

# Kernenergie und CO<sub>2</sub>

Guten Tag, meine Damen und Herren

Es ist mir eine besondere Ehre und Freude, an dieser ersten Mini-Tagung der SVA als Redner vor Ihnen zu stehen. Dafür bin ich unserem Präsidenten, Herrn Dr. Pellaud, dankbar, da es seine Idee war, mich heute über das Thema „Kernenergie und CO<sub>2</sub>“ sprechen zu lassen.

Ich habe den Vortrag wie folgt gegliedert:

1. Einleitung
2. Energieverbrauch und Klimaveränderung
3. Gegenwärtiger Beitrag der Kernenergie zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses
4. Der «Kohlenstoff-Wert» und die effektiven Vergleichskosten der Kernenergie
5. Nachhaltigkeit und Kernenergie
6. Schlussfolgerungen

## 1. Einleitung

Es war Svante Arrhenius, einer der ersten Nobelpreisträger überhaupt, der im Jahr 1896, also vor mehr als einem Jahrhundert, die folgende Wahrnehmung äusserte:

„Die Verbrennung fossiler Brennstoffe könnte die atmosphärische Durchlässigkeit von infraroter Strahlung beeinflussen und damit die Erde erwärmen“.

Seither hat sich die Weltbevölkerung vervierfacht und der Verbrauch an Primärenergie ist um einen Faktor von fast 20 explodiert. Die Kombination von empirischen Daten und hochkomplexen Klimasimulationsmodellen hat heute in der Tat die Theorie des Treibhauseffekts fast völlig bestätigt. Damit ist der Prophet Arrhenius mit seinen warnenden Worten nicht mehr bloss die einsame Stimme in der Wüste, sondern findet mittlerweile auch überall dort Beachtung, wo von einer nachhaltigen Zukunft der Menschheit die Rede ist.

## 2. Energieverbrauch und Klimaveränderung

Bezüglich des Themas Klimaveränderung ist heute der „Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)“ der Vereinten Nationen die weltweit bedeutendste Gruppierung von Experten. Die folgende Figur stammt aus dem neusten IPCC-Bericht und zeigt die Entwicklung der atmosphärischen Durchschnittstemperatur über die ca. letzten 150 Jahre (*Figur 1*). Es ist deutlich zu erkennen, dass die globalen Temperaturen im 20. Jahrhundert um nahezu ein Grad angestiegen sind.

Dass sich die Erdatmosphäre langsam erwärmt, wird auch von anderen Beobachtungen bestätigt. So weisen z. B. Satellitenmessungen darauf hin, dass uns heute gegenüber den späten 70er-Jahren der Frühling circa eine Woche früher vor der Türe steht. Im Weiteren demonstrieren verschiedene Aufzeichnungen, dass heutzutage gewisse Zugvögel zu höheren

Breitengraden ziehen und dort länger verbleiben. Alle diese experimentell festgestellten Zeichen der Erwärmung haben die Klimaexperten eindeutig auf den hauptsächlich von der Menschheit verursachten Treibhauseffekt zurückführen können, wie die gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturwerten zeigt.

Kohlendioxid – hauptsächlich aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe – ist nicht das einzige Treibhausgas, dessen atmosphärische Konzentration durch unsere moderne Gesellschaft erhöht wird, aber bei weitem das wichtigste. Im auf der Figur betrachteten Zeitraum, d. h. seit Mitte des 19. Jahrhunderts, ist die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre von einem seit Tausenden von Jahren stabil gebliebenen Wert von ca. 280 auf heute 370 ppm angestiegen. Effektiv entspricht dies dem Einsetzen des modernen Zeitalters mit seiner engen Verknüpfung zwischen Lebensqualität und Energieverbrauch des Menschen. In der Tat ist seit der industriellen Revolution und des von ihr ausgelösten „Kohlenfiebers“ diese starke Abhängigkeit kaum wegzudenken.

Die zweite Figur (**Figur 2**) ist Ihnen sicher bekannt. Sie skizziert die Entwicklung der Weltbevölkerung und unterstreicht die Tatsache, dass die gegenwärtige „Explosion“ vor allem in den weniger entwickelten Ländern stattfindet – in Ländern also, in denen der Energiehunger am Wachsen und zudem kaum zu begrenzen ist. Für die stark wachsende Bevölkerung in diesen Ländern ist der Anspruch auf eine bessere Lebensqualität unbestritten. Wie wir alle wissen, ist es schwierig, verlässliche Prognosen zu stellen. Aber selbst eine konservative Schätzung des globalen Primärenergieverbrauchs für die Mitte dieses Jahrhunderts führt zu einer Verdoppelung des heutigen Werts. Wenn man sich vergegenwärtigt, dass dieser Wert ca. 12 TW beträgt und er zu 85% aus fossilen Brennstoffen gedeckt wird, wird die Grösse der an unsere Gesellschaft gestellten Herausforderung ziemlich klar.

Wie wird es weiter gehen? Im Grunde genommen gibt es zwei Faktoren, die die Suche nach einer soliden Lösung so schwer machen. Erstens weist CO<sub>2</sub> eine sehr lange Lebensdauer auf. Dieses Gas bleibt für Hunderte von Jahren in der Atmosphäre, wodurch es sich hier um eine Problemstellung handelt, die sich über mehrere Generationen erstreckt. Zweitens kann eine Reduktion des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre nur auf globaler Basis erzielt werden, und es hilft gar nichts, wenn die Verbesserung der heutigen Situation nur von einzelnen Ländern angegangen wird.

In seinem Bericht warnt der IPCC, dass, falls keine Massnahmen ergriffen werden, die CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zum Jahr 2050 auf einen Wert zwischen 450 und 550 ppm ansteigen wird und während der zweiten Hälfte des Jahrhunderts noch weiter zu steigen droht. Der vorausgesagte Temperaturanstieg beträgt 0.5-2.5 Grad bis 2050, und 1.4-5.8 Grad bis 2100. Sie sehen, dass die Unsicherheiten bei diesen Voraussagen wie bei allen anderen Parametern bezüglich der CO<sub>2</sub>-Problematik gross sind. Aber selbst die unteren Werte dieser Temperaturanstiege werden sehr ernste Auswirkungen haben.

Nehmen wir als Beispiel eine der wahrscheinlicheren Konsequenzen der Erwärmung der Erde, nämlich die Erhöhung der Meeresspiegel als Folge der Abschmelzung der Gletscher sowie der Expansion der Ozeane durch die Wassererwärmung. Die besten Prognosen deuten auf einen 5-32 cm höheren Meeresspiegel im Jahr 2050 hin und eine maximale Erhöhung von nahezu 1 m bis 2100. Die reichen Länder werden solche steigende Wasserspiegel, mindestens in der ersten Hälfte des Jahrhunderts, sicher im Griff haben. Für die Entwicklungsländer, in denen 80% der Weltbevölkerung leben, wird allerdings die Situation anders sein. Schon heute

sind in Bangladesch wegen periodischer Überflutungen mehrere hunderttausend Menschen aus ihren Dörfern verdrängt worden.

Als nüchterne Strategie schlägt der IPCC vor, dass der längerfristige globale Temperaturanstieg auf 2 bis 3 Grad begrenzt werden soll. Damit, meinen die Experten, muss die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf 500-550 ppm stabilisiert werden, also geringfügig weniger als das Zweifache des Wertes, der vor der industriellen Ära herrschte. Was heisst dies für die weltweite Energieproduktion? Die kurze Antwort lautet: „Sehr, sehr viel“. Um einen Gleichgewichtswert von 500-550 ppm zu erzielen, muss der globale CO<sub>2</sub>-Ausstoss schon nach ca. zwei Jahrzehnten am Abklingen sein. Im Vergleich zum heutigen Verbrauch von 12 TW Primärenergie mit einem Anteil von 85% an fossilen Brennstoffen braucht die Menschheit bis Mitte dieses Jahrhunderts eine nahezu CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung von 15-20 TW – unter Mitberücksichtigung von Energiesparmassnahmen, Effizienzerhöhung usw!

Solche Herausforderungen können natürlich nicht ohne riesige Anstrengungen auf internationaler Ebene angegangen werden. Das Kyoto-Protokoll von 1997 wird als das bedeutendste internationale Abkommen bezeichnet, das in diesem Zusammenhang bis heute erreicht worden ist. Mehr als 180 Nationen verständigten sich auf länderspezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsrichtlinien. Die Ziele waren relativ bescheiden, aber trotzdem ist das Kyoto-Protokoll ins Stocken geraten. So scheinen leider selbst seine grössten Befürworter – die EU, Japan und Kanada – auf guten Weg zu sein, ihre selbst gesetzten Ziele zu verfehlen.

Für die Schweiz bedeutet das Kyoto-Abkommen, dass sie zwischen 2008 und 2012 eine 8%-Reduktion ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 erreichen muss. Mit dem CO<sub>2</sub>-Gesetz von 1999 hat unser Parlament die zu erzielende Reduktion sogar auf 10% festgesetzt. Dieses Ziel ist mit grossen Anstrengungen erreichbar. Jedoch wissen wir alle, dass dies hauptsächlich dank einem wichtigen Faktum gelingen kann, nämlich unserer beispielhaften Stromversorgung, die fast 100% auf CO<sub>2</sub>-freien Wasser- und Kernkraftwerken basiert. Wären die fünf schweizerischen KKW's nicht da, lägen unsere heutigen CO<sub>2</sub>-Emissionen 30% über jenen von 1990 und das Erreichen des Kyoto-Ziels, nämlich eine 10%-Reduktion, wäre ein tatsächlich unmögliches Unterfangen.

### **3. Gegenwärtiger Beitrag der Kernenergie zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses**

Wie bereits erwähnt, muss man bezüglich CO<sub>2</sub> global denken und nicht nur länderspezifisch. Kehren wir also auf das gesamte Weltbild zurück, um zu sehen, was die Kernenergie zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses leistet. Heute liefern 445 KKW's in 31 Ländern 365 GW elektrische Leistung. Letztes Jahr wurden 2'525 Terawattstunden nukleare Elektrizität produziert, was 16% der weltweiten Stromproduktion entspricht, oder anders gesagt, 6% der kommerziellen Versorgung von primärer Energie weltweit.

Bevor wir genauer anschauen, was dies im Sinne von CO<sub>2</sub>-Verminderung bedeutet, vergleichen wir die Treibhausgasemissionen in der gesamten Energiekette für die verschiedenen Energieträger. Diese Tabelle (**Tabelle 1**) gibt in Einheiten von gC<sub>äq</sub>/kWh Durchschnittswerte für Kohle, Öl, Erdgas, Sonnenenergie (Photovoltaik), Wasserkraft, Biomasse, Wind und Kernenergie. Es ist leicht zu erkennen, dass selbst unter den nichtfossilen Energieträgern die Kernenergie eine der CO<sub>2</sub>-ärmsten ist.

Unter der Annahme, dass der gegenwärtig von KKW's erzeugte Strom von modernen, mit fossilen Brennstoffen gefeuerten Kraftwerken produziert würde, kommt man zum Schluss, dass die Kernenergie heute den energieproduktionsbezogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoss weltweit um mehr als 8% verringert. Für den Elektrizitätssektor allein betrachtet beträgt die effektive Verminderung 17%.

Für einzelne Ländergruppierungen kann das Bild viel markanter ausfallen. So z. B. lägen in den OECD-Ländern ohne Kernenergie die entsprechenden elektrizitätsbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen um einen Drittel höher. Dies entspricht einer jährlichen Einsparung von 1'200 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, oder 10% des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstosses, den der Energieverbrauch in dieser Gruppe entwickelter Länder verursacht. Wenn man bedenkt, dass das Kyoto-Abkommen von den OECD-Ländern eine Gesamtreduktion (gegenüber 1990) von 700 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> verlangt, würde ein globaler Ausstieg aus der Kernenergie (z. B. gemäss deutschem Vorbild) nahezu eine Verdreifachung der zu erzielenden Reduktion benötigen.

Die folgende Figur (**Figur 3**) zeigt uns die durch den weltweiten Einsatz von Kern- und Wasserkraftwerken erzielten Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Jahren 1965-1993. Es ist klar ersichtlich, dass 1965 der Beitrag der Kernenergie fast vernachlässigbar war. Hingegen war die 1995 durch den Einsatz der Kernenergie erzielte prozentuale Verminderung fast gleich gross wie jene der Wasserkraft, nämlich ca. 8%.

Noch eindeutiger ist der Fall Frankreichs, wie diese zwei Bilder zeigen (**Figuren 4, 5**). Im ersten sieht man die Beiträge der verschiedenen Energieträger zur Stromversorgung der Electricité de France (EdF) während der Jahre 1980-1993. Klar zu bemerken ist, wie in weniger als zwei Jahrzehnten die stark wachsende Kernenergie in Frankreich die Rolle der fossilen Brennstoffe bei der Elektrizitätsproduktion fast völlig übernommen hat.

Die nächste Figur gibt die entsprechende Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der EdF wieder, eine in der Tat beeindruckende Abnahme – von über 80 Millionen Tonnen im Jahr 1980 auf ca. 15 Millionen in 1993, und dies trotz der praktischen Verdoppelung der produzierten Terawattstunden. Wenn man betrachtet, dass der Beitrag der Wasserkraft in diesem Zeitraum ungefähr konstant blieb, ist ganz klar, dass die erreichten Verbesserungen für die Umwelt dem starken Anstieg der Kernenergieproduktion des Landes zuzuschreiben sind.

#### **4. Der «Kohlenstoff-Wert» und die effektiven Vergleichskosten für die Kernenergie**

Ich möchte nun zu einem andern Aspekt der Kernenergie-Debatte kommen, nämlich der Betrachtung ihrer Wirtschaftlichkeit, nicht im Vergleich zu den zur Zeit sowieso viel zu teuren „neuen Erneuerbaren“ wie Wind- und Sonnenenergie, sondern im Vergleich zur Verbrennung fossiler Brennstoffe für die Stromerzeugung. Oft wird argumentiert, dass die Kernenergie besonders in Ländern, in denen die Sicherheitskultur „genügend vorhanden“ ist, z. B. in den USA oder in Westeuropa, überhaupt nicht konkurrenzfähig sei. Die These, die ich hier verfolgen werde, ist, dass eine solche Aussage heute, ohne Mitberücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Verminderung durch die Kernenergie, nicht tragbar ist. In diesem Zusammenhang soll man den Begriff des „Kohlenstoff-Werts“ einführen und dafür kann man nochmals auf das Kyoto-Protokoll Bezug nehmen.

Um bei der Erfüllung der Emissionsreduktionsziele der einzelnen Länder eine grössere Flexibilität zu erlauben, werden im Rahmen dieses internationalen Abkommens einige spezielle Mechanismen definiert. Einer von diesen ist der sogenannte „Emissionshandel“-Mechanismus, gemäss dem ein potentieller Käufer ein Land ist, in welchem die Kosten für die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen hoch sind. Mögliche Verkäufer wären Länder, in denen solche Kosten tiefer liegen bzw. dessen Emissionen schon heute unter ihren Kyoto-Zielen sind (z. B. gewisse Länder in Zentral- und Ost-Europa).

Unabhängig von den debattierbaren Vor- und Nachteilen des Emissionshandelsmechanismus hat uns seine Formulierung im Rahmen des Kyoto-Protokolls erlaubt, eine objektive Quantifizierung des wirtschaftlichen Werts der Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen vorzunehmen. So wurde z. B. von der internationalen Energieagentur (IEA) eine Studie durchgeführt, in der man die ökonomischen Beziehungen zwischen wirtschaftlichen Aktivitäten, Energieverbrauch und Kosten sowie einen optimierten Einsatz alternativer Energieträger genau berücksichtigte. Das Resultat dieser Studie ergab für eine sich im Gleichgewicht befindende Marktsituation einen Handelspreis von 32 US\$ pro Tonne CO<sub>2</sub>, oder den Kohlenstoff-Wert von 118 US\$ pro Tonne Kohlenstoff.

Der erste nationale Plan weltweit, der einen Handel mit Treibhausgas-Emissionen regelte, wurde im Jahr 2002 in England lanciert. Das gesamte CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsziel in diesem Plan ist relativ bescheiden, nämlich 4 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> bis Ende 2007, oder nur 5% der Gesamtmenge, die im Kyoto-Abkommen für Grossbritannien festgelegt wurde. Trotzdem haben wir ein konkretes Beispiel von einer „Marktöffnung“ für CO<sub>2</sub>-Emissionen, und der Preis, der resultierte, war ca. 53 UK£ pro Tonne CO<sub>2</sub> oder, um bei den gleichen Einheiten zu bleiben, 282 US\$ pro Tonne Kohlenstoff.

Die folgende Figur (**Figur 6**) zeigt uns nun die wahren Vergleichskosten für die Kernenergie, wenn man, wie es sein sollte, einen solchen Kohlenstoff-Wert in der Berechnung mitberücksichtigt. Man hat hier verschiedene mögliche Zahlen für diesen Wert angenommen. Der Variationsbereich von 0-150 US\$ pro Tonne Kohlenstoff schliesst allerdings bei weitem nicht das obige Beispiel Grossbritanniens mit dem Marktwert von über 280 US\$ ein. Die anderen Annahmen in dieser Figur sind ein Diskontsatz von 10% bei der Berechnung der Kernenergiekosten sowie Faustregel-Zahlen für die Ermittlung der effektiven Kosten für den aus mit Gas und Kohle befeuerten Kraftwerken erzeugten Strom. (Die benützte Faustregel ist, dass ein Kohlenstoff-Wert von 1 US\$ pro Tonne Kohlenstoff zu Erhöhungen von 0.01 US¢/kWh bzw. 0.025 US¢/kWh im Fall von Gas bzw. Kohle führt.)

Man sieht nun, dass für die hier als Beispiel betrachteten fünf Länder – die USA, Spanien, Südkorea, Frankreich und Kanada – selbst ein bescheidener Kohlenstoff-Wert von 100 US\$ pro Tonne Kohlenstoff die Kernenergie wesentlich billiger als Kohle macht. Im Fall von Erdgas bleiben die Stromgestehungskosten nur in den USA tiefer. Natürlich müssen wir nicht unbedingt viel über den hier angenommenen Erdgaspreis diskutieren – die starken Preisschwankungen nach oben während der letzten Monate wegen der verschärften Situation in Irak dienen als genügendes Zeichen der Unzuverlässigkeit in dieser Beziehung.

## **5. Nachhaltigkeit und Kernenergie**

Erlauben Sie mir, meine Damen und Herren, das Thema ein wenig zu erweitern.

Eingangs habe ich kurz angedeutet, dass heutzutage viel von einer nachhaltigen Zukunft der Menschheit gesprochen wird und dass die CO<sub>2</sub>-Problematik eigentlich zu diesem breiten Themenkreis gehört. Unsere Vereinigung, wie die schweizerische Regierung selbst, hat längst erkannt, dass die Energieerzeugung in unserem Lande, wie überall auf der Erde, eine Schlüsselfrage in Sachen „Nachhaltigkeit“ darstellt. So hat vor vier Jahren unsere Sektion, die Schweizerische Gesellschaft der Kernfachleute (SGK), ihre eigene Studie mit dem Titel „Nachhaltige Entwicklung und Energie“ veröffentlicht. Ich möchte hier Ihre Geduld nicht zu stark strapazieren und die wichtigen Schlüsse dieser und anderer ähnlicher Studien auflisten. Trotzdem würde ich das Thema „Kernenergie und CO<sub>2</sub>“ ungern mit den breiteren Perspektiven unverknüpft belassen.

Obwohl immer wieder neue Interpretationen des Begriffs vorkommen, ist es schwierig, eine bessere Definition der „Nachhaltigkeit“ zu finden als diejenige der internationalen „Brundtland-Kommission“ des Jahres 1987, nämlich „Entwicklung, die die heutigen Bedürfnisse zu decken vermag, ohne für künftige Generationen die Möglichkeiten zu schmälern, die eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“. Damit ist klar eine Solidarität nicht nur zwischen der heutigen und den künftigen Generationen, sondern auch zwischen den entwickelten Ländern und der Dritten Welt gemeint. So kommt uns das früher dargelegte Bild eines globalen, stark wachsenden Energiehungers eindeutig unvermeidbar vor.

Alle seriösen Studien haben mittlerweile aufgezeigt, dass für eine ziemlich lange Übergangsphase auf *keinen* der heute eingesetzten Energieträger verzichtet werden kann, um den Energiehunger der Welt zu stillen. Trotzdem betrachten verschiedene Länder, vor allem ein Teil der industrialisierten, die CO<sub>2</sub>-freie Kernenergie als nachhaltigkeitsuntauglich. So wird auch in der Schweiz, wenn es z. B. um eine Energiesteuer geht, die Kernenergie in die gleiche Kategorie eingeordnet wie die fossilen Energieträger, während der Wasserkraft und den neuen Erneuerbaren ein Sonderstatus eingeräumt wird.

Meines Erachtens ist die Kernenergie grundsätzlich nachhaltigkeitsstauglich und sie hat zudem ein grosses Entwicklungspotential. Sicher kann sie in der oben erwähnten langen Übergangsphase neben den fossilen Brennstoffen und der Wasserkraft eine entscheidende Rolle spielen, bis die neuen erneuerbaren Energien im technologischen und kommerziellen Sinn Marktreife erlangt haben. Noch wichtiger scheint mir die Tatsache, dass die Kernspaltung in weiter entwickelter Form die Möglichkeit bietet, über viele Jahrhunderte hinweg ein CO<sub>2</sub>-freier und damit umweltfreundlicher Eckpfeiler der Energieversorgung der Welt zu bleiben.

Heute werden vor allem die folgenden Behauptungen bezüglich der Kernenergiegewinnung als Argumente gegen eine solche These, also gegen ihre Nachhaltigkeit, vorgebracht:

1. Sicherheitsrisiken der KKW's: Die Kernkraftwerke mit ihrem heutigen Stand an Sicherheit stellen gemäss dieser Argumentation ein zu grosses Risiko für die Umwelt dar, besonders bezüglich der Konsequenzen eines möglichen schweren Unfalls.
2. Begrenzte Ressourcen und fehlende Regulierung: Hier wird gesagt, dass die Weltressourcen für die Kernenergie wie bei den fossilen Brennstoffen begrenzt seien; zudem sollen Spaltstoffinventare, die bei der Kernenergiegewinnung vorkommen, eine Gefahr aus Sicht der Proliferation von Kernwaffen bilden.

3. Langlebige Toxizität der radioaktiven Abfälle: Das langlebige Radiotoxizitätsinventar von zu lagernden nuklearen Abfällen, wird gesagt, ist eine Bedrohung für die Gesundheit zukünftiger Generationen.

Gehen wir kurz auf jeden dieser Punkte ein.

### **Sicherheit der KKWs**

Bezüglich Risiken von schweren Unfällen, meine Damen und Herren, ist keine Energiequelle gefahrlos. Diese Figur stammt aus der vorher erwähnten SGK-Nachhaltigkeitsstudie (**Figur 7**) und vergleicht die Risiko-Kurven für schwere Unfälle im Fall von fossilen Brennstoffen, Wasserkraft und Strom aus KKWs westlicher Bauart. Gezeigt wird für jede dieser Kategorien der Stromproduktion die entsprechende Risiko-Kurve, nämlich die Häufigkeit von Unfallereignissen pro GWe-Jahr als Funktion der Anzahl resultierender Todesfälle. Die benutzten Daten beziehen sich auf Statistiken für die Periode 1969-1996. Kein einziges Ereignis für KKWs westlicher Bauart kommt, wie wir alle wissen, in diesen Statistiken vor. Die Häufigkeitsschadensausmasskurve für die Kernenergie, die von konservativen probabilistischen Sicherheitsanalysen abgeleitet wurde, liegt ungefähr zwei Grössenordnungen unterhalb derjenigen der Wasserkraft, die übrigens auf den Statistiken von neun konkreten schweren Unfällen in dieser Kategorie, also auf den Daten von neun Grossdambruchereignissen, beruht.

Auf dieser Basis kann man kaum argumentieren, dass die nukleare Stromerzeugung weniger nachhaltigtauglich sei als die der Wasserkraft. Aus der Figur ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-5}$  dafür, dass sich während eines Betriebsjahrs von einem 1-GWe-KKW ein schwerer Unfall mit bis zu 100 Todesfällen ereignen kann. Modernere und zukünftige Reaktoren sollen diese niedrige Wahrscheinlichkeit um noch eine weitere Grössenordnung verringern. Dies gilt schon für die nächste Anlage, die in Europa gebaut wird, nämlich den EPR, ein moderner Druckwasserreaktor, bei welchem man auf die Reduktion der radiologischen Folgen eines hypothetischen schweren Unfalls besondere Aufmerksamkeit gelegt hat. Wir haben glücklicherweise die Gelegenheit, heute diesen neuen Reaktortyp im nächsten Vortrag von Herrn Dr. Güldner näher kennen lernen zu dürfen.

### **Spaltstoffressourcen und ihre Regulierung**

Sprechen wir nun über die Behauptung, dass die weltweiten Ressourcen für die Kernspaltung fast so begrenzt sind wie diejenigen von fossilen Brennstoffen und dass zudem Spaltstoffinventare in der Kernenergienutzung ein grosses Proliferationsrisiko darstellen.

Der gegenwärtige Schätzwert für die wirtschaftlich abbaubaren Reserven von Natururan beträgt ca. 17 Millionen Tonnen. Beschränkt man sich auf die Art und Weise, wie Kernenergie heutzutage erzeugt wird, nämlich hauptsächlich durch den Einsatz von Leichtwasserreaktoren in sogenannten „once-through“-Zyklen, ist es tatsächlich so, dass uns das in der Erdkruste vorhandene Uran in ca. 60 Jahren ausgehen könnte. Dies zeigt uns diese Figur (**Figur 8**), in welcher der kumulative Uranverbrauch von Leichtwasserreaktoren bis zum Jahr 2100 angedeutet wird.

Allerdings deswegen von knappen Ressourcen der Kernenergie zu sprechen ist eindeutig falsch, da der multiplikative Effekt von grob einem Faktor 60 auf der Urannutzung, den man

durch die Einführung von schnellen Brutreaktoren erreichen würde, hier gar nicht berücksichtigt ist. Die untere Kurve in der Figur zeigt, wie man den Uranbedarf mit der Einführung von schnellen Reaktoren im Jahr 2030 – zum Beispiel wenn der Uranpreis dies auch rechtfertigen wird – nahe zu einem konstanten Wert führen könnte.

Bezüglich des Arguments der knappen Ressourcen möchte ich Sie, jenseits des schnellen Brütters, an zwei andere Fakten erinnern. Erstens gibt es viel mehr Uran auf der Erde als die erwähnten 17 Millionen Tonnen, die heute als wirtschaftlich abbaubar betrachtet werden. Denken wir nur an die 4 Milliarden Tonnen, die in den Ozeanen vorkommen – zwar sehr verdünnt, aber wie von japanischen Forschern dargelegt in mittelfristig ökonomisch ausbeutbarer Form. Zweitens vergessen wir nicht das Thorium, das andere Brutmaterial, das die Natur uns geschenkt hat. Wie wir wissen, führt es in einem Reaktor zum neuen Spaltstoff U-233 und kommt in der Erdkruste in mehrfach grösserer Mengen vor als das Natururan. Gesamthaft betrachtet kann man in der Tat von Weltressourcen sprechen, die erlauben, dass die Kernspaltung über viele Jahrhunderte hinweg als wichtige CO<sub>2</sub>-freie Energiequelle nutzbar bleibt.

Nun, was das Proliferationsrisiko von kommerziellen kernenergiebezogenen Spaltstoffinventaren betrifft, möchte ich zuerst sagen, dass es bis heute kein einziges Land gegeben hat, das mit Materialien aus der friedlichen Nutzung der Kernspaltung eine Atommacht geworden ist. Es handelte sich immer entweder um waffenfähiges Plutonium, das in Forschungsreaktoren erzeugt wurde, oder hoch angereichertes Uran aus militärischen Anreicherungsanlagen. Das Plutonium z. B., das sich in abgebrannten Brennelementen aus den KKW's befindet, ist wegen seiner „schlechten“ isotopischen Zusammensetzung bei weitem nicht attraktiv als Waffenmaterial. Allerdings ist es wahr, dass, falls die Kernenergie, wie es sein sollte, ein starkes globales Wachstum erfährt, der Regulierung von zivilen Spaltstoffinventaren eine viel grössere Bedeutung eingeräumt werden muss.

In dieser Beziehung sind die Wiederaufarbeitung und die Pu-Rezyklierung sehr wichtige Massnahmen, um die gegenwärtig zunehmenden Spaltstoffmengen in abgebrannten Brennelementen zu verringern. Längerfristig wird das Plutonium aus Leichtwasserreaktoren für schnelle Reaktoren benötigt. Dies wird dann, wie ich kurz erläutern werde, zu einer Gleichgewichtssituation führen, in der weder von fehlenden noch von überflüssigen Spaltstoffressourcen die Rede sein wird.

### **Toxizität der radioaktiven Abfälle**

Gehen wir zum dritten und letzten Punkt über – zur Kritik bezüglich der langlebigen Toxizität der radioaktiven Abfälle.

Diese Figur (**Figur 9**) zeigt uns in vereinfachter Form die potentielle Gefahr, die von drei verschiedenen Arten von hochaktiven Abfällen aus Kernkraftwerken ausgeht. Die Radiotoxizität des betrachteten Inventars ist jeweils verglichen mit derjenigen der Menge Uranerz, das zur Erzeugung des entsprechenden Nuklearstroms benötigt würde. Die oberste Kurve gibt die Toxizität der Gesamtmenge der Aktiniden und Spaltprodukte aus einem KKW, der in „once-through“ oder offenem Brennstoff-Kreislauf betrieben wird, also ohne Wiederaufarbeitung und Rezyklierung. Selbst nach einer Abklingzeit von 10'000 Jahren bleibt die Toxizität dieser Abfälle höher als der „natürliche“ (Uranerz-) Wert. Würde man Uran und Plutonium von den Abfällen trennen, würden die verbleibenden Abfälle, wie die zweite Kurve

zeigt, den Referenzwert in weniger als 2'000 Jahren erreichen. Mit der Trennung von den weniger wichtigen Aktiniden, den sogenannten „minor actinides“ – Neptunium, Amerizium und Curium – ergäbe sich der Schnittpunkt schon in 3-4 Jahrhunderten (die dritte Kurve).

Klar ist diese Darstellung idealisiert. Man hat hier z. B. den Einfluss von Wiederaufarbeitungsverlusten vernachlässigt. Trotzdem sieht man ziemlich eindeutig, dass die Radiotoxizität der Abfälle über einen sehr langen Zeitraum hauptsächlich von den „minor actinides“ bestimmt wird. Die Motivation, diese Aktiniden zu trennen und wie das Plutonium in fortgeschrittenen Reaktoren zu rezyklieren, ist klar ersichtlich. Jedoch gibt es einige technische Hürden. Obwohl die „minor actinides“ mit schnellen Neutronen spaltbar sind, können sie aus sicherheitsbezogenen Betrachtungen nicht alleine als Brennstoff in kritischen schnellen Reaktoren eingesetzt werden. Entweder müssen sie dem Plutonium beigemischt oder in unterkritischen, beschleunigergespeisten Systemen gespaltet werden. In jedem Fall handelt es sich hier um eine sogenannte Transmutation der „minor actinides“, die nur durch den Einsatz von neu zu entwickelnden Reaktorkonzepten und Wiederaufarbeitungstechnologien zu erzielen ist.

In diesem Zusammenhang möchte ich eine Tatsache besonders unterstreichen. Die Transmutation von langlebigen Aktiniden wird nie die Notwendigkeit einer geologischen Endlagerung beseitigen. Es geht darum, im Fall des zu realisierenden starken Ausbaus der Kernenergie, die Inventare von hochaktiven Stoffen zu minimieren, die über einen langen Zeitraum zu lagern sind. Die folgende Figur (**Figur 10**) zeigt uns, wie die stark wachsenden Mengen von radioaktiven Schwernukliden im Fall des „once-through“-Zyklus auf dramatische Art und Weise unter Kontrolle gebracht werden können, wenn der Brennstoff-Kreislauf durch den kombinierten Einsatz von Leichtwasserreaktoren und fortgeschrittenen schnellen Reaktoren völlig geschlossen wird.

Auf die Gewährleistung des sicheren geologischen Einschlusses von relativ bescheidenen radioaktiven Abfallvolumen wird im Vortrag von Herrn Dr. Fritschi eingegangen. Ich bin mir sicher, dass wir uns auch in dieser Beziehung von der grundsätzlichen Nachhaltigkeit der Kernenergie überzeugen lassen werden.

### **Zukünftige Reaktoren und ihre Symbiose**

Wie einige von Ihnen, meine Damen und Herren, schon wissen, ist in letzter Zeit die Notwendigkeit, die CO<sub>2</sub>-freie Kernenergie weiterzuentwickeln, von elf Ländern und internationalen Organisationen, darunter auch die Schweiz, anerkannt worden. Die Zusammenarbeit der Partner im Rahmen des sogenannten „Generation IV International Forum (GIF)“ ist lanciert worden, mit dem Ziel, bis zum Jahr 2030 eine neue Generation von Kernkraftwerken entwickelt zu haben, die mit den modernen Reaktoren von heute eine nachhaltige Symbiose bilden können.

Die Figur hier (**Figur 11**) zeigt uns die Entwicklung der kommerziellen Kernenergie seit ihrer Geburt Anfang der 50er-Jahre. Heute befinden wir uns bei der Generation III, d. h. bei modernen Leichtwasserreaktoren wie dem EPR. Bei den neuen Reaktorkonzepten der Generation IV sollen die potentiellen Stärken der Kernenergie, die uns zur Zeit fehlen, verwirklicht sein; nämlich:

- (a) Ressourcenschonung und Abfallminimierung durch die Implementierung eines völlig geschlossenen Brennstoffkreislaufs, der die kontinuierliche Rezyklierung von Spaltstoffen sowie der langlebigen „minor actinides“ ermöglicht.
- (b) Hohe Betriebstemperaturen mit Kühlmitteln bis zu 1'000 Grad, so dass die KKW's für chemische Prozesse zur Produktion von Wasserstoff eingesetzt werden können und wodurch grosse Anwendungsmöglichkeiten der Kernenergie in anderen Sektoren wie dem Transport eröffnet werden.

Als Beispiel der vom GIF vorgeschlagenen Reaktorkonzepte sehen Sie hier die schematische Darstellung vom „Gas-Cooled Fast Reactor“ (**Figur 12**). Obwohl es in diesem Bild hauptsächlich um die Stromerzeugung bei einem thermodynamischen Wirkungsgrad von 50% geht, wäre ein solches KKW im Jahr 2030 auch in der Lage, die obigen neuen Stärken der CO<sub>2</sub>-freien Kernenergie zu erzielen.

Diese letzte Figur (**Figur 13**) zeigt uns, wie die Zukunft für die Kernspaltung aussehen könnte. Wir sehen, wie Forschung und Entwicklung einerseits evolutionär fortschreitet, so dass die heute bereits etablierte Leichtwasserreakorttechnologie weiter verbessert wird. Auf der andern Seite werden durch internationale Zusammenarbeit wie das GIF neue Reaktorkonzepte und neue Wiederaufarbeitungstechnologien bis zur kommerziellen Reife aufgebaut. Diese werden die Regulierung von Spaltstoffressourcen und die Minimierung langlebiger Abfälle ermöglichen und gleichzeitig die Ausdehnung der Kernenergie auf Grossanwendungen in anderen Sektoren als der Elektrizitätserzeugung erlauben. Es ist die aufgezeigte Symbiose zwischen den verschiedenen Reaktortypen, jeder mit seinen eigenen Stärken, die schliesslich die CO<sub>2</sub>-freie Kernspaltung als nachhaltigen Eckpfeiler der weltweiten Energieproduktion etablieren wird.

## 6. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend, meine Damen und Herren, haben wir gesehen, dass die bedrohende Klimaveränderung wegen der CO<sub>2</sub>-Problematik die Menschheit zum Handeln zwingt. Jeder heute im grossen Massstab verfügbare Energieträger muss mittelfristig seinen Beitrag leisten, um den stark wachsenden Energiehunger auf unserem Planeten zu stillen. Gleichseitig müssen die neuen erneuerbaren Energien bis zur kommerziellen Reife entwickelt werden, um die CO<sub>2</sub>-freie Energieproduktion, die heute hauptsächlich von Wasser- und Kernenergie erbracht wird, zu verstärken.

Dass die Kernenergie nachhaltigkeitsstauglich ist und ein beachtliches Weiterentwicklungspotential aufweist, muss allgemein anerkannt werden. Und hier liegt wohl unsere grösste Herausforderung – die Öffentlichkeit und dadurch die Politik voll davon zu überzeugen. Nur dann wird es möglich, diese CO<sub>2</sub>-freien Energieträger – mit ihrer Wirtschaftlichkeit, ihren gesicherten Ressourcen sowie ihren minimalen Risiken für Umwelt und Gesundheit – stark auszubauen.

Lassen Sie mich schliessen mit einem Zitat von James Lovelock, einem der Gründer der Bewegung der Grünen, der in letzter Zeit mit seinen pointierten Äusserungen zur Kernenergie für einiges an Furore in den Medien gesorgt hat. Im Vorwort zum Buch „Umweltschutz durch Kernenergie“ von Bruno Comby schreibt Professor Lovelock:

„Ich hoffe, es ist noch nicht zu spät für unsere Welt, Frankreich zu kopieren und die Kernenergie zu unserer Hauptenergiequelle auszubauen. Es gibt zur Zeit keinen sichereren, realisierbaren und ökonomischeren Ersatz für die gefährliche Praxis, die auf Kohlenstoff basierenden Brennstoffe zu verheizen“.

Meine Damen und Herren, ich danke Ihnen herzlich für Ihre Aufmerksamkeit und Geduld.

### **Verwendete Literatur**

1. M. I. Hoffert *et al.*, „Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet“, *Science*, Vol. 298, pp. 981-987 (2002).
2. „Climate Change 2001: Synthesis Report, Summary for Policymakers“, United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001.
3. „Nuclear Energy and the Kyoto Protocol“, Report of the OECD/NEA Nuclear Development Committee, 2002.
4. J. Browne, „Beyond Kyoto“, *Foreign Affairs*, Vol. 83, No. 4 (2004).
5. „Nachhaltige Entwicklung und Energie“, Schweizerische Gesellschaft der Kernfachleute (SGK), 2000.
6. „A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems“, U.S. Department of Energy, 2003.
7. D. Butler, „Nuclear Power’s New Dawn“, *Nature*, Vol. 429, pp. 238-240 (2004).
8. R. Chawla, „L’énergie nucléaire dans un contexte global“, Actes de la Journée du Ceupe 1998, Université de Genève, 1998.
9. J. Lovelock, Vorwort zu „Umweltschutz durch Kernenergie“ von B. Comby, 2001.

## Figuren und Tabelle

Fig. 1: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Durchschnittstemperaturänderungen der Erdatmosphäre während 1860-2000 (von [2]).

Fig. 2: Entwicklung der Weltbevölkerung in der Periode 1750-2150.

Fig. 3: Weltweit durch Wasserkraft und Kernenergie erzielte Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1965 und 1993 (von [3], Fig. 3 abgeleitet).

Fig. 4: Energieträger-Beiträge zur Stromversorgung der Electricité de France (EdF) zwischen 1980 und 1993 (von [3], Fig. 4 abgeleitet).

Fig. 5: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der EdF zwischen 1980 und 1993 (von [3], Fig. 5 abgeleitet).

Fig. 6: Stromkostenvergleiche zwischen Kernenergie (10% Diskontsatz), Kohle und Erdgas für verschiedene angenommene „Kohlenstoff-Werte“ (von [3], Fig. 4 abgeleitet).

Fig. 7: Vergleich zwischen der Risiko-Kurven für fossile Brennstoffe, Wasserkraft und KKWs westlicher Bauart (von [5], Seite 27 abgeleitet).

Fig. 8: Ausnützung der weltweiten Uranressourcen unter Verwendung von Leichtwasserreaktoren alleine sowie unter Einführung von schnellen Brütern im Jahr 2030. (von [6]).

Fig. 9: Radiotoxizität der hochaktiven Abfälle aus einem Leichtwasserreaktor im Vergleich zum entsprechenden „natürlichen“ (Uranerz-) Wert (von [8], Fig. 4 abgeleitet).

Fig. 10: Vergleich der Mengen zu lagernder radioaktiver Schwernuklide im Fall von „once-through“ und völlig geschlossenen Brennstoffzyklen (von [6]).

Fig. 11: Entwicklung der kommerziellen Kernenergie (von [6]).

Fig. 12: Schematische Darstellung vom „Gas-Cooled Fast Reactor“, eines der vom GIF vorgeschlagenen neuen Reaktorkonzepte (von [6]).

Fig. 13: Ein mögliches Zukunftsszenario für die Kernenergie. Die grosse Ellipse deutet auf eine nachhaltige Symbiose verschiedener Reaktortypen hin.

Tabelle 1: Vergleich der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen (gC<sub>äq</sub>/kWh) für Kohle, Öl, Erdgas, Sonnenenergie (Photovoltaik), Wasserkraft, Biomasse, Wind und Kernenergie (von [3], Tab. 2 abgeleitet).

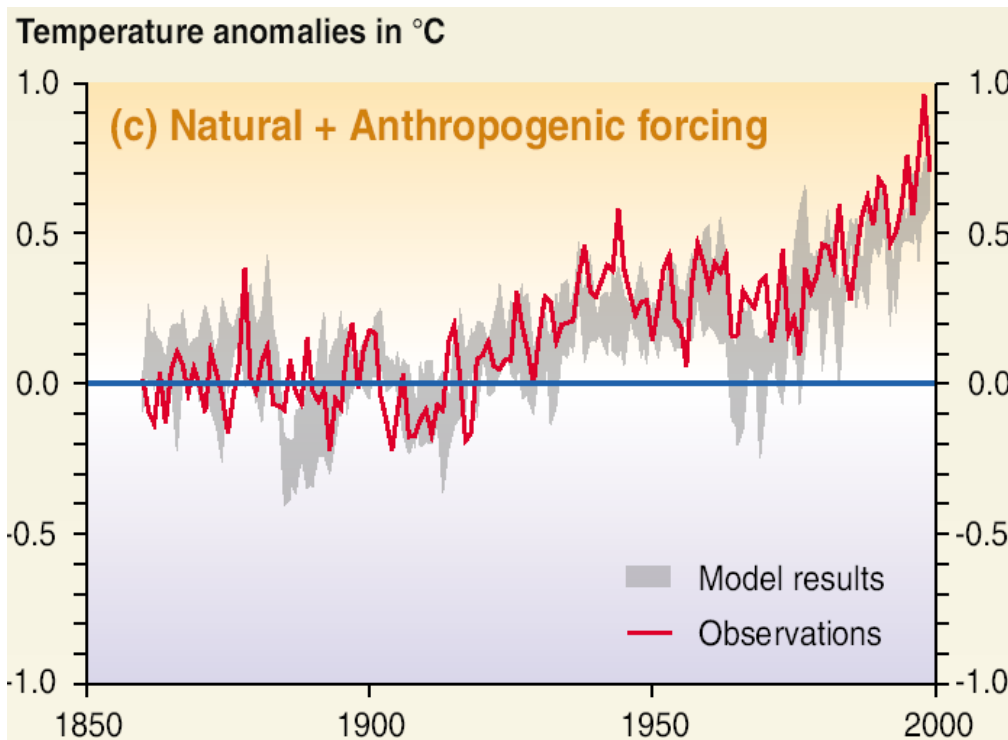


Fig. 1: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Durchschnittstemperatur-Änderungen der Erdatmosphäre während 1860-2000 (von [2]).

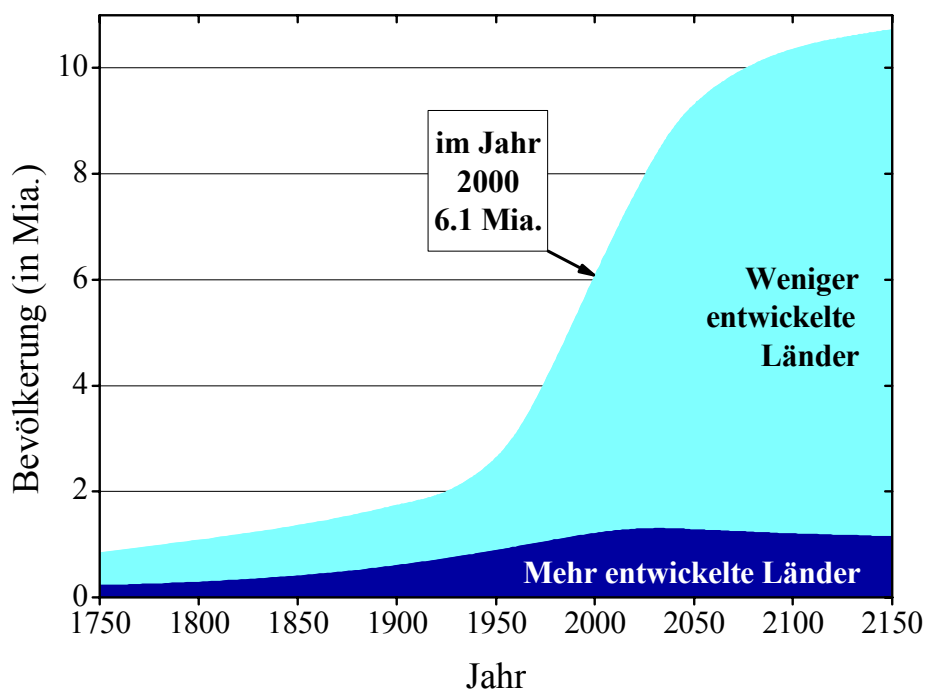


Fig. 2: Entwicklung der Weltbevölkerung in der Periode 1750-2150.

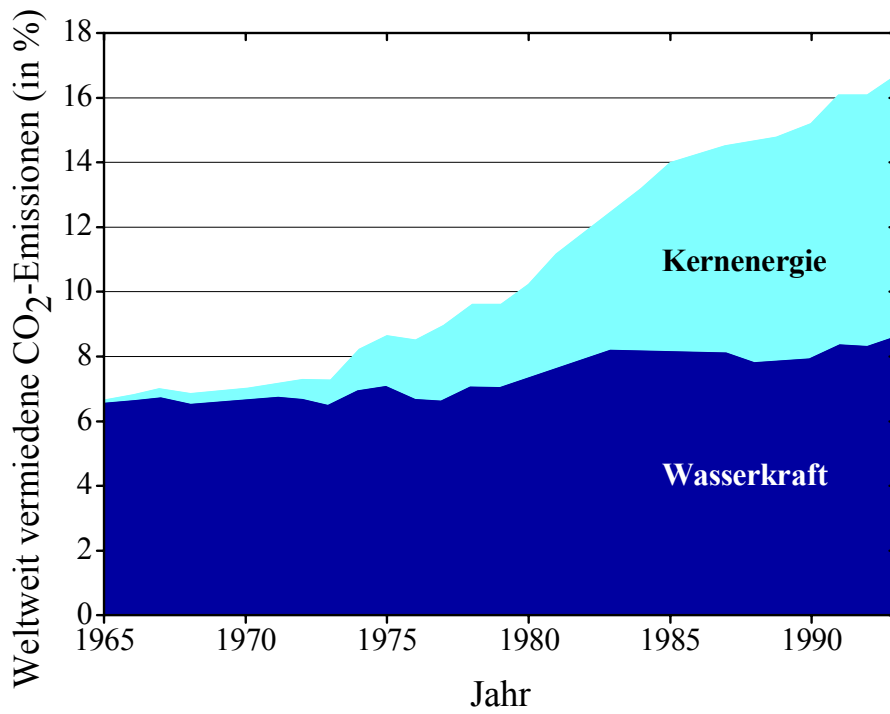


Fig. 3: Weltweit durch Wasserkraft und Kernenergie erzielte Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1965 und 1993 (von [3], Fig. 3 abgeleitet).

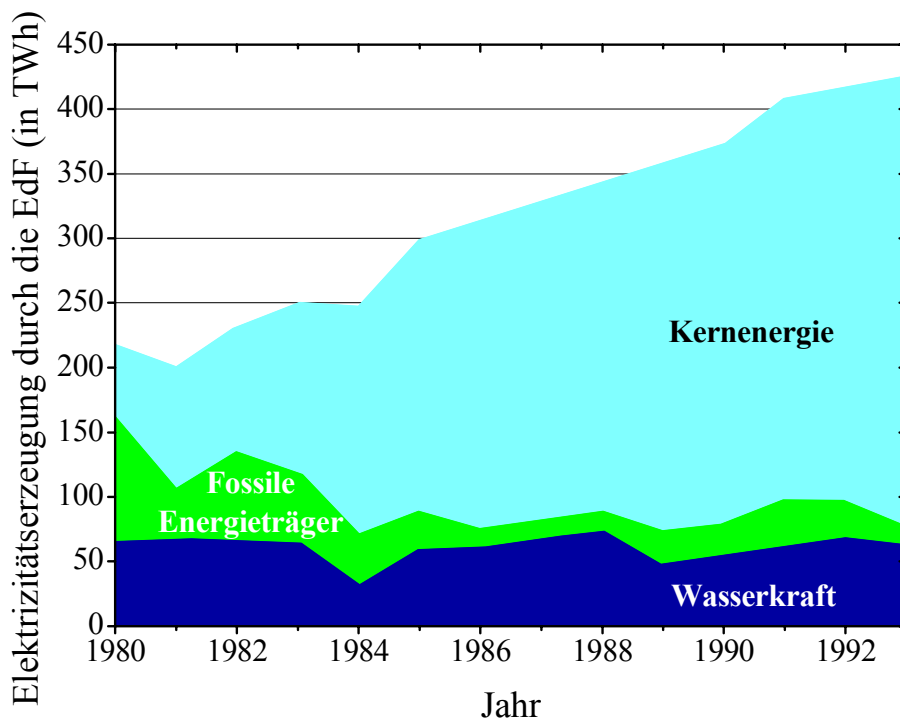


Fig. 4. Energieträger-Beiträge zur Stromversorgung der Electricité de France (EdF) zwischen 1980 und 1993 (von [3], Fig. 4 abgeleitet).

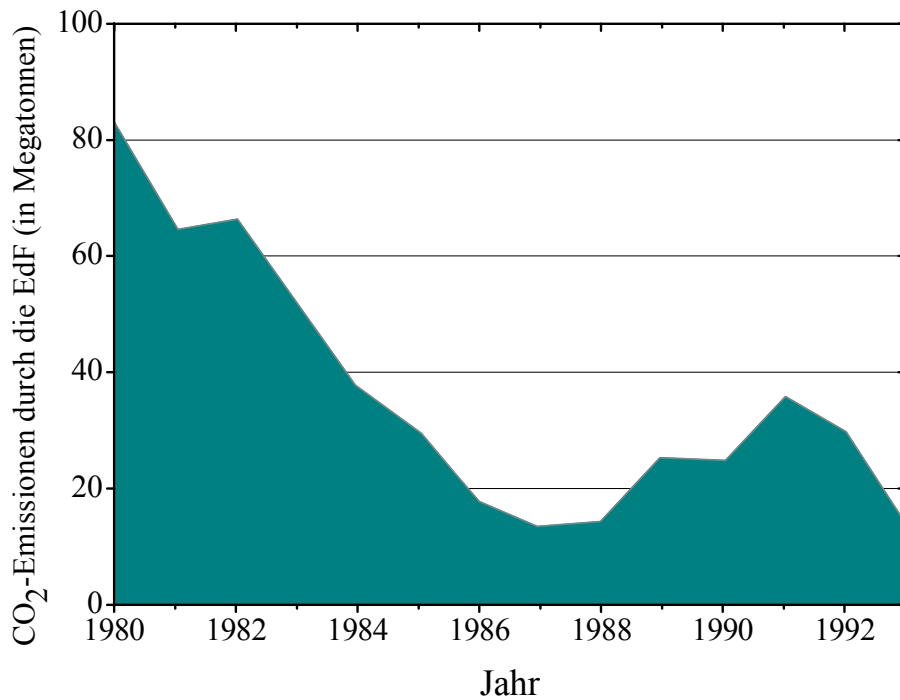


Fig. 5: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der EdF zwischen 1980 und 1993 (von [3], Fig. 5 abgeleitet).

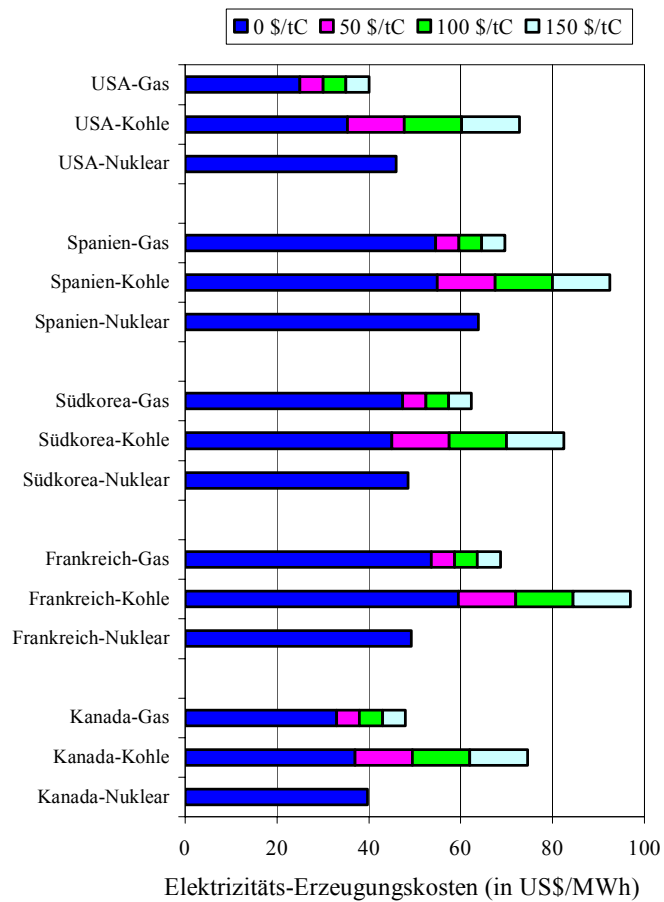


Fig. 6: Stromkostenvergleiche zwischen Kernenergie (10% Diskontsatz), Kohle und Erdgas für verschiedene angenommene „Kohlenstoff-Werte“ (von [3], Fig. 4 abgeleitet).

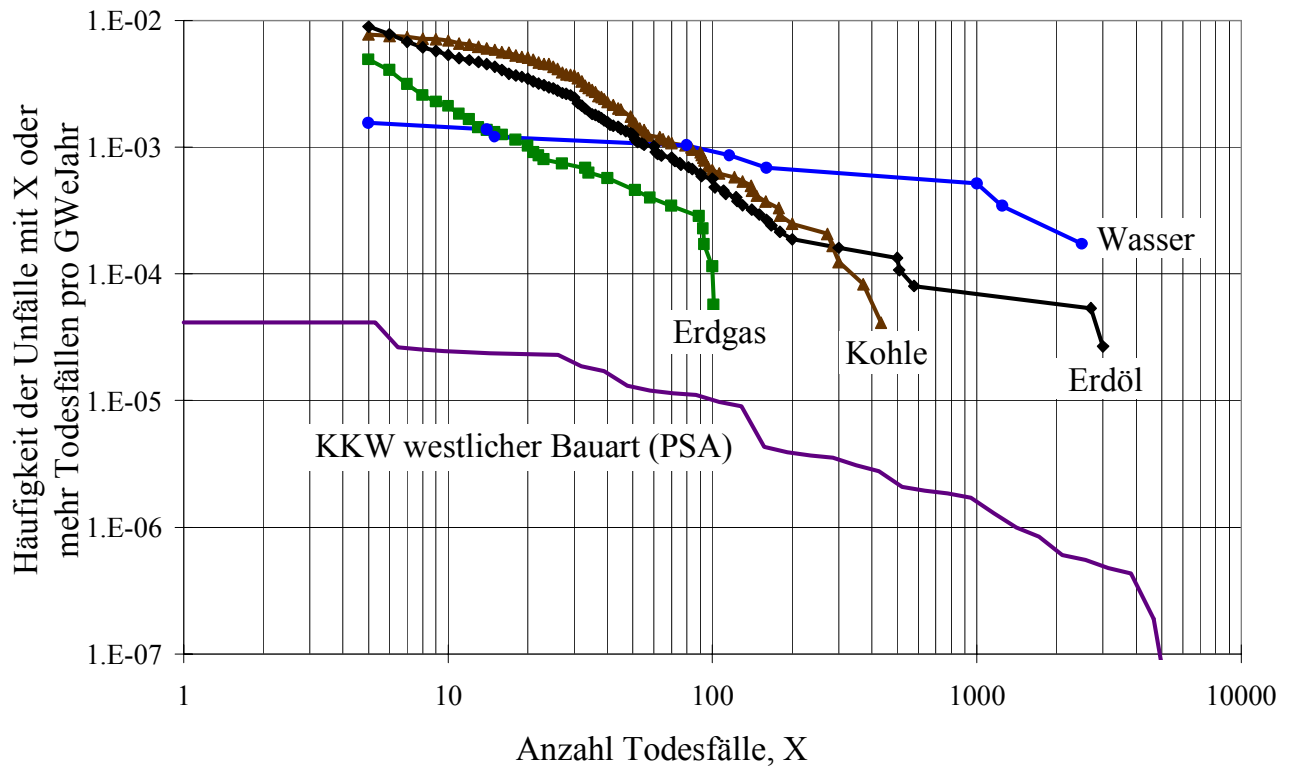


Fig. 7: Vergleich zwischen der Risiko-Kurven für fossile Brennstoffe, Wasserkraft und KKW's westlicher Bauart (von [5], Seite 27 abgeleitet).

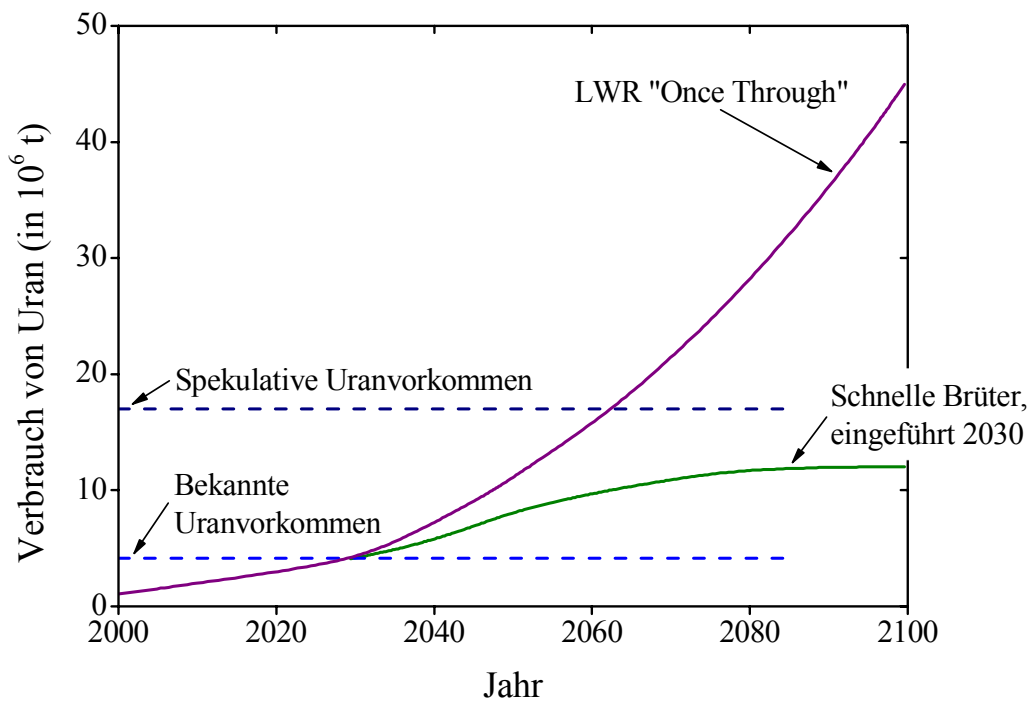


Fig. 8: Ausnützung der weltweiten Uranressourcen unter Verwendung von Leichtwasserreaktoren alleine sowie unter Einführung von schnellen Brüttern im Jahr 2030. (von [6]).

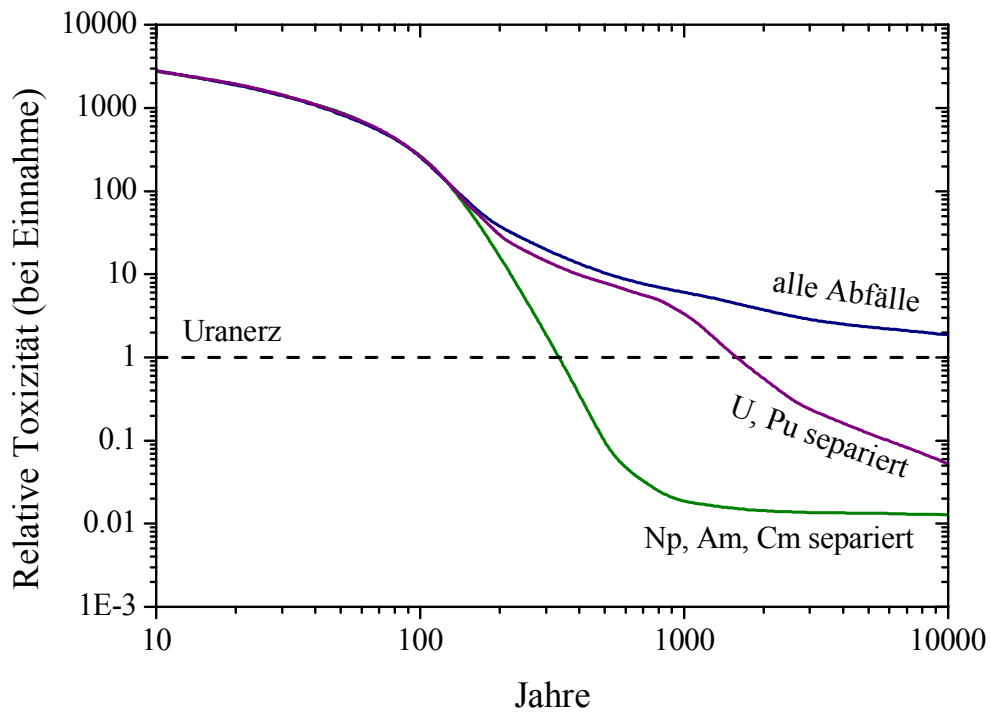


Fig. 9: Radiotoxizität der hochaktiven Abfälle aus einem Leichtwasserreaktor im Vergleich zum entsprechenden „natürlichen“ (Uranerz-) Wert (von [8], Fig. 4 abgeleitet).

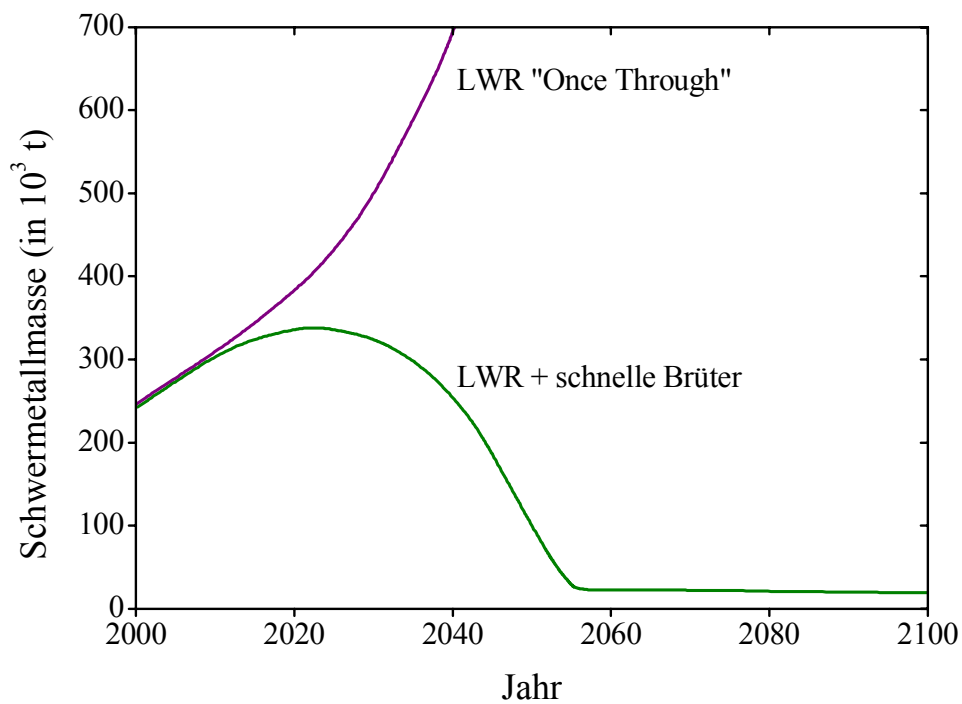


Fig. 10: Vergleich der Mengen zu lagernder radioaktiver Schwernuklide im Fall von „once-through“ und völlig geschlossenen Brennstoffzyklen (von [6]).

## The Evolution of Nuclear Power

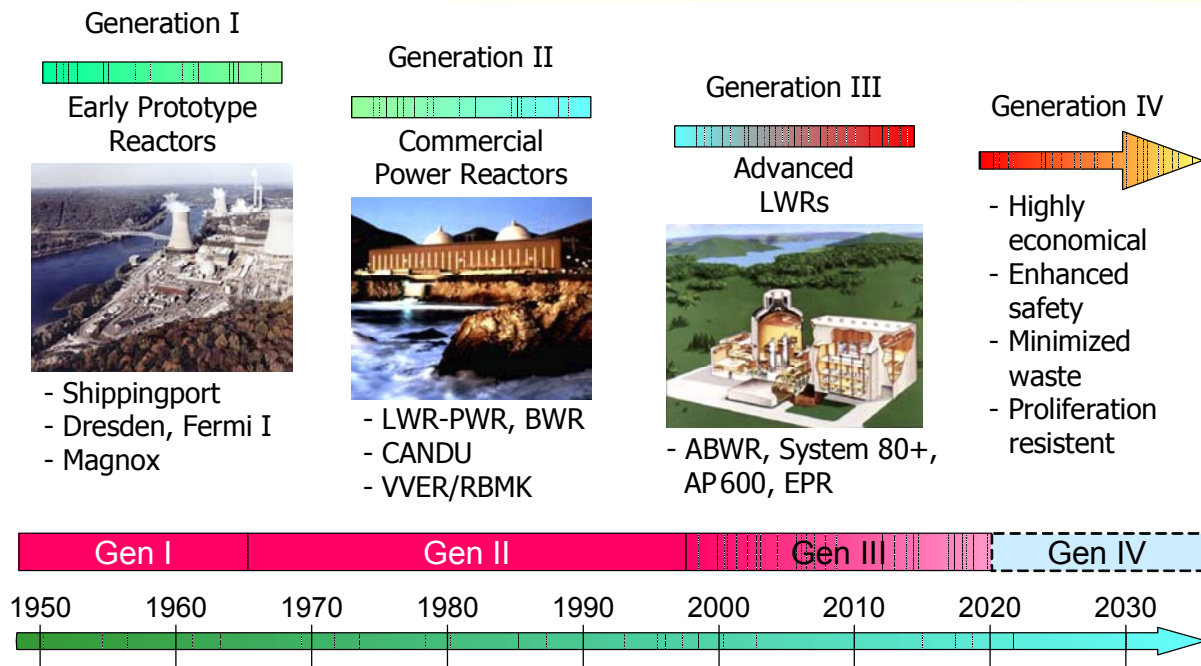


Fig. 11: Entwicklung der kommerziellen Kernenergie (von [6]).

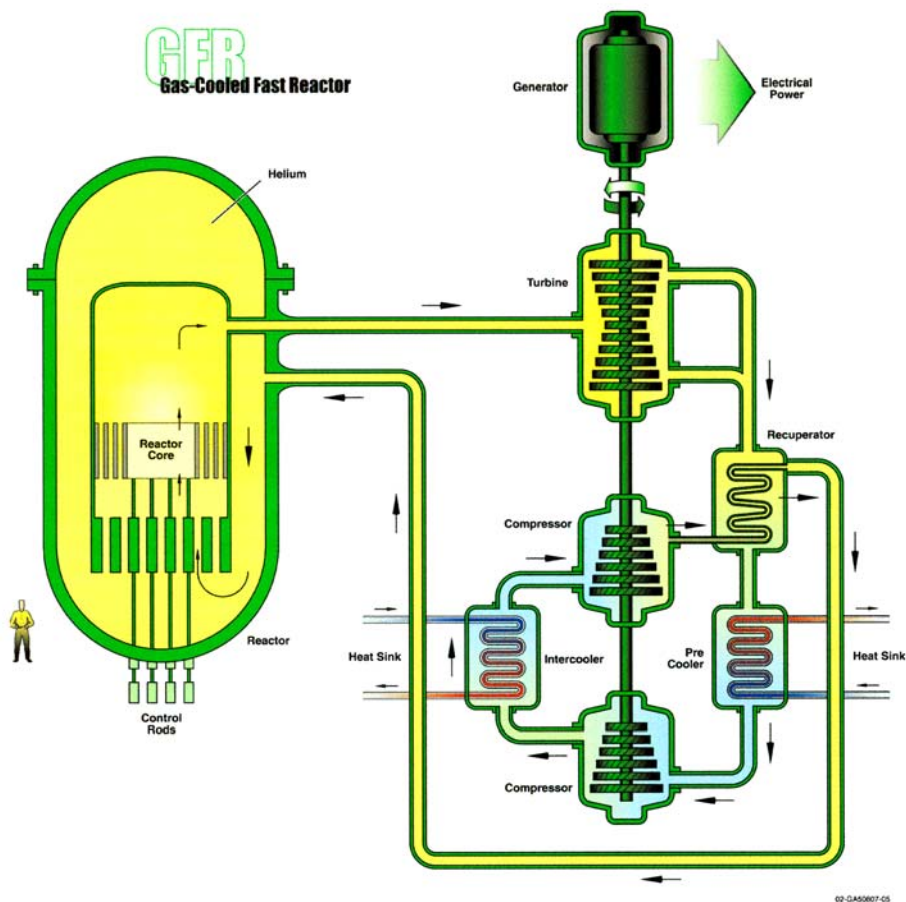


Fig. 12: Schematische Darstellung vom „Gas-Cooled Fast Reactor“, eines der vom GIF vorgeschlagenen neuen Reaktorkonzepte (von [6]).

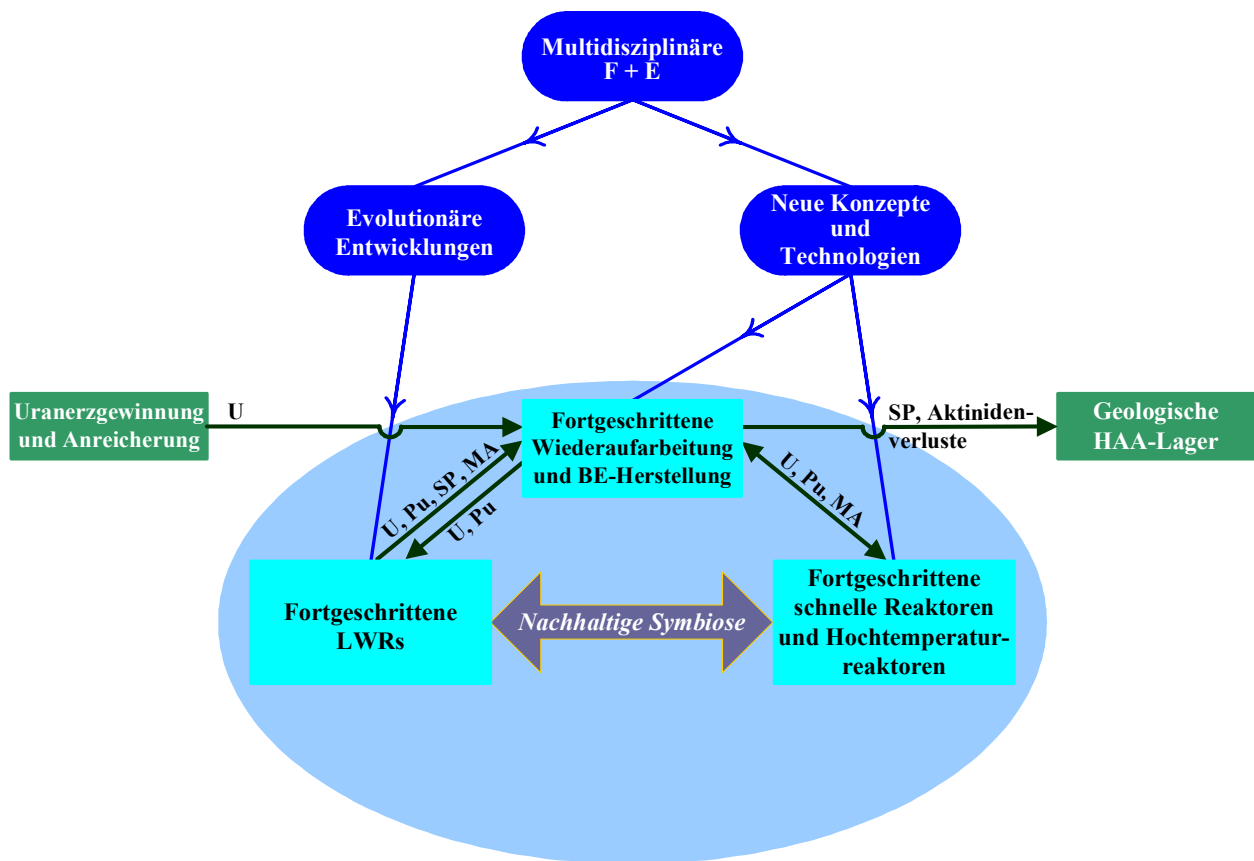


Fig. 13: Ein mögliches Zukunftsszenario für die Kernenergie. Die grosse Ellipse deutet auf eine nachhaltige Symbiose verschiedener Reaktortypen hin.

Tabelle 1: Vergleich der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen ( $\text{gC}_{\text{äq}}/\text{kWh}$ ) für Kohle, Öl, Erdgas, Sonnenenergie (Photovoltaik), Wasserkraft, Biomasse, Wind und Kernenergie (von [3], Tab. 2 abgeleitet).

<i>Energieträger</i>	<i>Kraftwerks-Emissionen</i>	<i>andere Kettenglieder</i>	<i>Total</i>
<i>Kohle</i>	246	24	270
<i>Erdöl</i>	163	27	190
<i>Erdgas</i>	109	21	130
<i>Solar (PV)</i>	0	30	30
<i>Wasserkraft</i>	0	19	19
<i>Biomasse</i>	0	12	12
<i>Wind</i>	0	7	7
<i>Kernspaltung</i>	0	4	4