheit muss verbessert werden	188
6.5	Gesetzgebung zu Nuklearen Sicherheit	192
6.6	Qualitätsmanagement und Sicherheitskultur	195
6.7	Dienstleistungen der IAEA im Bereich nukleare Sicherheit	198
	Literatur	201
7	Notfallvorsorge und Bewältigung von Unfällen	205
7.1	Nukleare Sicherheit allein genügt nicht	206
7.2	Sechs Handlungsfelder	208
	Literatur	216

8 Die Kernenergie angesichts von Klimawandel und Energiekrise	219
8.1 Die Notwendigkeit der «Entkarbonisierung»	220
8.2 Der Klimawandel: reelle Bedrohung oder nur Hypothese?	222
8.3 Nachhaltige Entwicklung ist der Schlüssel für unsere Zukunft	226
8.4 Die UNO-Klimakonferenzen und wie weiter?	230
8.5 Energieerzeugung und Ressourcenverknappung	234
8.6 Versuch einer Stromprognose für die Schweiz im Jahr 2035	249
8.7 Intelligente Stromnetze, Stromspeicherung und CCS	254
8.8 Forschung zur Planung unserer Zukunft	256
Literatur	259
9 Wie weiter?	265
9.1 Die Büchse der Pandora	265
9.2 Unsere Verantwortung für den Planeten Erde	267
9.3 «Aber wehe, wehe, wehe! Wenn ich, auf das Ende sehe!»	270
9.4 Am Schluss bleibt (noch) die Hoffnung	271
Literatur	272
Weiterführende Literatur	273
Stichwortverzeichnis	277

Über den Autor



Hansruedi Völkle, geboren am 10. Mai 1946 in Winterthur (Schweiz), wuchs in Andelfingen/ZH auf. Nach der Maturität Typus A im Jahr 1967 am Collège St-Michel in Freiburg/Schweiz studierte er Physik an der dortigen Universität. Er schloss 1973 mit dem Diplom ab und wurde wissenschaftlicher Mitarbeiter am Labor in Freiburg der Eidgenössischen Kommission zur Überwachung der Radioaktivität (KUER). Nach dem Reaktorunfall Tschernobyl von 1986 wurde das Labor als Sektion in die Abteilung Strahlenschutz des Schweizer Bundesamtes für Gesundheit (BAG) in Bern integriert. Von 1983 bis 2005 war Völkle Leiter dieses Labors und ab 1987 Sektionschef.

Völkle promovierte 1980 bei Professor Otto Huber in Physik mit den Spezialgebieten Kernphysik und Strahlenschutz (Health Physics), wurde 1996 habilitiert (PD) und 2001 zum Titularprofessor ernannt. Von 1996 bis 2016 unterrichtete er an der Universität Freiburg in den Fächern Strahlenschutz, Kernphysik, Physik der Elementarteilchen und Astrophysik. In den Jahren 2007 bis 2016 war er zudem verantwortlicher Leiter des Bachelor-Studienprogrammes in Umweltwissenschaften.

Als Leiter des Sektion Überwachung der Radioaktivität war Völkle verantwortlich für die Koordination des nationalen Programmes zur Überwachung der Umweltradioaktivität des BAG und Redaktor der entsprechenden Jahresberichte. Von 1989 bis 1992 war er Mitglied des Direktoriums des Deutsch-Schweizerischen Fachverband für Strahlenschutz (FS) und ist seit 2007 im Redaktionskomitee von dessen Fachzeitschrift *StrahlenschutzPraxis*. Von 1987 bis 2005 leitete er die Arbeitsgruppe Strahlenschutz der Deutsch-Schweizerischen Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen (DSK); er war von 2002 bis 2005 Mitglied der entsprechenden Französisch-Schweizerischen Kommission (CFS). Völkle war 2006 bis 2010 Präsident der Freiburger Naturforschenden Gesellschaft und ist seit 1997 Redakteur von dessen Bulletin. Während seiner Tätigkeit für die Eidgenössische Kommission zur Überwachung der Radioaktivität und für das BAG betreute er Diplom-, Master- und Doktorarbeiten sowie Praktikanten an der Universität Freiburg. Er ist Autor bzw. Mitautor von rund 180 Publikationen und Fachbeiträgen im Bereich Strahlenschutz, Umweltradioaktivität und Strahlenmesstechnik.

Abkürzungsverzeichnis

Aktiniden	Gruppe von chemischen Elementen von Actinium (Ordnungszahl 89) bis Lawrencium (Ordnungszahl 103)
Albedo	Maß für das Rückstrahlvermögen (Reflexionsstrahlung) von diffus reflektierenden, also nicht selbstleuchtenden Oberflächen
ALL	Akute lymphatische Leukämie
AM	Air Mass (Luftmasse). Gibt bei den Standardbedingungen für Solarzellen an, wie viele Luftmassen der Erde das Sonnenlicht durchqueren muss. Bei diesen Standardbedingungen beträgt der Wert 1,5 AM, da die Sonne meist nicht senkrecht auf die Solarpanel auftrifft.
AML	Akute myeloische Leukämie
Apoptose	Programmierter Zelltod; von außen angeregt oder als zell-interner Prozess. Im Gegensatz zur Nekrose wird er von der Zelle selbst durchgeführt ohne Schädigung des Nachbargewebes.
ASN	Aviation Safety Network
b (barn)	Barn. Mass für den Wirkungsquerschnitt bei Kernreaktionen; $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$
BAFU	Schweizer Bundesamt für Umwelt
BAG	Schweizer Bundesamt für Gesundheit
BEF	Schweizer Bundesamt für Energie
BEIR	National Academy of Sciences Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Eine von der US-amerikanischen Akademie der Wissenschaften gebildete Arbeitsgruppe aus Medizinern und Physikern, die sich mit den Gesundheitsrisiken von ionisierenden Strahlen im Niedrigdosisbereich befasst und in unregelmäßigen Abständen Berichte veröffentlicht.
BFS	Schweizer Bundesamt für Statistik

BRICS	Die Länder Brasilien, Russland, Indien, China, Südafrika
Bq	Bq (Bequerel) ist die Maßeinheit für die Radioaktivität. 1 Bq entspricht einem Zerfall pro Sekunde.
CDR	Carbon Dioxide Removal
CFS	Commission Franco-suisse de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection
Ci	Ci (Curie) ist die alte Einheit für die Radioaktivität, $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
CI	Konfidenz-Intervall (auch Vertrauensbereich oder Erwartungsbereich); bei Statistiken das Intervall, dass mit der gegebenen Wahrscheinlichkeit die wahre Lage des betreffenden Parameters einschließt
CLL	Chronische lymphatische Leukämie
CML	Chronische myeloische Leukämie
CO ₂ -Äquivalent	Angaben der Emissionen von Treibhausgasen, umgerechnet in einen CO ₂ -Ausstoß, der die gleichen Auswirkungen auf das Klima hat
CODIRPA	Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation d'urgence radiologique
COP21	Conference of Parties, beim Klimaprogramm der UNO; die COP21 fand in Paris statt.
COPD	Chronic obstructive pulmonary disease
CCS	Carbon Capture and Storage
CTBT	Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty. Umfassendes Kernwaffenstopp-Abkommen, ist aber immer noch nicht in Kraft (1996)
CTBTO	Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organisation
DALY	Disability-Adjusted Life Years Lost
DDREF	Dose and Dose Rate Effectiveness Factor
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DSB	Doppelstrangbruch bei Chromosomen
DSK	Deutsch-Schweizerische Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen
EIR	Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung (Schweiz) 1960–1988
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ENEA	European Nuclear Energy Agency
ENSI	Eidgenössisches Nuklearinspektorat. Schweizer Aufsichtsbehörde für die Kernanlagen (hieß früher HSK)
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
EPR	European Pressurized Reactor; ein Kernreaktor der Generation III+
ERR	Excess Relative Risk

e	Elementarladung: $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ C; Ladung eines Elektrons
e^+ , e^-	Symbol für Elektron bzw. Positron
eV	Elektronenvolt. Energieeinheit der Kernphysik, $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ As. 1 eV ist die Energie eines Elektrons, das mit einer Spannung von 1 V beschleunigt wurde.
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe; werden als Treibgase, Kältemittel und Lösungsmittel verwendet
f (Femto)	Präfix für 10^{-15}
FS	Fachverband für Strahlenschutz: Strahlenschutzfachgesellschaft von Deutschland und der Schweiz
G (Giga)	Giga, Präfix für 10^9
GuD	Gas- und Dampf-Kombikraftwerk
GWh	Gigawatt-Stunden. Energieeinheit, $1 \text{ GWh} = 3,6 \text{ TJ}$
Gy	Gray. Einheit für die absorbierte Dosis (Energiedosis)
HAA	Hoch aktiver (radioaktiver) Abfall
HFC	Halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HR	Homologous Recombination bei der DNA-Reparatur
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (Schweiz), heute ENSI
HWZ	Halbwertszeit, auch $T_{1/2}$ (radioaktiver Zerfall)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IATA	International Air Transport Association
IARC	International Agency for Research in Cancer
ICAN	International Campaign to Abolish Nuclear Weapons
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICRP	International Commission for Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measure- ment
INES	International Nuclear Event Scale. Dienstleistung der IAEA, Wien/A
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPAS	International Physical Protection Advisory Service. Dienstleistung der IAEA, Wien/A
IRPA	International Radiation Protection Association
IRRS	International Regulatory Review Service. Dienstleistung der IAEA, Wien/A
Isotope	Atome mit gleicher Protonen- oder Ordnungszahl, aber unter- schiedlicher Massenzahl (d. h. sie haben unterschiedlich viele Neutronen), z. B. ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C
J (Joule)	Joule, SI-Einheit für die Energie, $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ Nm}$
K (Kelvin)	Absolute Temperatur (über dem absoluten Nullpunkt von $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$)

XXVIII Abkürzungsverzeichnis

KEG	Schweizer Kernenergiegesetz vom 21.03.2003
KEV	Schweizer Kernenergieverordnung vom 10.12.2004
keV	Kilo-Elektronvolt. Energieeinheit in der Kernphysik, $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$
KI	Kalium-Iodid; (Vorbeugende) Gabe von KI-Tabletten bei einem Strahlenunfall; durch Sättigung der Schilddrüse mit inaktivem Jod wird vermieden, dass diese in einer Unfallsituation radioaktives Jod aufnimmt.
KKW	Kernkraftwerk; oft wird auch der Term Atomkraftwerk benutzt, der aber aus Sicht der Physik nicht korrekt ist, da hier nicht die atomaren Bindungsenergie genutzt wird, sondern die viel stärkere Kernbindungsenergie.
Kollektivdosen	Summe der Strahlendosen einer von einem Ereignis direkt betroffenen Bevölkerungsgruppe; wird auch bei beruflich strahlenexponierten Personen gebraucht; Einheit ist das Personen-Sv (früher auch Man-Sievert)
KomABC	Eidgenössische Kommission für ABC-Schutz (Schweiz)
KSR	Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz (Schweiz). Sie entstand 2001 aus der Fusion der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz (EKS) und der Eidgenössischen Kommission für die Überwachung der Radioaktivität (KUER).
kt	Kilotonne. Maß für die Sprengkraft von Kernwaffen im Vergleich zu konventionellem Sprengstoff; $1 \text{ kt} = 1000 \text{ Tonnen TNT-Äquivalent}$
KUER	Eidgenössische Kommission zur Überwachung der Radioaktivität (Schweiz), 1956–1986
kWh	Kilowattstunde. Energieeinheit: $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ J}$
LCE	Low Carbon Economy
LET	Linear Energy Transfer. Maß für die Energiedeposition pro Einheit der Weglänge in Materie von ionisierender Strahlung; meist in $\text{keV}/\mu\text{m}$
LD ₅₀	Semi-Letaldosis. Dosis, bei der 50 % Überlebenschance bestehen
LD ₁₀₀	Letaldosis; kein Überlebenschance
LNT	Linear No Threshold Hypothesis bei der Strahlenwirkung
m (Milli)	Präfix für 10^{-3}
M (Mega)	Präfix für 10^6
Morbidität	Erkrankungshäufigkeit einer Population (bezüglich einer Ursache)
Mortalität	Sterblichkeit oder Sterberate einer Population (bezüglich einer Ursache)
MOX	Mischoxid-Brennelemente (mit Beimischung von Pu)

MW _{th}	Mega-Watt, thermische Leistung einer Wärmekraftmaschine z. B. KKW
MW _{inst}	Mega-Watt, installiert Leistung z. B. einer Windkraftanlage
MW _e	Mega-Watt, elektrische Leistung einer Wärmekraftmaschine, z. B. KKW
N (Newton)	Einheit für die Kraft; 1 N = 1 kgm/s ²
n	Symbol für das Neutron
n (Nano)	Präfix für 10 ⁻⁹
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NEA	Nuclear Energy Agency
NFSV	Verordnung über den Notfallschutz in der Umgebung von Kernanlagen (Schweiz)
Nekrose	Zerfall einer oder mehrere Zellen. Die Nekrose ist pathologisch, also krankhaft; es kommt zu Entzündungsreaktionen und Schäden bei Nachbargewebe.
NHEJ	Non Homologous End Joining bei der DNA-Reparatur
NIR/NIS	Non Ionizing Radiation/Nicht-ionisierende Strahlung
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
NPT	Non Proliferation Treaty, Vertrag über die Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen, Spaltstoffen und dem entsprechenden Know-How
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OPERRA	Open Project for European Radiation Research Area
OR	Odds Ratio (bei Fallkontrollstudien)
OSART	Operational Safety Review Team. Dienstleistung der IAEA, Wien/A
OSPAR	Oslo-Paris Convention. Vertrag zum Schutz der Nordsee und des Nordatlantiks (vor allem vor der Meeresversenkung radioaktiver Abfälle)
p	Symbol für das Proton
p (Pico)	Präfix für 10 ⁻¹²
Personen-Sv	Einheit für die Kollektiv-Dosis: Summe der Dosen der Individuen einer exponierten Population
PFC	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
ppm	Parts per million; auch ppmv, 1 ppmv = 1/1000 Volumenprozent
PSI	Paul Scherrer Institut (Schweiz)
PTBT	Partial Test Ban Treaty. Abkommen zum Stopp der Kernwaffentests in der Atmosphäre, im Weltraum und in den Meeren
PTSD	Post Traumatic Stress Disorder: Posttraumatische Belastungsstörung
RERF	Radiation Effects Research Foundation (Japan, USA)

XXX Abkürzungsverzeichnis

RNA	Ribonukleinsäure
RR	Relative Risk (bei Kohortenstudien)
ROS	Reactive Oxygen Species: Reaktive Sauerstoffradikale haben in hoher Konzentration schädliche Auswirkungen und führen zu oxidativem Stress.
SIN	Schweizerisches Institut für Nuklearforschung, Villigen/AG
SMA	Schwach und mittelaktive (radioaktive) Abfälle
SSB	Single-Strand-Break bei Chromosomen
StFV	Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Schweiz)
StSV	Schweizerische Strahlenschutzverordnung vom 26.04.2017
Sv (Sievert)	Dosiseinheit für die Äquivalent- und effektive Dosis. $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ Organ oder Gewebe
TEPCO	Tokyo Electric Power Company, Betreiber des Kernkraftwerks Fukushima
$T_{1/2}$	Halbwertszeit, auch HWZ radioaktiver Substanzen
T (Tera)	Präfix für 10^{12}
TJ	Terajoule, Energieeinheit; $1 \text{ TJ} = 10^{12} \text{ J} \approx 278.000 \text{ kWh}$
Transurane	Chemische Elementen mit Ordnungszahlen größer als 92 (d. h. größer als die des Urans)
TTBT	Threshold Test Ban Treaty, Abkommen zur Begrenzung von Kernwaffenversuchen auf 150 kt TNT-Äquivalent
TWh	Terawattstunde. Energieeinheit $1 \text{ TWh} = 3600 \text{ TJ}$
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Schweiz)
UNEP	United Nations Environment Programme
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
W (Watt)	Physikalische Einheit für die Leistung; $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WHO	World Health Organisation
WMO	World Meteorological Organisation
w_R	Strahlen-Wichtungsfaktor bei der Umrechnung von absorbierter Dosis (Gy) (Energiedosis) in Organ-Äquivalentdosis (Sv)
w_T	Gewebe-Wichtungsfaktor zur Berechnung der effektiven Dosis (Sv) aus den gewichteten Organ-Äquivalentdosen der einzelnen Organe und Gewebe
YOLL	Years of Life Lost
ZWILAG	Zwischenlager Würenlingen, Schweiz

Griechische Buchstaben

α (Alpha)	Alpha-Teilchen (Heliumkern, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen, 2 positive Ladungen), wird beim radioaktiven Alpha-Zerfall emittiert
β (Beta)	Beta-Teilchen (Elektron e^- oder Positron e^+ , eine negative oder eine positive Ladung), wird beim radioaktiven Beta-Zerfall emittiert oder eingefangen beim sogenannten K-Einfang (Electron capture)
γ (Gamma)	Gamma-Strahlung ist hochenergetische elektromagnetische Strahlung, die beim radioaktiven Zerfall aus dem Kern emittiert wird (im Gegensatz zur Röntgenstrahlung, die zwar von der gleichen Natur ist, aber aus der Elektronenhülle des Atoms kommt)
ε (Epsilon)	Symbol für den K-Einfang beim β -Zerfall benutzt
η (Eta)	Wirkungsgrad, z. B. beim Carnot-Prozess einer Wärmekraftmaschine
ϑ (Theta)	Streuwinkel beim Comptoneffekt
λ (Lambda)	Zerfallskonstante [s^{-1}]; $\lambda = \ln 2 / HWZ$; $\ln 2 \approx 0,693$
κ (Kappa)	Wahrscheinlichkeit bei dem Paarbildungseffekt
μ (Micro)	Präfix für 10^{-6} . μ wird auch für den linearen Schwächungskoeffizienten verwendet
ν (Nü)	Symbol für das Neutrino, ein elektrisch neutrales Elementarteilchen mit sehr geringer Masse
π (Pi)	Kreiszahl; $\pi \approx 3,141$ Symbol für das Pi-Meson
ρ (Rho)	Dichte [g/cm^3]
σ (Sigma)	Wirkungsquerschnitt bei Kernreaktionen mit der Maßeinheit b (Barn) Wahrscheinlichkeit beim Comptoneffekt Stefan-Boltzmann-Konstante: $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

XXXII**Griechische Buchstaben** τ (Tau)

Mittlere Lebensdauer eines radioaktiven Isotopes

Wahrscheinlichkeit beim Photoeffekt

Symbol für ein Elementarteilchen

 φ (Phi)Teilchenfluss von ionisierender Strahlung [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$] ψ (Psi)Energiefluss von ionisierender Strahlung [$\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]



1

Das Spiel mit dem Feuer

Die Entdeckung der Kernspaltung erschloss der Menschheit eine neue Energiequelle. Leider blieb es nicht bei der «friedlichen Nutzen», denn im August 1945 wurden die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki durch Atombomben zerstört.

Bis in die 90er-Jahre kam es in der Folge zu einem Wettrüsten der Großmächte. Während des kalten Krieges wurde das nukleare Waffenarsenal in Ost und West zu einer permanenten, gegenseitigen Bedrohung, zu einem labilen Gleichgewicht des Schreckens.

Mit der Genfer Konferenz «Atoms for Peace» von 1955 trat die Kernenergie als neuer Prozess der Energiegewinnung in den Vordergrund, zunächst begrüßt mit großer Euphorie, die dann später in vielen Ländern einer kritischen Einstellung oder gar einer Ablehnung Platz machte.

Kernspaltung, Radioaktivität und ionisierende Strahlung haben heute zahlreiche Anwendungen in Forschung, Medizin und Technik. Möchten wir wirklich darauf verzichten?

1.1 Die Entdeckung der Uran-Spaltung

Die Kernspaltung wurde am 17. Dezember 1938 durch die deutschen Wissenschaftler Otto Hahn (1879–1968) und Fritz Strassmann (1902–1980) entdeckt. In ihrem Labor am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem beschossen sie Uran mit Neutronen und stießen dabei unerwartet auf das Element Barium. Lise Meitner (1878–1968), eine

österreichische Physikerin, fand zusammen mit ihrem Neffen Otto Frisch (1904–1979) die wissenschaftliche Erklärung. In einer Veröffentlichung in der Zeitschrift *Nature* [14] beschreibt sie, wie der Urankern durch die Neutronenanregung in zwei Teile zerfällt, denn beim Experiment von Hahn und Strassmann war Barium (^{140}Ba) eines der entstandenen Bruchstücke. Diese Reaktion setzt große Energiemengen frei und emittiert zusätzlich ein bis drei Neutronen, die dann weitere Urankerne zur Spaltung anregen. So entsteht eine sich selbst erhaltende, nukleare Kettenreaktion, die Energie erzeugt. Für diese durch thermische Neutronen¹ induzierte Kernspaltung eignen sich nur drei Isotope:

- ^{235}U , das heute nur noch 0,72 % des Natur-Urans ausmacht; die restlichen 99,28 % bestehen aus dem Isotop ^{238}U . Für Leichtwasserreaktoren muss ^{235}U auf drei bis vier Prozent angereichert werden; für die Verwendung in Atombomben ist eine Anreicherung auf 80 % oder mehr erforderlich.
- ^{239}Pu , das in der Natur nur in winzigen Mengen vorkommt und in Brutreaktoren aus ^{238}U hergestellt werden muss.
- ^{233}U , das in der Natur ebenfalls nicht vorkommt und nur im Brutreaktor erzeugt werden kann, in diesem Fall jedoch aus dem ^{232}Th .

Die Kernspaltung mit thermischen Neutronen ist bei diesen drei Isotopen deshalb möglich, weil deren Neutronenzahl ungerade ist (Abb. 1.1). Das letzte Neutron ist nur schwach gebunden und vermindert die Stabilität des Kerns. Ein einfallendes Neutron regt diesen zum Schwingen an, was schließlich zum Zerplatzen in zwei Bruchstücke führt. Gewisse schwere Kerne können auch spontan spalten, mit allerdings geringerer Wahrscheinlichkeit.

Otto Hahn² wurde 1944 für seine Entdeckung mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet, jedoch ohne Lise Meitner und seinen Assistenten Fritz Strassmann. Frau Meitner wurde in der Nobelpreis-Präsentation lediglich durch Professor Arne F. Westgren (1889–1975) erwähnt.

¹Thermische Neutronen sind langsame, freie Neutronen mit kinetischer Energie unter 0,1 eV; bei Raumtemperatur ist $E_{\text{kin}} = (3/2)k_{\text{B}}T_{\text{abs}} \approx 0,039$ eV. Hier ist k_{B} die Boltzmannkonstante und T_{abs} die absolute Temperatur in Kelvin (K).

²Dass sich Otto Hahn der Tragweite seiner Entdeckung durchaus bewusst war, ist einer Aussage von Lise Meitner zu entnehmen: «Hahns folgenreichste Leistung ist zweifellos die Entdeckung der Uran-spaltung, die zur Erschließung einer fast unerschöpflichen Energiequelle mit sehr eingreifenden Anwendungsmöglichkeiten – zum Guten oder Bösen – geführt hat. Wie sehr Hahn die Beschränkung auf friedliche Ausnutzung der Atomenergie am Herzen liegt, geht aus vielen seiner Reden und Vorträge hervor.» [13].