

Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 112 (2023)

Artikel: Ist ein sicherer Betrieb von Kernkraftwerken möglich?

Autor: Völkle, Hansruedi

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1046531>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ist ein sicherer Betrieb von Kernkraftwerken möglich?

HANSRUEDI VÖLKLE
CH-1700 Freiburg

Die Sicherheit bei der Stromgewinnung mittels Kernenergie ruht im Wesentlichen auf fünf Pfeilern: Die technische Sicherheit der Kernanlagen, die Sicherheitskultur beim Betrieb der Anlagen, die Aufsicht durch die Behörden, der Notfallschutz und schließlich die sichere Endlagerung der dabei entstehenden radioaktiven Abfälle. Der Text gibt einen Überblick über die einzelnen Elemente, die für die Sicherheit ausschlaggebend sind. Nebst der nuklearen Sicherheit sind dabei auch weitere Kriterien zu berücksichtigen, wie etwa die Auswirkungen auf Menschen und Umwelt, der Material- und Landbedarf, der Strompreis, die Energiedichte, die Nachhaltigkeit sowie, wie lang die verfügbaren Brennstoffreserven noch reichen.

La sûreté de la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire repose essentiellement sur cinq piliers : la sûreté technique des centrales nucléaires, la culture de sûreté lors de l'exploitation des centrales, la surveillance par les autorités, les mesures de protection pour le cas d'urgence et enfin le stockage sûr des déchets radioactifs qui en résultent. Le texte donne un aperçu des éléments individuels qui sont cruciaux pour la sécurité. Outre la sûreté nucléaire, d'autres critères doivent également être pris en compte, tels que l'impact sur l'homme et l'environnement, les besoins en matériaux et en terrains, les coûts pour la production de l'électricité, la densité énergétique, la durabilité et la durée des réserves de combustible disponibles.

The safety of generating electricity from nuclear energy rests essentially on five pillars: the technical safety of the nuclear plants, the safety culture when operating the plants, supervision by the authorities, emergency response and finally the safe disposal of the resulting radioactive waste. The text provides an overview of the individual elements that are crucial for safety. In addition to this, other criteria must also be considered, such as the impact on people and the environment, material and land requirements, the price of electricity, energy density, sustainability and how long the available fuel reserves will last.

Vorbemerkungen

Sicherheit ist immer relativ: Reisen im Flugzeug ist sicherer als Reisen im Auto; in der Bahn ist es noch sichere als im Flugzeug. Am sichersten wäre es, immer zu Hause zu bleiben, obwohl auch hier Unfälle passieren. Auf die Dauer ist dies nicht praktikabel, denn es würde es uns im täglichen Leben allzu sehr einschränken, etwa für die Berufsausübung, für Schule und Ausbildung, bei den sozialen Kontakten, beim Einkaufen, bei Kultur, Sport, Freizeit, Ferien und dergleichen.

Komplexe technische Anlagen wie Kernkraftwerke haben ein hohes Energie- aber auch Gefahrenpotential. Deren sichere Nutzung ist nur dann möglich, wenn höchste Sicherheitsanforderungen erfüllt werden und alle bei Auslegung, Projektierung, Bau, Betrieb und Aufsicht Beteiligten ihre Verantwortung ernst nehmen. Der Nutzen, den der Betrieb einer solchen Anlage erbringt, ist somit in Bezug zu setzen zu den Risiken für Mensch und Umwelt.

Bei diesen Überlegungen ist davon auszugehen, dass ein Risiko Null nicht möglich ist. Das Risiko von Kernenergiestrom ist demnach zu vergleichen mit demjenigen der Stromproduktion aus anderen Energiequellen. Nebst der technischen Sicherheit sind eine Reihe weiterer Kenngrößen zu evaluieren, dazu gehören:

- Die Auswirkungen auf Menschen und Umwelt, sowohl bei Normalbetrieb als auch bei Stör- und Unfällen;
- die CO₂-Emission bei Bau, Brennstoffgewinnung, Betrieb und Rückbau;
- der Rohstoffverbrauch für Bau, Betrieb, Rückbau und die Entsorgung der Abfälle, sowie bei Materialien und Rückständen, ob eine Wiederverwertung möglich ist;
- der Platz- und Flächenbedarf für Anlage, Betrieb und Brennstoffgewinnung;
- die Stromkosten, wobei auch der Aufwand für Stromspeicherung, Rückbau und Entsorgung der Abfälle einzubeziehen ist;
- die Nachhaltigkeit des gesamten Stromerzeugungsprozesses;
- wie lange die heute und in naher Zukunft verfügbaren Brennstoffreserven reichen;
- die angestrebte Betriebsdauer und Amortisationszeit bis zur Stilllegung der Anlage;
- die politisch-gesellschaftliche Akzeptanz und technische Machbarkeit;
- die Auslandsabhängigkeit, respektive der Wunsch oder die Notwendigkeit des jeweiligen Landes für eine autarke (i.e. eine vom Ausland unabhängige) Energieversorgung.

Vom Konzept her entspricht jede technische Einrichtung oder Anlage immer dem Knowhow und dem wissenschaftlich-technischen Stand zur Zeit von Projektierung und Bau. Technische Fortschritte, sowie neue Erkenntnisse

und Entwicklungen kann sie nicht vorwegnehmen. Zwar ist es möglich die meisten Komponenten einer Anlage – dies gilt mit Ausnahme des Reaktordruckgefäßes auch für auch Kernkraftwerke – im Laufe der Betriebszeit zu erneuern oder auszuwechseln. Da von der Konzeption her eine Anlage jedoch immer auf dem technischen Stand aus der Zeit der Projektierung bleibt, wird sie irgendwann veraltet sein und ein Weiterbetrieb ist dann nicht mehr wirtschaftlich. Wenn beispielsweise bei einer Dampflok alle Komponenten ausgewechselt werden, ist sie zwar wieder eine fabrikneue Dampflok, basiert aber nach wie vor auf Technologie, Sicherheit und Effizienz aus der Zeit des frühen 20. Jahrhunderts.

Um dies so weit als möglich zu berücksichtigen, wurden die Schweizer Kernkraftwerke der Generation II seit dem Bau kontinuierlich betriebs- und sicherheitstechnisch nachgerüstet und modernisiert. Mit dieser Anpassung an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sollen die Anlagen für eine Betrieb von 60 bis 70 und mehr Jahren fit und sicher gemacht werden. Man könnte sie demnach als Generation II+ bezeichnen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass Störfälle und Unfälle zu einem großen Teil auf menschliches Versagen oder Fehlverhalten zurückzuführen sind. Beispielsweise beträgt dieser Anteil bei Verkehrsunfällen fast 90 Prozent. Zu menschlichem Fehlverhalten kann es schon bei Planung, Konzeption und Bau einer Anlage kommen, oder bei der Auswahl der geeigneten Materialien und Technologien. Weitere Ursachen sind mangelhafter Unterhalt der Anlage, Nicht-Einhalten von Arbeitsvorschriften und Checklisten, fehlende oder unvollständige Durchführung von Sicherheitsüberprüfungen, Mängel bei der Umsetzung von erforderlichen Maßnahmen und Nachrüstungen und dergleichen. Menschliches Fehlverhalten auf verschiedenen Ebenen – also bei der Konzerneleitung, den Behörden und bei der Regierung – war denn auch die Ursache der beiden Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima.¹ Beide hätten vermieden werden können, wenn elementarste Sicherheits- und Compliance-Regeln eingehalten worden wären.

¹Auf der sieben-stufigen INES-Skala, der *International Nuclear Event Scale* der IAEA, wurden beide Reaktorkatastrophen mit der höchsten, also der Stufe 7, bewertet. Der Unfall im Versuchskernkraftwerk im waadtländischen Lucens am 29.1.1969 wurde im Nachhinein mit Stufe 4 bis 5 beurteilt (Siehe dazu Bulletin der Freiburger Naturforschenden Gesellschaft Nr. 110 (2022), p. 31 ff).

Die wesentlichen Sicherheitselemente bei Kernkraftwerken¹

Die Sicherheit von Kernkraftwerken basiert auf fünf Pfeilern; diese werden in den folgenden 5 Kapiteln erläutert und sind in der Tabelle 4.1 zusammengefasst. Für einen sicheren Betrieb von Kernkraftwerken sind die im Folgenden aufgelisteten, nuklearen Schutzziele zu erfüllen, dabei ist die Anwendung sowohl des Mehr-Barrieren-Grundsatz² als auch der in die Tiefe gestaffelten Verteidigungsprinzipien (Defence in Depth³) essenziell.

1. Die nukleare Kettenreaktion⁴ muss jederzeit gestoppt werden können; es darf also weder zu einer unkontrollierten Kritikalität (*i.e. einer sich selbst erhaltenen, nuklearen Kettenreaktion*) noch zu einer Leistungsexkursion des Reaktors (*Anstieg der Reaktorleistung über die Auslegungsgrenze*) kommen;
2. Der Reaktor muss immer gekühlt⁵ werden können; es darf also weder zu einer Überhitzung noch zu einer Zerstörung des Reaktors (*beispielsweise durch eine Kernschmelze infolge Überhitzung*) kommen;
3. Die Radioaktivität muss immer eingeschlossen⁶ und von der Umgebung

¹Die Informationen in diesen Abschnitten sind den Vorträgen des Themen-Apéro des Carnot-Cournot Netzwerkes (CCN: <https://www.c-c-netzwerk.ch>) vom 3. Mai 2023 in Basel entnommen. Dieser bestand aus drei Vorträgen: Prof. em. HORST-MICHAEL PRASSER: *Aktuelle und zukünftige KKW-Technologien*; Dr. JOHANNIS NÖGGERATH: *Sicherheit von Kernkraftwerken* und Dr. MARKUS HÄRING: *Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz*.

²Zur Erläuterung des Mehr-Barrieren-Systems am Beispiel des Kernbrennstoffes: Der Kernbrennstoff ist in fester, oxydischer Form; er befindet sich in dicht verschweißten Hüllrohren; das Reaktordruckgefäß ist aus dickwandigem Spezialstahl; der «biologische Schild» ist eine Betonkammer; die druckfeste Sicherheitshülle ist aus Stahl; das Reaktorgebäude ist aus meterdickem, armiertem Beton.

³Defence in Depth kommt aus der militärischen Strategie und bezeichnet ein mehrschichtiges und fehlertolerantes Abwehrsystem, indem beim Versagen einer Ebene, die jeweils nächsthöhere aktiv wird, und einen Ausfall des gesamten Systems verhindert.

⁴Reaktoren, bei denen Leichtwasser sowohl Moderator als auch Kühlmittel ist, haben einen negativen, so genannten Void- oder Dampfblasenkoeffizient. Dies bedeutet, dass bei einem Kühlmittelverlust auch die Funktion des Wassers als Moderator – zum Abbremsen der Neutronen auf thermische Energien – reduziert wird. Damit kommt die nukleare Kettenreaktion zum Erliegen. Reaktoren vom Tschernobyl-Typ mit Grafit als Moderator hatten dagegen einen positiven Void-Koeffizienten; bei Kühlmittelverlust steigt die Leistung an, was dann 1986 zur Reaktorkatastrophe Tschernobyl führte.

⁵Zur Kühlung – auch zur Abführung der Nachzerfallswärme, wenn der Reaktor bereits abgeschaltet ist – wird Wasser benötigt, sowie Pumpen für dessen Umwälzung und Strom für den Betrieb dieser Pumpen. Wenn das Werk keinen eigenen Strom erzeugt, muss dieser vom Netz oder von Diesel-Notstromgeneratoren bezogen werden können.

⁶Falls es durch eine Havarie zum Druckanstieg im Sicherheitsgebäude kommt, muss dieser Überdruck – um zu vermeiden, dass das Sicherheitsgebäude beschädigt wird – über die gefilterte Druckentlastung (Venting) abgelassen werden können. Dabei wird durch die Filter ein großer Anteil der Radioaktivität (außer Edelgasen und gasförmigem Jod) zurück-

- ferngehalten werden (*i.e. Dictheit nach außen*);
4. Übergeordnetes Schutzziel, aus den Schutzz Zielen 1 bis 3 abgeleitet: Es darf zu keiner unzulässigen Bestrahlung von Menschen (*sowohl beim Betriebspersonal als auch der in der Umgebung wohnenden Bevölkerung*) und Umwelt kommen. Die Ableitungen von Radioaktivität über Abluft und Abwasser im Normalbetrieb sind zu überwachen und zuhanden der Behörden zu bilanzieren. In der Umgebung der Anlagen ist, unter Aufsicht der Behörden, ein umfangreiches Messprogramm zur Überwachung von Radioaktivität und Strahlung durchzuführen.

Technische Sicherheit der Anlagen

Jede technische Anlage, sei das eine Eisenbahn, ein Flugzeug, eine Brücke, eine Staumauer oder auch ein ganzes Kraftwerk braucht, um deren Sicherheit und Funktionstüchtigkeit zu gewährleisten, regelmäßige Wartung, Funktions- und Sicherheits-Kontrollen und gegebenenfalls Nachrüstungen. Dabei geht es um folgendes:

1. Störfälle, aber auch schon geringe Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb, ausgelöst etwa durch Verschleiß, Abnutzung, Materialermüdung oder Versagen einzelner Komponenten sind zu vermeiden;
2. die Anlage ist so weit als möglich dem Stand der technischen Entwicklung anzupassen und gegebenenfalls sicherheitstechnisch nachzurüsten;
3. Erfahrung aus dem Betrieb ähnlicher Anlagen sind zu berücksichtigen, etwa durch regelmäßigen Erfahrungsaustausch mit Betreibern ähnlicher Anlagen, sowie mit den Aufsichtsbehörden und Herstellern der Reaktoren;
4. Störungen und Schäden als Folge von menschlichem Fehlverhalten sind so weit als möglich zu vermeiden; dies erfordert eine weitgehende Automatisierung von Überwachung und Steuerung, ergänzt durch eine hohe technische Fehlertoleranz der Anlage.

Bei Kernkraftwerken ist die konsequente Anwendung des Mehrfachbarrieren- und des Fail-Safe-Prinzips sicherheitsrelevant, ebenso die Mehrfachredundanz, Diversität sowie die räumliche Trennung aller sicherheitsrelevanten Systemstränge und schließlich ein Stahl-Containment und ein Sicherheitsgebäude aus bewehrtem Beton. Zur Beherrschung von Störfällen braucht es: Notkühl-

systeme, Einrichtungen zur katalytischen Knallgas-Rekombination,¹ eine ge-

¹Die Hüllrohre der Brennstäbe bestehen aus einer Zirconium-Legierung. Bei einem schweren Störfall mit Kernschmelze reagiert diese bei Temperaturen > 1000 °C mit dem

filtrerte Druckentlastung (Venting); Reaktoren der Generation III haben zusätzlich Auffangwannen für geschmolzenen Kernbrennstoff (Core Catcher).

Die Internationale Atomenergieagentur in Wien (IAEA) bietet für ihre Mitgliederstaaten Sicherheitsüberprüfungen von deren Kernanlagen durch neutrale Experten an. Solche Expertisen (OSART-Missionen) ergeben für die Betreiber eine neutrale Außensicht und eine Bewertung ihrer Anlagen im Vergleich zum dem, was internationaler Stand von Wissenschaft und Technik ist. Sie zeigen eventuelle Schwachstellen beim Technischen und bei Betriebsabläufen auf. Sie ermöglichen dadurch eine kontinuierliche Verbesserung und Ertüchtigung von Anlage und Betrieb und damit auch von deren Sicherheit. Es obliegt dann dem Betreiber und den jeweiligen Behörden, dafür zu sorgen, dass die von den Experten vorgeschlagenen Verbesserungen auch umgesetzt werden. Die Reaktorkatastrophe in der Anlage von Fukushima-Daiichi, ausgelöst am 11.3.2011 durch einen Tsunami, hätte wahrscheinlich vermieden werden können, wenn dort solche OSART-Missionen durchgeführt und die sich daraus ergebenden Verbesserung umgesetzt worden wären (beispielsweise Hochwasserschutz, Venting, H₂-Rekombination, Notkühlung, ...).

Sicherheitsaspekte für neuere Reaktorgenerationen

Bei der Weiterentwicklung von Kernreaktoren wird eine zusätzliche Verbesserung der Sicherheit angestrebt. Dabei werden insbesondere auch die Erfahrungen aus den weltweit bis heute kumulierten fast 20'000 Jahren Betrieb von Kernkraftwerken, sowie die Auswertungen von Störfällen und Unfällen berücksichtigt. Einige der hier umgesetzten Grundsätze sind die folgenden:

- *Autarkie*: Gemeint ist die Entkopplung und auch die Unabhängigkeit von einer (funktionsbereiten) Notstromversorgung und/oder von massiv gebunkerten Notstrom-Dieselgeneratoren;
- *Autonomie*: Gemeint ist das Ausschalten des « Faktor Mensch » als große Fehlerquelle – soweit dies möglich ist;
- *Robustheit*: Gemeint ist, Kernschäden und Freisetzung von Radioaktivität sollen voneinander entkoppelt sein; dies bedeutet, dass eine Beschädigung des Reaktorkerns nicht gleich eine Freisetzung von Radioaktivität zur Folge hat;
- Ein starker *Schutz vor externen Einwirkungen*, etwa durch Naturereignisse, aber auch gegen Sabotage oder terroristische Aktionen;
- Durch diese Maßnahmen sollen die *Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelze* von 5×10^{-5} pro Jahr bei Reaktoren der Generation II+ auf 5×10^{-6}

umgebenden Wasserdampf und es kommt zur Bildung von Wasserstoff. Zur Vermeidung einer Knallgasexplosion (Entzündung eines H₂-O₂-Gemisches) haben moderne Reaktoren Anlagen zur katalytischen Wasserstoffrekombination.

pro Jahr für Reaktoren der Generation III und III+ erhöht werden, für jene der Generation IV und folgende gar bis gegen 10^{-7} pro Jahr.

Reaktoren der Generation III, als Weiterentwicklung der Generation II+, basieren auf der Anwendung von passiven und inhärenten Auslegungskriterien. Dadurch wird erreicht, dass der Reaktor die Akutphase eines schweren Störfalles ohne Eingriffsnotwendigkeit des Personals selbst beherrscht und, dass die Unfallfolgen auf die Anlage selbst beschränkt bleiben. Die Wahrscheinlichkeit einer großen, frühen Freisetzung (LERF: Large Early Release Frequency) von Radioaktivität soll auf einmal in 10 Millionen Jahren gesenkt werden. Weitere Sicherheitselemente sind: Passive, schwerkraftinduzierte Wasserkühlung zur Evakuierung der Nachzerfallswärme, unterstützt durch Verdampfung und Kondensation und ein großes Containment-Volumen für einen langsamem Ablauf der Erwärmungsprozesse; flugzugabsturzsicheres Doppelcontainment; Core-Catcher zum sicheren Einfang der Kernschmelze; räumlich getrennte, geschützte Sicherheitssysteme und weitere passiv-inhärente Merkmale.

In den letzten Jahren ist immer mehr von den kleinen, modularen Reaktoren die Rede, den so genannten *Small and Modular Reactors*.¹ Deren wichtigsten Vorteile gegenüber den bisherigen Reaktortypen sind:

- Die Vereinfachung der Konstruktion;
- Die Integration von ursprünglich externen Komponenten in den Reaktor;
- Die Begrenzung der Abmessungen des Primärkreislaufes, was eine Fertigung im Herstellerwerk und eine vormontierte Anlieferung ermöglicht;
- Die Vereinfachung des Sicherheitssystems, was mehr passive Sicherheit zulässt;
- Die Modularisierung, was eine Standardisierung von Komponenten und eine einfache Typenzulassung zulässt;
- mehrere Reaktoren können gewisse Systeme und Komponenten gemeinsam nutzen, wie etwa das Containment, die Brennstoffversorgung, die Abfallentsorgungssysteme, die Sicherheitseinrichtungen, sowie die Nebensysteme wie Ventilation, Abgassysteme, Wasser- und Kühlmittelaufbereitung und Energieumwandlung (Turbine, Generator und Transformatoren);
- weiter wird ein stufenweiser Ausbau möglich und damit eine günstigere und zeitlich gestaffelte Finanzierung;

¹Die IAEA hat dazu eine ausführliche Schrift publiziert: *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. IAEA; Vienna 2020; <http://aris.iaea.org>

- die Möglichkeit der Brennstoffumladung während des Betriebs der anderen Reaktoren ermöglicht einen flexibleren Betrieb.

Sicherheitskultur im Betrieb

Auch in den heute hochautomatisierten, fehlertoleranten Kernkraftwerken ist der Mensch immer noch die größte Fehlerquelle.¹ Der Sicherheitskultur und dem Betriebsklima kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Diese beginnt bereits bei Auswahl und Ausbildung der Mitarbeitenden, ergänzt durch regelmäßiges Training, etwa für Reaktoroperatoren in Simulatoren, ähnlich wie bei den Piloten der Luftfahrt. Aber auch die Instandhaltung der Anlagen erfordert große Kompetenz und Verantwortungsübernahme. Für die Sicherheitskultur unerlässlich sind ein Qualitätsmanagementsystem mit einer Zertifizierung der einzelnen Arbeitsprozesse, sowie die Analyse und Dokumentierung sämtlicher Vorkommnissen und Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb. Aus dieser können dann Maßnahmen zur laufenden technischen und betrieblichen Verbesserung von Anlage und Sicherheit abgeleitet und umgesetzt werden.

In der Terminologie des Qualitäts-Managements wird das Wort «Fehler» vermieden, stattdessen spricht man von « Nicht-Konformitäten ».² Beispielsweise, wenn Arbeitsschritte oder Kontrollen abgekürzt oder nicht so durchgeführt werden, wie sie in den Zertifizierungsprotokollen vorgeschrieben sind, oder wenn Anlageparameter nicht innerhalb des Wertebereichs für den bestimmungsgemäßen Betriebs liegen. Die Erfahrung zeigt, dass sowohl zu wenig als auch zu viel Routine zu Nicht-Konformitäten führen kann. Deshalb müssen Arbeitsprozesse und Kontrollen genau beschrieben und nach Checklisten abgearbeitet werden, bei wichtigen Tätigkeiten gar durch zwei Personen, also unter Anwendung des Vier-Augen-Prinzips. Die Sicherheitskultur erfordert von allen Mitarbeitenden, von der Betriebsleitung bis zum Reinigungspersonal, ein hohes Qualitäts- und Verantwortungsbewusstsein; eine respektvolle Betriebskultur, die Anerkennung durch die Vorgesetzten und eine angemessene

¹ Am eklatantesten ist dies im Straßenverkehr: Nahezu 90 Prozent aller Unfälle mit Personenschaden sind auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen: Nicht-Beherrschen des Fahrzeugs; nicht-Einhalten von Verkehrs vorschriften; nicht der Situation angepasste Geschwindigkeit; Mangel beim Unterhalt der Fahrzeuge, etc. <https://www.dekra.de/de/hohes-unfallrisiko-durch-den-faktor-mensch/>. Gemäss der WHO sterben weltweit jedes Jahr 1.3 Millionen Menschen durch Verkehrsunfälle und 20 bis 50 Millionen werden verletzt. <https://www.who.int/news-room/detail/road-traffic-injuries>

² Nichtkonformität (Synonym: Nichtübereinstimmung) bedeutet das Nicht-Erfüllen einer Anforderung; das Gegenteil wäre Konformität. Erstere kann sowohl in Prozessen als auch an Produkten auftreten. Folglich können nicht konforme Verfahren, wie z. B. das nicht ordnungsgemäße Management der Qualitätskontrolle oder die Nichteinhaltung einer Verfahrensanweisung zu Nichtkonformitäten führen. <https://safetyculture.com/de/themen/nichtkonformitaet/>

Entlöhnung tragen dazu ganz wesentlich bei.

Die Zivilluftfahrt gilt als Beispiel einer Technologie, bei der durch systematische Untersuchung aller Zwischenfälle die Sicherheit im Laufe der letzten Jahrzehnte deutlich verbessert werden konnte, wie dies aus Abb. 4.1 ersichtlich ist.

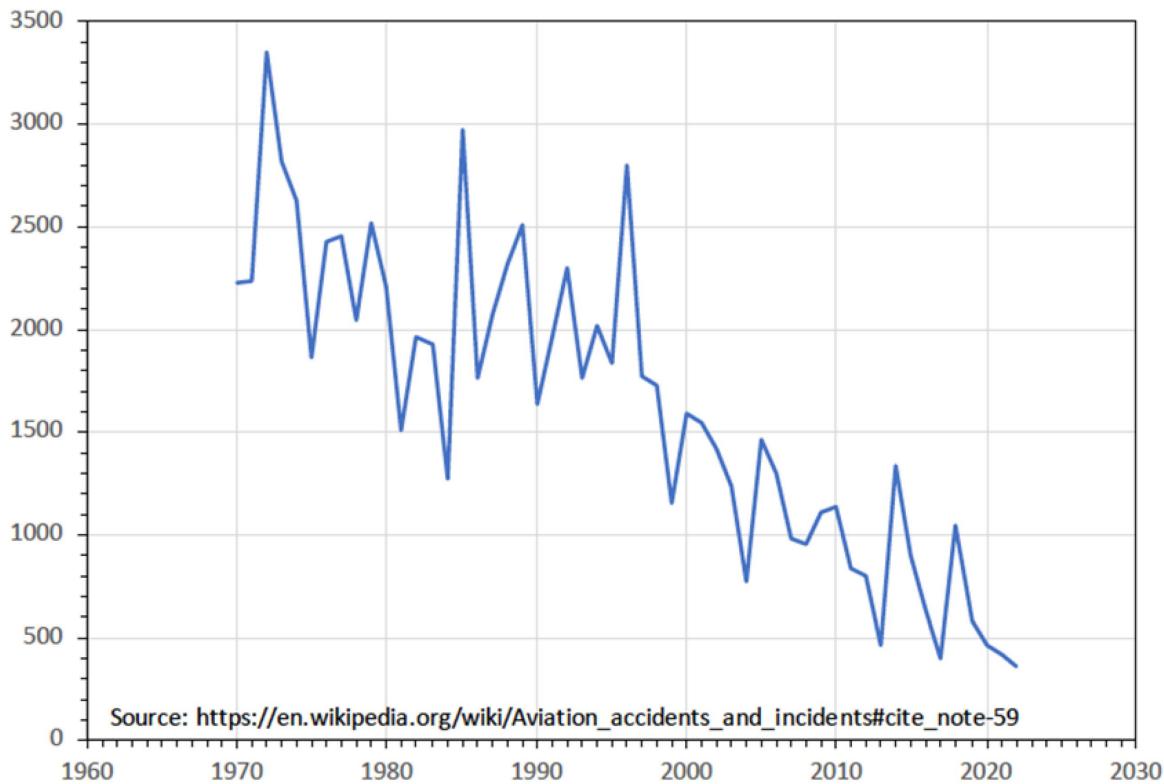


Abbildung 4.1: Anzahl Todesfälle in der Zivilluftfahrt weltweit von 1970 bis 2022. Die systematische Untersuchung aller Unfälle und Zwischenfälle und die Umsetzung der sich daraus jeweils ergebenden Maßnahmen und Verbesserungen hat die Zahl der Todesfälle in der Zivilluftfahrt deutlich reduziert.

Die Rolle der Bewilligungs- und Aufsichtsbehörde

Ein weiteres, wichtiges Sicherheitselement ist die Rolle der Behörde, in der Regel eine Bewilligungsbehörde, welche den Bau und den Betrieb genehmigt und – davon unabhängig – eine Aufsichtsbehörde, die den Betrieb überwacht. In der Schweiz ist Letztere das ENSI, das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat. Dieses kontrolliert, ob die in der Bewilligung vorgegebenen Auflagen erfüllt und die entsprechenden Gesetze, Verordnung und Richtlinien – auch bezüglich Arbeitsschutz bei den Mitarbeitenden – eingehalten sind und somit ein sicherer Betrieb gewährleistet ist. Die Aufsichtsbehörde führt regelmäßig unabhängige Inspektionen und Kontrollen in und um die Anlage

durch, begutachtet u.a. Nachrüstungsmaßnahmen und bewilligt oder verweigert das Anfahren der Anlage.

Für diese wichtige Aufgabe muss die Behörde einerseits fachlich kompetent sein und andererseits politisch und wirtschaftlich unabhängig, und vor allem darf sie nicht korrumptierbar sein. Zum Anlagenbetreiber soll ein offenes, kollegiales Vertrauensverhältnis bestehen, jedoch kein « Klüngel ». Beispielsweise ist es Pflicht einer Aufsichtsbehörde dafür zu sorgen, dass die aus Expertisen durch Experten der IAEA und Sicherheitsüberprüfungen abgeleiteten Auflagen und Verbesserung fristgerecht umgesetzt werden.

Der Notfallschutz

Da keine Sicherheit hundertprozentig ist und Stör- und Unfälle nie ganz ausgeschlossen werden können, ist ein entsprechender Notfallschutz für die heutigen Anlagen erforderlich. Am Notfallschutz sind alle wichtigen Akteure zu beteiligen. Regelmäßige, auch grenzüberschreitende, Notfallübungen dienen zur Funktionsprüfung und Ertüchtigung aller Prozesse des Notfallschutzes, sowie zur Optimierung des Zusammenwirkens aller Akteure. Hier ist eine enge Vernetzung zwischen Betreiber, sowie technischen und politischen Behörden essenziell.

Im Falle eines radiologischen Notfalls werden aus den Ergebnissen der Umgebungsüberwachung – ergänzt durch die Daten aus Anlage und, soweit diese bekannt sind, über die Freisetzung – mittels Modellen Dosisprognosen berechnet. Mit Hilfe eines Dosis-Maßnahmen-Konzeptes werden dann die adäquaten Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung getroffen. Dieses Vorgehen ist ein kontinuierlicher Prozess, der eine laufende Beurteilung der aktuellen Lage und der sich daraus ergebenden Maßnahmen erfordert. Ziel ist die Rückkehr zu einem – eventuell auch erst vorläufigen – Normalzustand. Die entsprechenden Vorschriften sehen hier dynamische Dosis-Richtwerte vor, die, entsprechend dem Verlauf der Ereignisse, angepasst werden können. Es ist also denkbar, dass an einem Tag oder für eine bestimmte Region andere Richtwerte und Maßnahmen gelten als am Tag zuvor, beziehungsweise für eine andere Gegend. Dieses Vorgehen der Bevölkerung verständlich zu kommunizieren ist eine besondere Herausforderung!

Die Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus der Kernenergie

Bei der Nutzung der Kernenergie entstehen Abfälle und Rückstände, die zu entsorgen sind, falls eine Wiederverwertung nicht möglich ist. Dies gilt auch für viele andere technische oder chemische Prozesse. Radioaktive Abfälle müssen so entsorgt werden (*die Schweiz spricht hier von geologischer Tiefenlagerung*), dass diese auch in einer ferneren Zukunft weder Menschen noch

die Umwelt gefährden können. Das ist eine große Herausforderung, sowohl in technisch-wissenschaftlicher als auch in politisch-gesellschaftlicher Hinsicht. Es geht hier um Zeiträume außerhalb unseres Zeithorizontes, im Bereich von 10^5 Jahren, nämlich so lange, bis die Radioaktivität der Abfälle auf ein Niveau abgeklungen ist, das demjenigen natürlicher Uranerze entspricht.

Die Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff – zurzeit für die Schweiz aufgrund eines politischen Entscheids allerdings keine Option – würde diese Zeitspanne um einen Faktor Zehn vermindern, die Transmutation,¹ sofern diese eines Tages technisch möglich sein wird, würde eine Verkürzung um weitere zwei bis drei Größenordnungen bringen. Gemäß dem heute vorgesehenen Prozedere sollen die abgebrannten Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung – nach einer Abkühlphase von 20 bis 30 Jahren im Zwischenlager neben dem *Paul Scherer Institut* – in das geologische Tiefenlager der Schweiz, voraussichtlich « Nördlich Lägern » in etwa 800 Meter Tiefe im Opalinuston, verbracht werden.

Gemäß der Webseite der NAGRA (die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) wird bei einem 60-jährigen Betrieb der Schweizer Kernkraftwerke mit 1500 m^3 hochaktivem Abfall gerechnet. Davon sind 1400 m^3 abgebrannte Brennelemente und rund 100 m^3 hochaktiver Abfall aus früherer Wiederaufarbeitung von Schweizer Kernbrennstoff. Für die Entsorgung im geologischen Tiefenlager konditioniert, entspricht dieser hochaktive Abfall einem Volumen von 9300 m^3 . Die Zusammensetzung des zu entsorgenden abgebrannten Kernbrennstoffes (ohne Wiederaufarbeitung) ist aus Abb. 4.2 zu entnehmen. Den volumenmäßig größten Anteil der radioaktiven Abfälle – aber mit wesentlich geringerer Radioaktivität – machen, zusammen mit denendlagerbehältern, die $56\,000\text{ m}^3$ an schwach- und mittelaktiven Abfällen aus. Diese stammen vor allem aus dem Rückbau von Kernanlagen. Hinzu kommen dann noch weitere $16\,000\text{ m}^3$ aus den Bereichen Medizin, Industrie und Forschung, die so genannte MIF-Abfälle.

Der als Wirtgestein vorgesehene Opalinuston ist ein vor rund 175 Millionen Jahren auf dem (damaligen) Meeresboden abgelagerter und verfestigter Tonschlamm. Er ist undurchlässig für Wasser und verschließt sich – etwa nach Scherungen durch Erdbeben – selbst-heilend. Wasserzutritt lässt den Opalinuston aufquellen und Risse können sich selbst abdichten. Ein weiterer Vorteil dieses Tonos sind seine elektropolaren Eigenschaften, welche radioaktive Stoffe außerordentlich gut in die Tonstruktur einbinden. Die Opalinuston-Schicht hat eine Mächtigkeit von 100 bis 120 Meter, ist mini-

¹Ein Prozess, der durch die Kombination eines speziellen Kernreaktors mit einem Teilchenbeschleuniger die langlebigen Abfälle in solche mit wesentlich kürzerer Halbwertszeit umgewandelt, gemäß einem Vorschlag des italienischen Nobelpreisträgers und ehemaligen CERN-Direktors CARLO RUBBIA von 1993.

malen tektonischen Beanspruchungen unterworfen, und gegen zukünftige Erosion geschützt. Auch beim Tiefenlager wird das Mehrfach-Barrieren-Prinzip angewendet:

- Die abgebrannten Brennelemente werden in stahl-ummantelten Endlagerbehältern verpackt in das Tiefenlager verbracht, die schwach und mittelaktive Abfälle verfestigt in Stahlfässern;
- die Stollen um die Endlagerbehälter werden mit quellfähigem, undurchlässigem Bentonit verfüllt;
- das Tiefenlager befindet sich im einem mindestens 100 m dichten, quellfähigem und geringst-durchlässigen Gestein (Opalinuston);
- das Tiefenlager ist außer Reichweite menschlicher und klimatischer Einflüsse.

Das gesamte Volumen der für die Schweiz zu entsorgenden radioaktiven Abfälle beträgt gemäß NAGRA $83\,000\text{ m}^3$, eingeschlossen jene aus Medizin, Industrie und Forschung. Mengenmäßig machen die konditionierten hochradioaktiven Abfälle etwa 10 Prozent davon aus, bezogen auf die Radiotoxizität jedoch 99 Prozent. Für den Zeitplan betreffend Bewilligung, Bau, Einlagerungsbetrieb und Verschluss des Tiefenlagers sei auf die Tabelle 4.1 verwiesen, für die Zusammensetzung des Kernbrennstoffes sowie der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle auf Abb. 4.2. Für die Kosten von Rückbau und Entsorgung äußen die Betreiber während der Betriebszeit und der Nachbetriebszeit zwei Fonds:

- Ein **Stilllegungsfonds**: Die Kostenschätzung von 2016 rechnet mit Gesamtkosten von 3.779 Mrd. CHF; bis Ende 2021 beträgt das bereits geäußerte Kapital 3.037 Mrd. CHF;
- Ein **Entsorgungsfonds**: Die Kostenschätzung von 2016 rechnet mit Gesamtkosten von 20.077 Mrd. CHF; bis Ende 2021 beträgt das bereits geäußerte Kapital 6.627 Mrd. CHF¹.

Für den gesamten Entsorgungsprozess bezahlt die Schweizer Strom-Konsumenten über ihre Stromrechnung einen Anteil pro kW h von rund 1 Rappen.

Für die Entsorgung radioaktiven Abfalls ergeben sich zwei Herausforderungen:

- Wir können die Entsorgung radioaktiver Abfälle nur so gut bewerkstelligen, wie wir es heute wissen und können. Künftige Generationen – denen wir diese Abfälle und weitere zivilisatorische Hinterlassenschaften als Hypothek übergeben – werden dies möglicherweise anders und hoffentlich besser können als wir heute;

¹Quelle: Nuklearforum Schweiz: <https://www.nuklearforum.ch/de>

- Wir verlassen uns auf die Aussagen der Geologen, gemäß denen die ausgewählte Opalinuston-Schicht für die kommenden 10^5 Jahre ruhig, stabil und dicht abgeschlossen bleibt und auch, dass die Stahlbehälter genügend lange intakt bleiben.¹ Schließlich erwarten wir, dass Opalinuston und Bentonit, welche die Behälter umschließen, einen Wasserzutritt beziehungsweise einen Nuklidaustritt und damit eine Gefährdung der Biosphäre für eine genügend lange Zeit verhindert.

Für ein geologisches Tiefenlager sind zwei mögliche Schadens-Szenarien denkbar:

- Die Behälter werden in einigen Tausend bis Zehntausend Jahren durch Korrosion – was allerdings Wasser- und Sauerstoffzutritt voraussetzt – undicht und Radioaktivität könnte dann langsam herausdiffundieren und irgendwann später in die Biosphäre gelangen;
- Die andere Möglichkeit wäre ein geophysikalisches Großereignis, welches ein Endlager so beschädigt, dass es zu einer Freisetzung von Radioaktivität kommt. Der Schaden dieses Großereignisses wäre dann wohl von wesentlich größerem Ausmaß als die lokalen Konsequenzen der freigesetzten Radioaktivität aus dem Tiefenlager.

In beiden Fällen wäre die Beeinträchtigung der Umwelt durch die freigesetzte Radioaktivität wahrscheinlich räumlich eingegrenzt, und damit auch beherrschbar.

Als allerdings nur eingeschränkt gültiges Analogon können die Untersuchungen der Standorte der natürlichen Kernreaktoren im gabunischen Oklo² heran-

¹Gemäß der NAGRA ergaben Experimente im Felslabor Mont Terri und Modellrechnungen, dass die Korrosion der Behälter sehr langsam voranschreitet und die Behälter mindestens 10'000 Jahre dicht bleiben; von der Behörde werden 1000 Jahre verlangt. Nach 10'000 Jahren hat die Radioaktivität der Brennelemente zudem bereits auf ein halbes Prozent (1/200) des ursprünglichen Wertes abgenommen.

²In der Nähe von Oklo in der gabunischen Provinz Haut-Ogooué hat die Natur vor 2 Milliarden Jahren über einen Zeitraum von 500'000 Jahren insgesamt 14 natürliche Kernreaktoren betrieben. Es wurden 10 Tonnen ^{235}U gespalten und rund 4 Tonnen ^{239}Pu und weitere Spaltprodukte und Aktinien erbrütet bzw. erzeugt. Diese natürlichen Kernreaktoren waren möglich, weil damals, infolge der unterschiedlichen Halbwertszeiten, das Isotopenverhältnis $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ mit etwa 3 Prozent (wie bei heutigen Leichtwasserreaktoren) höher war als die heutigen 0.72 Prozent, und weil zusätzlich auch genügend Wasser als Moderator vorhanden war. Die Untersuchungen ergaben, dass die schweren Elemente wie Uran, Thorium, Neptunium, Plutonium und Americium praktisch am Ort blieben und die etwas mobileren wie Molybdän, Cadmium oder Caesium sich im Verlauf von zwei Milliarden Jahren nur im Bereich von wenigen Metern vom Ort des Reaktors entfernten, und dies, obwohl die Natur die Abfälle offen an der Oberfläche und ohne jegliche Konditionierung (i.e. Verpackung) « entsorgt » hatte.

gezogen werden. Diese zeigen nämlich, wie die aus der Kernspaltung entstandenen radioaktiven Stoffe über lange geologische Zeiträume, in diesem Fall zwei Milliarden Jahre, bis heute örtlich stabil fixiert blieben, und welche Auswirkungen sie auf die Biosphäre haben könnten.

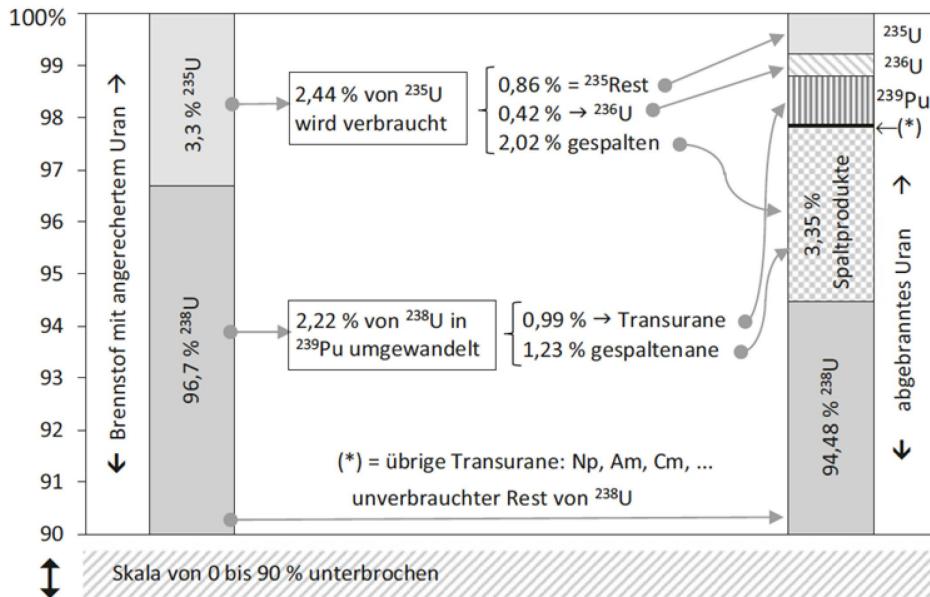


Abbildung 4.2: Links: Zusammensetzung des Kernbrennstoffes mit schwach angereichertem ^{235}U , so wird er in einen Leichtwasserreaktor verwendet wird. Mitte-Rechts: Die Zusammensetzung der radioaktiven Abfälle, die es zu entsorgen gibt, wenn keine Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffes durchgeführt wird. **Bildquelle:** H. Völkle, Kernenergie, Springer 2020; **Datenquelle:** Wolfgang Osterhage & Hartmut Frey: Radioaktiver Abfall; Springer, 2022.

Weitere Parameter beim Prozess der Stromerzeugung

Für die Bewertung der Kernenergie und für einen objektiven Vergleich mit anderen Technologien zur Stromproduktion sind weiterer Kriterien zu evaluieren.

Radiologische Auswirkungen bei Unfällen

An erster Stelle stehen die gesundheitlichen Auswirkungen, sowohl beim bestimmungsgemäßen Betrieb als auch bei Unfällen. Meist wird dazu die Anzahl erwarteter Todesfälle pro erzeugte Strommenge berechnet. Von den hier zitierten Studien ist der so genannte Rasmussen-Bericht aus den USA (Abb. 4.3) eine der ältesten. Bei diesem, sowie auch bei neueren Datensets (in Abb. 4.4 und 4.6 sind die Ergebnisse von 3 aktuellen Studien zusammengefasst), schneidet die Kernenergie fast am besten ab, obwohl die neuen Studien auch die Opfer der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl berücksichtigen.

Im Vergleich dazu sind die Auswirkungen der Kohleverstromung verheerend: Die 250 europäischen Kohlekraftwerke verursachen europaweit durch die Emission von Feinstaub, Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxiden (NO_x) und weiteren Schadstoffen jährlich 22'900 Todesfälle, mit einem 95%-Vertrauensbereich zwischen 14'400 bis 31'900 Fälle/Jahr.¹ Dabei ist auch die Schweiz, obwohl unser Land keine Kohlekraftwerke betreibt, durch über die Luft importierte Schadstoffe aus europäischen Anlagen betroffen.

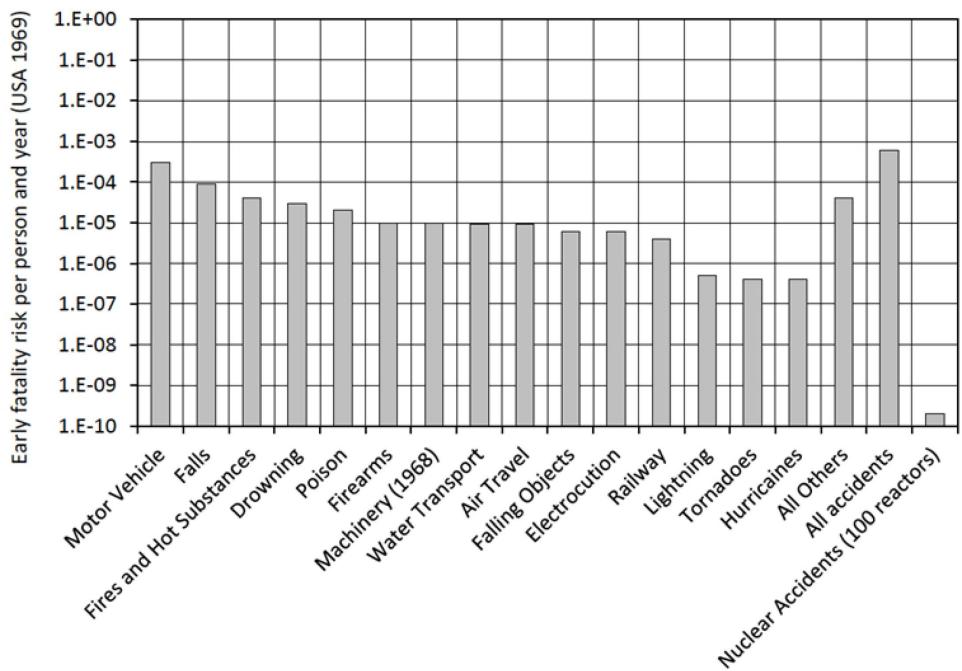


Abbildung 4.3: Der berühmte Rasmussen-Report von 1975 untersuchte die Anzahl Todesfälle durch verschiedene zivilisatorische Ursachen in den USA für das Jahr 1969, im Vergleich zu jenen durch die Nutzung der Kernenergie. Bildquelle: H. Völkle, Kernenergie, Springer 2020; Datenquelle: WASH-1400; NUREG 75/014: Reactor safety study: An assessment of accidents risk in US commercial nuclear Power Plant, US Nuclear Regulatory Commission, October 1975.

¹ Europe's Dark Cloud (2016): https://env-health.org/IMG/pdf/dark_cloud-full-report_final.pdf

Radiologische Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Bei Normalbetrieb erhalten die Anwohner von Schweizer Kernkraftwerken durch deren radioaktive Emissionen maximal 0.0022 mSv (Milli-Sievert) pro Jahr (2021), dies zusätzlich zur durchschnittlichen natürlichen Strahlenexposition in der Schweiz von 4.4 mSv pro Jahr.¹ Das sind 2.2 Tausendstel des Dosisgrenzwertes von 1 mSv pro Jahr für die Bevölkerung aus künstliche Strahlenquellen. Dabei gehen die Aufsichtsbehörden für die Berechnungen dieser Dosen von den ungünstigsten Voraussetzungen aus. Dies heißt, es wird dauernder Aufenthalt am Ort der größten Immissionen angenommen, Lebensmittel stammen ausschließlich aus der näheren Umgebung des Werkes, Trinkwasser aus dem Fluss unterhalb des Werkes, sowie Verzehr von Fischen aus dem Fluss.

Kinderleukämie in der Umgebung von Kernkraftwerken?

Für viele Emotionen sorgte die 2008 veröffentlichte deutsche KiKK-Studie « *Kinderleukämie in der Umgebung von Kernkraftwerken* ».² Obwohl die Autoren ihre Daten sehr vorsichtig interpretieren, führten die Ergebnisse der Studie zu emotionsgeladenen Diskussionen, bei den Kernenergiegegnern zur Überzeugung, dass die Gefährlichkeit der Kernenergie jetzt endlich belegt sei und bei den Strahlenschutzfachleuten eher zu Ratlosigkeit, weil die Resultate wissenschaftlichen Erkenntnisse widersprechen:

« *Obwohl frühere Ergebnisse mit der aktuellen Studie reproduziert werden konnten, kann aufgrund des aktuellen strahlenbiologischen und -epidemiologischen Wissens die von deutschen Kernkraftwerken im Normalbetrieb emittierte ionisierende Strahlung grundsätzlich nicht als Ursache interpretiert werden.* »

Erst Jahre später konnte durch weitere, internationale Untersuchungen, wie etwa die englischen COMARE-Berichte,³ die Sachlage weitgehend geklärt werden:

« *Zusammenfassend belegt der 17. COMARE - Bericht erneut und noch überzeugender als die vorangehenden,*

¹ Jahresberichte des Bundesamtes für Gesundheit: *Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz*; Herausgeber BAG, Bern. <https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/das-bag/publikationen/taetigkeitsberichte/jahresberichte-umweltradioaktivitaet.html>

² KAATSCH P. et al.: *Childhood Leukemia in the vicinity of nuclear power plants in Germany*. Deutsches Ärzteblatt International Vol. 105 (42), pp. 725-732.

³ COMARE: *Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment* 17. Report. Produced by Public Health England of the Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, Crown Copyright, Chilton, 2016.

dass Nuklearanlagen, wie sie heute betrieben werden, kein Risiko für Leukämien und Krebskrankungen in deren Umgebung darstellen. Die Behauptung, dass die Empfindlichkeit von Kleinkindern auf genetische Auswirkungen durch ionisierende Strahlung – dies wäre zur Erklärung der Sellafield-Epidemie nötig – mehr als 100-mal größer sei, lässt sich durch keinerlei experimentelle Daten belegen.»¹

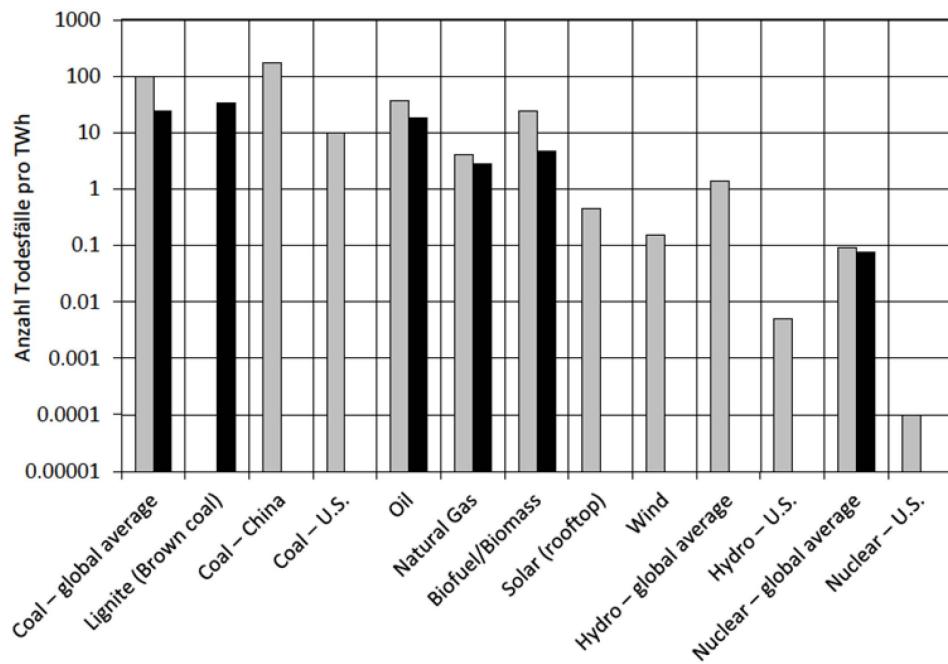


Abbildung 4.4: Berechnete Anzahl der Todesfälle pro 1 TWh (10^9 kWh) erzeugter elektrischer Energie durch verschiedene Verfahren der Stromerzeugung aus zwei Quellen. **Bildquelle:** H. Völkle, Kernenergie, Springer 2020; **Datenquellen:** Graue Balken: J. Conca: How deadly is your Kilowatt? We Rank Killer Energy Sources, Forbes, June 10th, 2013; Schwarze Balken: OECD: The full costs of electricity provision. NEA Nr. 2798, OECD/NEA, Boulogne-Billancourt, 2018.

Treibhausgase, Material- & Landbedarf, Brennstoffreserven

Weitere Kenngrössen für die Bewertung von Technologien zur Stromerzeugung sind der klimarelevante CO₂-Austoss (Abb. 4.5 und 4.6), bei dem die fossilen Energien besonders schlecht abschneiden, dann der Bedarf an Roh-

¹SCHÄDELIN J., NIGGLI F. und VÖLKLE H.: Keine Kinderleukämie durch Emissionen aus Kernanlagen – Nach langer Aufarbeitung und endlich Klarheit. Schweizerische Ärztezeitung 98/35, p. 1104 ff

stoffen zum Bau von Anlagen (Abb. 4.7 und 4.8), der Platz- und Landbedarf (Abb. 4.8), die Energiedichte (Tab. 4.2), die optimale Laufzeit, die heute erfassten und verfügbaren Brennstoffreserven (Tab. 4.2) und schließlich die Kosten der mit den entsprechenden Anlagen produzierten Elektrizität (Tab. 4.3). Alle diese Kriterien ergeben für die Kernenergie ein vorteilhaftes Ergebnis.

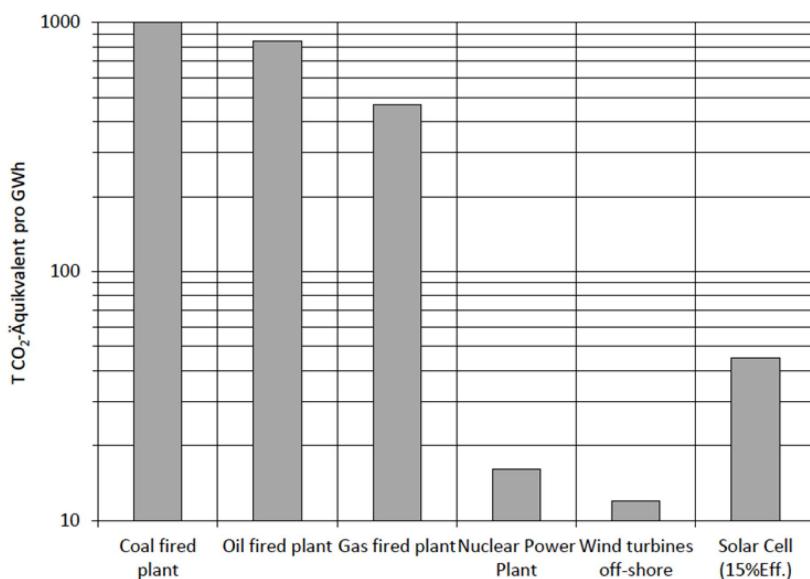


Abbildung 4.5: *CO₂-Emissionen durch verschiedene Verfahren zur Stromerzeugung in g CO₂-Äquivalent pro kWh, oder auch Tonnen pro GW h.*
Bildquelle: H. Völkle, Kernenergie, Springer 2020; Datenquelle: E. de Sanctis et al.: Energy from nuclear fission, Springer, 2016.

Strompreis

Beim Strompreis ist für die Nutzung von Wind und Sonne auch der Aufwand für die Stromspeicherung zu berücksichtigen. Strom aus Windkraft- und Solaranlagen ist nicht immer dann verfügbar, wenn er benötigt wird, muss also gespeichert werden. Die Bau- und Betriebskosten solcher Speicheranlagen sowie der Wirkungsverlust des Gesamtsystems aus Produktion und Stromspeicherung von 20 bis 25 Prozent sind in die Strompreis-Bilanz von Wind und Sonne einzubeziehen. Die bestehenden Speicherkraftwerke der Schweiz sind in erster Linie für den Tag-Nacht-Ausgleich vorgesehen. Auch bei den neuen großen Speicherwerken der Schweiz (Lindt-Limmern/GL: 1000 MW und Nant de Drance/VS: 900 MW) ist bei Vollleistung jeweils das obere Staubecken bereits nach einem Tag entleert. Für den saisonalen Ausgleich brauchen wir neue Technologien und noch etliche größere Anlagen.

Lange Fristen für Zulassung, Baubewilligung und Bauzeit als Handicap

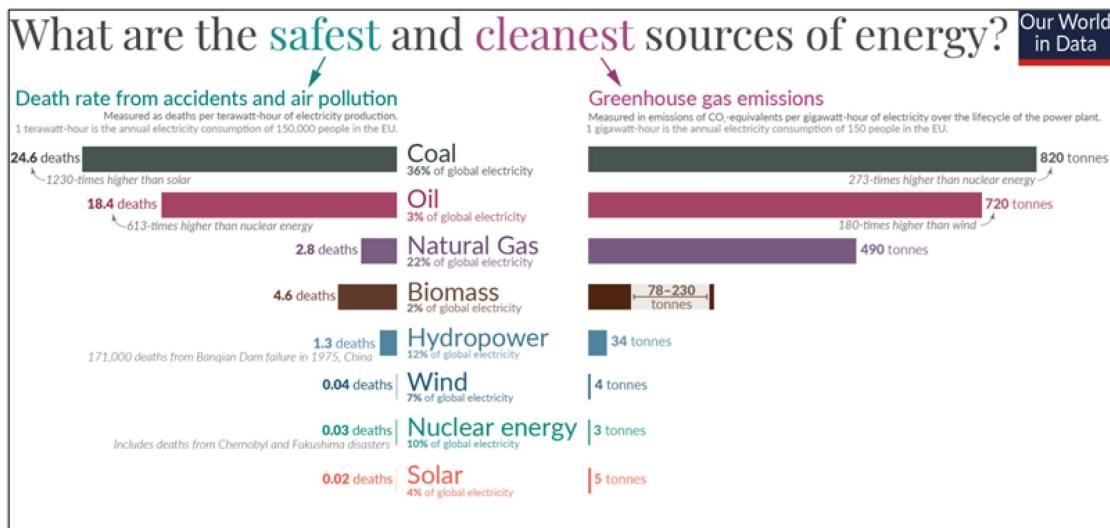


Abbildung 4.6: Anzahl berechnete Todesfälle pro TW h bzw. berechnete CO₂-Emissionen in Tonnen pro GWh. Bildquelle: Vortrag von Prof. Lino Guzzella (ETHZ) beim Schweizer Nuklearforum vom 25. Mai 2012 im Casino Bern zum Thema: Energie – Globale Randbedingungen und lokale Optionen. **Comment by the authors:** Death rates from fossil fuels and biomass are based on state-of-the art plants with pollution controls in Europe and are based on older models of the impacts of air pollution on health. This means these death rates are likely to be very conservative. For further discussion, see our article: OurWorldinData.org/safest-sources-of-energy. Electricity shares are given for 2021. Data sources: MARKANDYA & WILKINSON (2007); UNSCEAR (2008; 2018); SOVACOOL et al. (2016); IPCC AR5 (2014); PEHL et al. (2017); Ember Energy (2021). OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.

Die langen Fristen für die Bauartzulassungen von neuen Reaktorgenerationen, für Bau- und Betriebsbewilligungen neuer Kernanlagen, wie auch der Mangel an Akzeptanz in der Bevölkerung sind eine Herausforderung und, angesichts der Dringlichkeit von Maßnahmen zur Meisterung der Energiekriese, das größte Handicap der Kernenergie. Eine gewisse Hoffnung besteht darin, dass diese Prozesse für die kommenden kleinen und modularen Reaktoren (SML = *Small Modular Reactors*) durch standardisierte Fabrikationsprozesse einfacher sein werden und damit beschleunigt werden könnten.

Ausblick

Die hier zusammengestellten Informationen zeigen, unter welchen Voraussetzungen ein sicherer Betrieb von Kernanlagen möglich ist, ebenso dass dieser bei allen hier diskutierten Kriterien gut bis sehr gut abschneidet im Vergleich zu anderen Technologien der Stromerzeugung. Kernanlagen sind also wesentlich besser als ihr Ruf. Beim angestrebten und weitgehenden Verzicht auf fossile Energien und bei der Verlagerung unserer Energieversorgung in Richtung neuer, erneuerbarer Energiequellen und Technologien kann die Kernenergie dazu beitragen – zumindest für die Übergangszeit, wenn nicht gar mittel und längerfristig – diese Umstellung rascher zu bewerkstelligen.

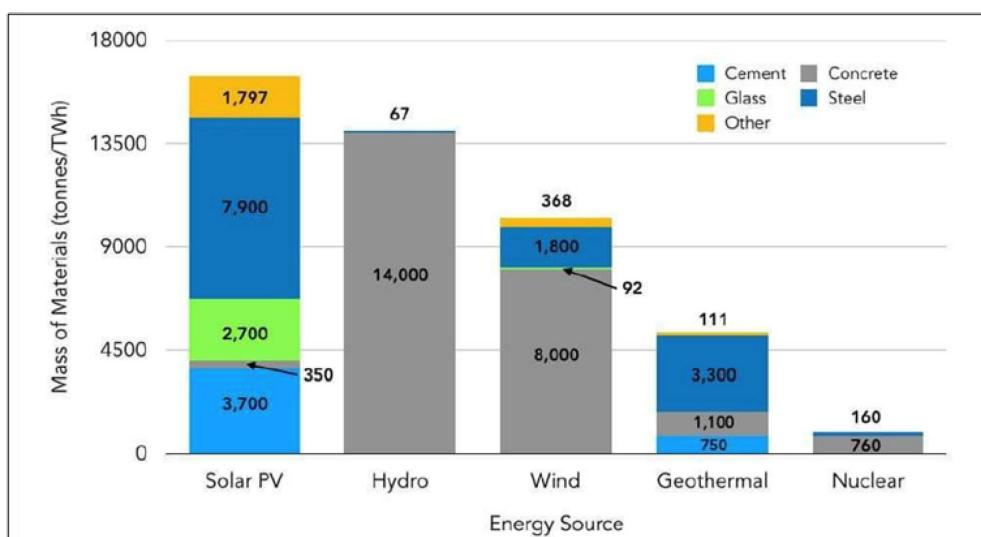


Abbildung 4.7: *Der Materialverbrauch für verschiedene Methoden der Stromerzeugung in Tonnen pro TWh.* **Bildquelle:** Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities, September 2015. United States Department of Energy. https://www.reddit.com/r/nuclear_memes/comments/a9gf7d/materials_throughput_by_type_of_energy_source/

Beim Ausstieg aus den fossilen Energieträgern wird der Strombedarf deutlich zunehmen, vermutlich auf das Zwei- bis Dreifache des heutigen Stromverbrauchs. Damit wird die Elektrizität zum Haupt-Energievektor. Heute beträgt der Strom-Anteil am gesamten Energieverbrauch der Schweiz etwa ein Viertel. Fast der ganze Rest, also drei Viertel, sind fossile Energien. Diese brauchen wir u. a. für die individuelle Mobilität, Heizung, Prozesswärme, Produktion und den Warentransport auf der Straße. Aber auch für die Herstellung von Plastik, von chemisch-pharmazeutischen Produkten und für viele weitere industrielle Prozesse werden Erdöl beziehungsweise Erdölprodukte benötigt.

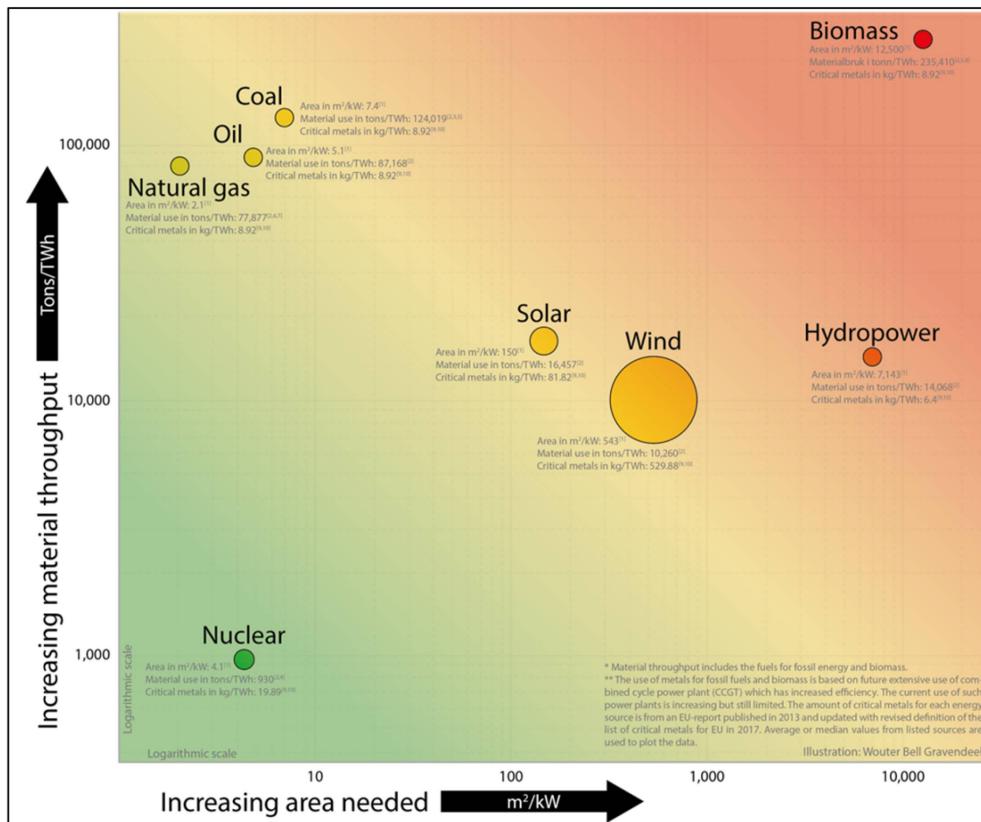


Abbildung 4.8: *Materialverbrauch in Tonnen pro TWh erzeugtem Strom gegen den Flächenbedarf im m² pro kW für die verschiedenen Methoden der Stromproduktion; die Größe der Bubbles entspricht dem Verbrauch kritischer Metalle.* **Bildquelle:** Jonny Hesthammer (October 28th, 2020), former geology- and geophysics professor at the University in Bergen; CEO M Vest Energy and Norsk Kjernekraft (Norwegian Nuclear Power).: <https://energy.glex.no/feature-stories/area-and-material-consumption>

Im Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Bevölkerung unseres Landes weiter zunimmt,¹ ebenso deren Komfortansprüche. Auch bei anderen Bereichen wird der Strombedarf in Zukunft ansteigen. Dazu gehören E-Mobilität, Wärmepumpen² zur Nutzung von Luft- oder Erdwärme, dann die, auch im privaten Haushalt, immer zahlreicher werdenden Klimageräte,³ sowie

¹Gemäß dem Bundesamt für Statistik rechnet man für ein Referenzszenario mit 10.4 Millionen Einwohner im Jahr 2050, für ein hohes Szenario gar mit 11.4 Millionen. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/zukuenftige-entwicklung/schweiz-szenarien.html>

²Bei der Erdwärmennutzung beträgt der Strom für die Wärmepumpe etwa ein Viertel des Energieumsatzes der gesamten Erdwärme-Anlage.

³Mit der Klimaerwärmung wird auch der Bedarf an Raumklimageräten bis 2050 massiv ansteigen. Weltweit muss bis 2050 mit einer Zunahme um 250% gegenüber 2016 gerechnet werden.

die Bereiche Kommunikation und Informationstechnologie.¹ Der genannte Schätzwert, der einen Anstieg des Stromverbrauchs beim Ausstieg aus den fossilen Energien auf das Zwei- bis Dreifache gegenüber heute prognostiziert, ist also durchaus realistisch. Er erfordert auch einen massiven Ausbau der Stromnetze.

Bei Planung und Bau neuer Energieanlagen, wie etwa Wasserkraft-, Windkraft-, Geothermie- oder Solaranlagen werden Konflikte zwischen der Energiepolitik auf der einen und Umwelt- und Landschaftsschutz auf der anderen Seite unvermeidbar. Es muss dann wohl von Fall zu Fall entschieden werden, wo ersteres und wo letzteres priorisiert werden soll.

Diese globale Herausforderung kann nur gemeinsam und in internationaler Zusammenarbeit gemeistert werden. Dies erfordert, alle Energiequellen, also auch die Kernenergie, vorurteilslos zu evaluieren und jene zu nutzen, die technisch, wirtschaftlich, finanziell sinnvoll und auch inskünftig gesellschaftspolitisch akzeptabel sind. Leider verhindern die vielen Konflikte und Kriege, wie sie immer wieder in vielen Regionen der Welt aufflammen, ein solches gemeinsames und koordiniertes Vorgehen aller Länder und Gesellschaften.

¹In Deutschland verteilte sich 2007 der Stromverbrauch von Informations- und Kommunikationstechnologie folgendermassen:

Haushalte 59.6%, Unternehmen 12.3%, Server und Rechenzentren 16.5% und Mobilfunk und Festnetz 11.6%. https://www.post-und-telekommunikation.de/PuT/1Fundus/Dokumente/3.Nationaler_IT-Gipfel_Nov.2008/it-gipfel-stromverbrauch_property=pdf_bereich=bmwi_sprache=de_rwb=true.pdf. Internet verursacht etwa 1.5% des globalen CO₂-Ausstoßes, und verbraucht heute etwa 6% des weltweit produzierten Stroms; bis 2030 könnte dieser Anteil auf 13% ansteigen. <https://www.energie-experten.ch/de/business/detail/kommunikation-und-stromverbrauch.html> und: <https://www.kocos.com/de/aktuelles/blog/artikel/artikel/2021/10/18/einige-fakten-zu-dem-energieverbrauch-der-digitalisierung>

Tabelle 4.1: *Die wichtigsten Sicherheitsfaktoren für die Nutzung der Kernenergie (Übersicht).*

Technische Sicherheit der Anlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßige sicherheitstechnischen Überprüfung und Nachrüstung; • Stahl-Containment; Sicherheitsgebäude aus armiertem Beton; • Automatisierung von Steuerung und Kontrolle der Anlage unter Einbezug modernster programmierbarer, Speicherbaustein-Leittechnik mit höherer Zuverlässigkeit und verbesserter Fehler-Identifikation; • konsequente Anwendung des Mehrfachbarrieren-Prinzips; • Fail-safe-Prinzip und hohe Fehlertoleranz der Anlage; • Mehrfachredundanz, Diversität und räumliche Trennung aller sicherheitsrelevanten Komponenten der Anlage und Anwendung des <i>Defence-in-Depth</i>-Prinzip; • Einrichtungen zu katalytischer Knallgas-Rekombination; • gefilterte Druckentlastung, das sogenannte « Venting » • für den Störfall, Auffangwanne für geschmolzenen Kernbrennstoff (Core Catcher).
Sicherheits-Kultur im Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Sicherheitskultur und -Bewusstsein für alle Mitarbeitenden; • Auswahl, Ausbildung und regelmäßiges Training der Mitarbeitenden; • Quality Management mit Zertifizierung & Analyse von Vorkommnissen; • Alle Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb werden analysiert und dokumentiert, nicht um fehlbare Mitarbeiter zu sanktionieren, sondern um daraus zu lernen und entsprechende Verbesserungen vorzunehmen; • Betriebskultur, Betriebsklima, Anerkennung durch Linie, Entlohnung.
Rolle der Aufsichts-Behörde	<ul style="list-style-type: none"> • Behörden müssen sowohl fachlich kompetent als auch politisch unabhängig und nicht-korrumpierbar sein; • Trennung zwischen einerseits Bewilligung und andererseits Aufsicht und Überwachung.
Notfallschutz	<ul style="list-style-type: none"> • Notfallvorbereitung und Notfallschutz mit Einbezug aller Akteure; • Regelmäßige, auch grenzüberschreitende Notfallübungen; • Internationaler Daten- und Erfahrungsaustausch; • Dosis-Maßnahmen-Konzept; Information der Bevölkerung; Jod-Tabletten.
Entsorgung radioaktiver Abfälle	<ul style="list-style-type: none"> • « Nördlich Lägern » in 800 m Tiefe im Opalinuston wurde von der NAGRA am 12.9.22 als sicherster Standort (<i>mit den größten Sicherheitsreserven</i>) für ein Schweizer Tiefenlager für hoch- sowie schwach/mittel-radioaktive Abfälle vorgeschlagen; • Abgebrannte Brennelemente kommen nach einer Zwischenlagerung von 20-30 Jahren im ZWILAG/AG, und nach Konditionierung in der Oberflächenanlage vor Ort, in Stahlbehältern in das Tiefenlager und sind dort von Bentonit (dieser quillt bei Wasserzutritt und dichtet ab) umhüllt; • Timing für das geplante Schweizer Tiefenlager: 2024 Einreichung Gesuch; ab 2029/30 Entscheid Bundesrat & Parlament; 2031 eventuell Referendum; 2032 erdwissenschaftliche Untersuchungen; 2045 geplanter Baubeginn des Endlagers; 2055 Inbetriebnahme der Brennelement-Verpackungsanlage am Standort ZWILAG; 2050/60 Inbetriebnahme SMA/HAA-Lager & Beginn der Einlagerung der Abfälle; 2125 Verschluss des Lagers.

Weitere Parameter	<ul style="list-style-type: none"> • Strahlendosis; Anzahl erwartetet Todesfälle pro erzeugte Strommenge; • CO₂-Emissionen pro erzeugte Strommenge; • Materialverbrauch für Bau und Betrieb; • Land- oder Platzbedarf; Berücksichtigung der wichtigen alpinen Naturreserven und Tourismusressourcen; • Strom-Gestehungskosten und Energiedichte; • Wie lange reichen die heute bekannten, nutzbaren Brennstoffreserven.
Zulassung und Bau	<ul style="list-style-type: none"> • Die Prozesse von Zulassung (Licencing für neue Reaktoren), von Bau- und Betriebsbewilligung und die Bauphasen ist zu beschleunigen.

Tabelle 4.2: Die Parameter zur Bewertung von Technologien der Stromerzeugung.

Anzahl zu erwartenden Todesfälle pro erzeugte Strommenge	Wie aus den Abb. 4.3, 4.4 und 4.6 ersichtlich ist, schneidet die Kernenergie gut bis sehr gut ab, obwohl, wie in den Abb. 4.4 und 4.5, der Reaktorunfall von Tschernobyl bereits berücksichtigt ist.
Strahlenexposition bei Normalbetrieb	Diese ist rund 1000 geringer als der Dosisgrenzwert von 1 mSv pro Jahr gemäß der Schweizerischen Strahlenschutzverordnung, gültig für die Bevölkerung durch künstlicher Strahlenquellen.
CO ₂ -Emissionen pro erzeugte Strommenge	Aus den Abb. 4.5 und 4.6 ist ersichtlich, wie sehr die fossilen Energien mit ihrem hohen CO ₂ -Ausstoß zum Klimawandel beitragen.
Materialverbrauch pro erzeugte Strommenge	Aus den Abb. 4.7 und 4.8 ist zu entnehmen, dass die Nutzung der erneuerbaren Energien eine hohen Rohstoffverbrauch erfordert.
Landverbrauch pro erzeugte Strommenge	Infolge seiner hohen Energiedichte (Abb. 4.8) benötigt die Kernenergie am wenigsten Land, während die Nutzung von Wind und Sonne viel Fläche beansprucht und daher Konflikte mit Landschafts- und Umweltschutz unvermeidlich sind. Für Windkraftanlagen rechnet man beispielsweise mit einem Platzbedarf (da die Windräder in einem bestimmten Abstand zueinander aufgestellt werden müssen) vom fünffachen Rotordurchmesser in der Hauptwindrichtung und dem dreifachen quer dazu. Beispiel: Für eine 4.6 MW-Windkraftanlage mit einer Höhe von 250 m und einem Rotordurchmesser von 160 m ergibt das 0.4 km ² .
Strompreis	Es wird oft kolportiert, der Kernenergiestrom sei zu teuer. Wie aus der Tabelle 4.3 gemäß Berechnungen des Bundesamtes für Energie zu entnehmen ist, stimmt das so nicht. Die Kernenergie ist auch die einzige Energie, bei der die Kosten für Rückbau und Entsorgung der Abfälle im Strompreis bereits eingerechnet sind.
Energiedichte	Zur Erzeugung der Strommenge von 1 TW h (also 10 ⁶ MW h) werden für die Kernenergie 24 Tonnen Natururan benötigt (<i>dieses muss dann allerdings auf etwa 3% angereichert werden</i>), oder 135'000 Tonnen Erdgas bei der Stromproduktion mit GuD-Kraftwerken (*) mit einem Wirkungsgrad von 60 Prozent, oder 210'000 Tonnen Erdgas bei konventionellen Gaskraftwerken mit einem Wirkungsgrad von lediglich 40 Prozent oder 400'000 Tonnen Steinkohle bei klassischen Kohlekraftwerken mit einem Wirkungsgrad von ebenfalls nur 40 Prozent. (**)
Für wie lange reichen die heute verfügbaren Brennstoffreserven?	Gemäß OECD reichen die bekannten Uranreserven bei heutigem Verbrauch für die nächsten 135 Jahre. Für die noch vermuteten, unentdeckten Uranreserven errechnet die OECD, dass sie noch für weitere hundert Jahre reichen könnten. Geht man davon aus, dass der Fossilenergieverbrauch auf dem jetzigen Niveau stabil bleibt, so dürften die nachgewiesenen Erdölreserven gemäß BP-Statistik noch gut 53 Jahre reichen. Für Erdgas rechnet BP mit rund 55 Jahren und für Kohle mit mehr als 100 Jahren. (***)
Amortisation von „zu teuren“ neuen KKW	Kernkraftwerke "rentieren" – wie auch andere wichtige Infrastrukturanlagen (Gotthardtunnel, NEAT, etc.) meist nicht für die Generation der Erbauer. Kernkraftwerke mit einer Betriebszeit von 80 bis 100 Jahren werden in den folgenden zwei Generationen amortisiert – und werden dann ihren vollen volkswirtschaftlichen Nutzen entfalten.

(*) *GuD = Gas- und Dampf-Kraftwerk: Die Gasturbine treibt den ersten Generator an; die heißen Abgase der Gasturbine heizen einen Dampfkessel, damit wird eine Dampfturbine mit dem zweiten Generator angetrieben. Dadurch wird ein Gesamtwirkungsgrad von etwa 60% erreicht.* (**) *Quelle: <https://www.kernenergie.ch/de/rohstoff-urancontent---1--1085.html>*
 (***) *Quelle: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/fossile-energien.html>.*

Tabelle 4.3: *Schätzwerte für die Stromkosten aus verschiedenen Prozessen der Stromerzeugung (*) bei den neuen, erneuerbaren Energien ist der Preis für die Stromspeicherung nicht berücksichtigt. Datenquelle: Bundesamt für Energie: Potenzielle Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen; Autoren: CHRISTIAN BAUER & STEFAN HIRSCHBERG, PSI, November 2017.*

Stromerzeugung (Datenquelle: BFE 2017)	für 2019 neu gebaute Anlagen	Prognosen für 2035
Photovoltaik (*)	8 – 42	4 – 22
Biogas	18 – 50	18 – 41
Windenergie Schweiz (*)	13 – 21	10 – 17
Großwasserkraftwerke	7 – 30	7 – 30
Kleinwasserkraftwerke	12 – 28	14 – 33
Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke	11 – 12	13 – 15
Kernkraftwerke	5 – 12	5 – 12
Tiefengeothermie	—	16 – 58
Kohlekraftwerke (Ausland)	—	4 – 9