

Die zukünftige Rolle der Kernenergie in Europa

Häufig gestellte Fragen (FAQ)

N. Müllner, W. Liebert, W. Kromp, S. Sholly, G. Kastchiev,
K. Gufler, N. Arnold, W. Renneberg

Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften



lebensministerium.at

Wien, 13. Juni 2013



Häufig gestellte Fragen (FAQ)

Das vorliegende Dokument "häufig gestellte Fragen" (FAQ) – stellt eine Sammlung von Fragen und Antworten zur Verfügung, die die wesentlichen Aspekte der Debatte um die Zukunft der Rolle der Kernenergie in Europa abdecken. Die Information ist klar und einfach gehalten und verwendet technische Begriffe nur, wenn dies absolut erforderlich ist, dennoch wird darauf geachtet, präzise und wissenschaftlich zu argumentieren. Daher sind die FAQ besonders für interessierte Personen geeignet, die einen raschen und dennoch genauen Überblick über die Debatte brauchen.¹

Allgemeines

1. Mit Blick auf den Klimawandel – geht es ohne Kernenergie?

Ja. Ende 2011 war der Anteil der Kernenergie am gesamten Primärenergiebedarf² 5,6% (der Anteil der nuklear erzeugten Elektrizität war Ende 2011 12,3%). Der Anteil der Kernenergie ist hinreichend klein, um durch andere Energieformen oder Maßnahmen, wie z.B. Energieeffizienzverbesserungen, ersetzt werden zu können. Effizienzmaßnahmen haben in den vergangenen Jahrzehnten mehr zur Befriedigung des wachsenden Energiebedarfs beigetragen, als die Kernenergie, und die Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz sind noch nicht ausgeschöpft.³

2. Kann die Kernenergie die Rolle fossiler Brennstoffe nach dem „globalen Ölfördermaximum“⁴ übernehmen?

Nein. Die Kernenergie kann nicht die Rolle fossiler Brennstoffe übernehmen. Die Kernenergie wird derzeit hauptsächlich zur Stromerzeugung eingesetzt, wogegen fossile Brennstoffe (besonders Erdöl) in einem breiteren Bereich eingesetzt werden, insbesondere für den Güter- und Personentransport. Der Transportsektor müsste Wasserstoff/elektrisch basiert sein, wenn die Kernenergie eine signifikante Rolle spielen sollte. Abgesehen von der Tatsache, dass dazu noch sehr viel Forschung und Entwicklung erforderlich wäre, sind die Uran-Ressourcen nicht unbegrenzt. Würde die Kernenergie von morgen an die weltweite Stromversorgung übernehmen, dadurch die fossil erzeugte Elektrizität

¹ Die FAQ basieren auf den FAQ in Kromp-Kolb et al. (2007): "Nuclear Power, Climate Policy and Sustainability"

² Primärenergie ist eine Energieform, die in der Natur existiert, bevor eine Umwandlung oder Transformation in eine andere Energieform stattfindet, z.B. Erdöl, Natururan, Energie in fallendem oder fließendem Wasser, Energie des Windes, usw.

³ Wie dies möglich ist, wird in IASA/GEA Council: Global Energy Assessment. Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, USA, 2012, mit dem Szenario „Efficiency Energy Pathway“ dargestellt.

⁴ Mit dem "globalen Ölfördermaximum" (Peak Oil) wird der Zeitpunkt bezeichnet, bei dem die globale Ölproduktionsrate unwiderruflich abzunehmen beginnt und die Ölpreise wegen der Verknappung ansteigen.

ersetzen, und den Energiebedarf des Transportsektors abdecken, würden die Uranvorkommen in weniger als einem Jahrzehnt aufgebraucht sein⁵.

3. *Ist nicht die Kernenergie – sauber und CO₂-frei – die einzige nachhaltige Lösung des Energiedilemmas?*

Nein. Die Kernenergie ist weder nachhaltig noch CO₂-frei. Um die Kriterien der Nachhaltigkeit zu erfüllen, muss eine Technologie in Hinblick auf die Umwelt und makroökonomisch einwandfrei sein, zudem sozial akzeptabel, vom Menschen beherrschbar (dazu gehört, dass alle potenziellen technischen, sozialen, und ökologischen Konsequenzen umfassend beurteilt werden können), flexibel und fehlertolerant. Die Technologie muss auch die Entwicklung der Nachhaltigkeit unterstützen. Die Kernenergie erfüllt keines dieser Kriterien. Betrachtet man den gesamten Brennstoffzyklus, vom Uranabbau bis zur Endlagerung, ist die Kernenergie sicher nicht CO₂-frei, auch wenn sie weniger CO₂ produziert, als Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen. 2008 schätzte Sovacool die Emissionen, die hauptsächlich vom Uranabbau und der Urananreicherung herrühren, auf im Mittel 66 Gramm CO₂ pro kWh für Druckwasserreaktoren (DWR) und Siedewasserreaktoren (SWR) ab⁶.

Die Energiesituation

4. *Wie groß ist die gegenwärtige globale Kapazität der Kernkraftwerke?*

Im Jahr 1996 produzierten die Kernkraftwerke 16% der Gesamtstrommenge weltweit, aber seither gab es eine langsame aber kontinuierliche Abnahme auf 12,3% oder etwa 2.500 TWh (2.500 Milliarden kWh) im Jahr 2011. Insgesamt waren damals 435 Blöcke in Betrieb mit einer gesamten Stromerzeugungskapazität von 369 GWe⁷ (inklusive der 55 Kernkraftwerke in Japan, wo die Entscheidung über die Wiederaufnahme des Kernenergieprogramms nach wie vor aussteht).

5. *Wird der Beitrag der Kernenergie zur Stromerzeugung in der Zukunft zunehmen?*

Wie Niels Bohr sagte: „Es ist schwierig Vorhersagen zu machen, speziell über die Zukunft.“ Dennoch

⁵ Im "Nuclear Energy Outlook", NEA No. 6348, 2008, schätzte die Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD, dass die Uranvorkommen mit einem Produktionskostenaufwand von weniger als 130 USD/kgU, die 2007 bekannt waren, um 2050 aufgebraucht sein würden, wenn die Kernenergie zu diesem Zeitpunkt 22% des Bedarfs an Elektrizität liefern könnte (OECD/NEA „High“-Szenario). Schnelle Brüter müssten in diesem Szenario eingesetzt werden. Es gibt aber bisher kaum kommerzielle Erfahrung mit Brüter-basierter Kernenergie, die Entwicklung muss noch erfolgen (siehe FAQ Nr. 22).

⁶ Benjamin K. Sovacool, "Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey", Energy Policy 36 (2008) p. 2940–2953

⁷ Die Zahlenangaben sind aus "Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050", IAEA Reference Data Series, 2012 Edition

veröffentlichen Institutionen, wie die Internationale Atomenergieorganisation (IAEO), die International Energy Agency (IEA), die Nuclear Energy Agency der Organization for Economic Co-operation and Development (OECD/NEA) periodische Prognosen über den Kernenergieausbau und den Anteil der nuklear erzeugten Elektrizität an der gesamten Stromerzeugung. Die IAEO veröffentlicht jährlich Schätzungen zu Energie, Elektrizität und Kernenergie für den Zeitraum bis 2050 ("Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050"). In der Ausgabe 2012 wurden, basierend auf Daten einer Country-by-Country-Auswertung zum Bau von Kernkraftwerken, Lebensdauererweiterungen, Stilllegungen, ökonomischen Wachstums, usw., zwei Szenarien dargestellt. In einem „Low“-Szenario⁸ wird ein leichter Anstieg der nuklear erzeugten Elektrizität prognostiziert. Allerdings wird eine Abnahme des Anteils der nuklear erzeugten Elektrizität an der gesamten Stromerzeugung vorhergesagt. Im „High“-Szenario wird ein konstanter Anteil prognostiziert.

Das International Institute for Applied System Analysis (IIASA) verfolgt in seiner globalen Energiebewertung "Global Energy Assessment" (GEA) von 2012 einen anderen Weg für seine Szenarien: anstatt anzunehmen, dass die gegenwärtigen und bereits beschlossenen zukünftigen energiepolitischen Maßnahmen, mit geringen Modifikationen und Unsicherheiten bis 2050 fortgesetzt werden, wird festgehalten, dass „zur Erzielung einer nachhaltigen Entwicklung alle erforderlichen Attribute von Energieversorgung, nämlich Verfügbarkeit, Erschwinglichkeit, Zugänglichkeit, Sicherheit, Gesundheit, Klima- und Umweltschutz, gleichzeitig erfüllt werden müssen⁹. Um dieses Ziel zu erreichen, müsse das Energiesystem dramatisch geändert werden. Daher werden mögliche „Energiepfade“ entworfen, die in eine nachhaltige Zukunft auf globalem Level führen können. Interessanterweise wird in dem „Energiepfad Effizienz“ (GEA-efficiency) für 2050 ein Ausstieg aus der Kernenergie vorgesehen.

6. Welche Änderungen der Stromerzeugung werden bis 2035 erwartet?

Nach dem weltweiten Energieausblick 2012 (World Energy Outlook 2012) der International Energy Agency (IEA) war die gesamte Stromerzeugung 21.400 TWh im Jahr 2010. Das Szenario „neue Energiepolitik“ (new policy scenario) der Prognose erwartet, dass die Stromerzeugung weltweit auf mehr als 36.000 TWh bis 2035 ansteigen wird (eine jährliche Wachstumsrate im Zeitraum 2010-2035 von 2,3%), wobei fast die Hälfte des Anstiegs durch Indien und die Volksrepublik China erfolgen soll.

⁸ Im „Low“-Szenario wird geschätzt, dass die jährlich erzeugte Elektrizität von 2518 TWh im Jahr 2011 auf 3594 TWh im Jahr 2030 ansteigt, und auf 3780 TWh im Jahr 2050. Der Anteil der Kernenergie wird in diesem Szenario von 12,3% im Jahr 2011 auf 10,4% im Jahr 2030 und auf 5,0% im Jahr 2050 abnehmen. Das „High“-Szenario sagt einen in etwa konstanten Anteil voraus (12,3% im Jahr 2011, 13,6% im Jahr 2030 und 12,2% im Jahr 2050).

⁹ IIASA/GEA Council: Global Energy Assessment. Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, USA, 2012.

Es wird erwartet, dass der Anteil von Erdgas und erneuerbaren Energien (ohne Wasserkraft) über den Vorhersagezeitraum hin ansteigen wird. Ein Drittel der zusätzlichen Kapazität wird entsprechend der Prognose durch den Ersatz stillgelegter Kraftwerke benötigt, die restlichen zwei Drittel decken den Anstieg des Strombedarfs, der zwischen jetzt und 2035 erwartet wird.

7. Welche Erwartungen gibt es für den Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2035, als Anteil der gesamten Stromerzeugung?

Die International Energy Agency (IEA) erwartet in der Ausgabe 2012 des "World Energy Outlook" (gemäß seines Szenario „neue Energiepolitik“), dass der prozentuale Anteil der erneuerbaren Energien zur gesamten Stromerzeugung von gegenwärtig 20% auf 31% im Jahr 2035 ansteigen wird. In diesem Szenario wird angenommen, dass die gegenwärtigen politischen Maßnahmen zusammen mit den absehbar erfolgenden Maßnahmen bis 2035 durchgeführt werden. Das International Institute for Applied System Analysis (IIASA) wählt in seinem "Global Energy Assessment" (GEA) eine andere Annahme. Hier wird angenommen, dass zum Erreichen des so genannten „Zwei-Grad-Ziels“¹⁰ ehrgeizigere Maßnahmen nötig sind, nämlich ein Anteil der erneuerbaren Energien von 74% der gesamten Stromerzeugung bis 2050. Die Europäische Kommission hat sich auf das so genannte 20-20-20-Ziel festgelegt, was bedeutet, dass im Jahr 2020 eine 20-%ige Reduktion der Treibhausgasemissionen bezogen auf das Niveau von 1990 erreicht werden soll, der Anteil der erneuerbaren Energien am EU-Energieverbrauch 20% erreichen soll und die Energieeffizienz in der EU um 20% verbessert werden soll.

8. Welche Rolle spielt die Energieeffizienz in all diesen Prognosen?

Energieeffizienz ist von überragender Bedeutung in allen Energieszenarien. Die International Energy Agency (IEA) prognostiziert, dass die globale Energieintensität um 1,8% pro Jahr zwischen jetzt und 2035 abnehmen wird, im Vergleich zu einer Abnahme von nur 0,5% pro Jahr im vergangenen Jahrzehnt. Viele der ökonomischen Potenziale der Energieeffizienz (80% im Gebäudesektor und mehr als 50% in der Industrie) bleiben bislang unausgeschöpft, meist infolge nicht-technischer Barrieren. Demzufolge bleibt ein signifikantes Potenzial zur Reduzierung des Energieverbrauchs durch Verbesserung der Energieeffizienz. Szenarien, die versuchen, die Klimaziele zu erreichen, statt die gegenwärtigen Trends fortzuschreiben, wie die IIASA/GEA-Szenarien, haben noch ehrgeizigere Ziele.

¹⁰ Das "Zwei-Grad-Ziel" ist ein Klimaziel, das den mittleren globalen Temperaturanstieg unter 2°C relativ zu vorindustriellen Niveaus halten will (ein mittlerer Temperaturanstieg von 2 Grad ist die obere Grenze für eine Anpassungsmöglichkeit der meisten Ökosysteme). Um dieses Ziele zu erreichen, müssen sich die atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen unter einem Wert von 450 ppm stabilisieren. Wenn man vom gegenwärtigen Trend in die Zukunft extrapoliert, kann das Zwei-Grad-Ziel nicht erreicht werden, - was bedeutet, dass noch radikalerer Änderungen der Politik erforderlich sind.

9. Können Kernkraftwerke in der zukünftigen Stromerzeugung eine größere Rolle spielen?

Wahrscheinlich nicht. Wenn die Kernenergie in der zukünftigen Stromerzeugung (für mehr als 60 Jahre) eine größere Rolle spielen soll, muss mindestens eine der folgenden zwei Bedingungen erfüllt sein. Die Verfügbarkeit des spaltbaren Uranisotop U-235 ist begrenzt und reicht mit den gegenwärtigen Reaktortechnologien nur für einen beschränkten Zeitraum. Das heißt, es müssen entweder schnelle Reaktoren und Brüter eingesetzt werden, die Plutonium als Brennstoff benutzen (ein „Brutreaktor“ kann mehr Plutonium aus dem reichlich vorhandenen Isotop Uran-238 brüten als im Brennstoff eingesetzt wird), oder die Auslegung von Kernkraftwerken muss dahin gehend geändert werden, dass Thorium-232 zum Brüten von Uran-233 eingesetzt wird, das dann als Brennstoff verwendet werden kann.

Für jede der beiden Möglichkeiten müssen erhebliche technische Schwierigkeiten überwunden werden. Brutreaktoren mit Plutonium-239-Brennstoff haben historisch gesehen schlecht funktioniert. Außer in Indien und China gibt es keine großen Brutreaktor-Forschungsprogramme, es sind für die nächsten Jahrzehnte auch keine vorgesehen und kommerzielle Anwendungen können vor 2060 nicht erwartet werden.

Indien dürfte das aktivste Programm zur Thorium-Brüter-Technologie betreiben, da es nur 1-2% der weltweiten Uranreserven besitzt, aber geschätzte 30% der weltweiten Thorium-Reserven. Aber auch Indien erwartet den Betrieb großer Thorium-basierter Reaktoren erst nach 2050.

Zusammenfassend erscheint ein langfristiger Einsatz von Kernenergie zur Stromerzeugung unwahrscheinlich, da die begrenzten Uranreserven eine Verschiebung zu Brüter-Technologien erforderlich machen, deren technische Probleme aber noch nicht gelöst sind.

Kernenergieausbau

10. Befindet sich die Kernenergie in einer Ausbauphase wie in den 1970ern und 1980ern?

In den 1970er und 1980er Jahre fand eine starke Expansion der Kernenergie mit im Mittel 19 Kernkraftwerken (KKW) pro Jahr statt. Die Hauptbeitragenden zu dieser Entwicklung waren Europa und Nordamerika. Nach den Unfällen in Three Mile Island und Tschernobyl kam der nukleare Ausbau nahezu zu einem Stillstand mit etwa 5 neuen Kernkraftwerken pro Jahr im Zeitraum 1990-2010. Der Hauptbeitrag kam in diesem Zeitraum von Asien, mit einem gewissen Beitrag aus Europa und Russland. Um 2005 begann die Diskussion über eine „Kernenergie-Renaissance“. Heute, nach dem Unfall in Fukushima Daiichi im März 2011 unterscheiden sich die Strategien der verschiedenen

Länder erheblich.

In der Europäischen Union wird erwartet, dass die Länder, die sich zu einer Reduktion des Nuklearprogramms oder zum Ausstieg entschlossen haben, jene Länder, die sich auf einen Ausbau festgelegt haben, überwiegen, so dass dies in Summe zu einem Rückgang der Kapazität führen wird. In Asien sieht es nach einem Wachstum der nuklearen Kapazität bis zum Jahr 2020 aus, hauptsächlich durch China. In Russland und anderen Ländern der früheren Sowjetunion wird es vermutlich ebenfalls zu einem Ausbau der Kernenergie kommen. Für Nordamerika wird erwartet, dass im Jahr 2020 nur wenige neue KKW betriebsfertig sein werden.

Zusammenfassend wird – global gesehen – ein Ausbau der Kernenergie beobachtet, aber der Ausbau ist längst nicht so stark wie in den 1970er- und 1980er-Jahren, und wird nicht in der Europäischen Union, den USA oder Kanada stattfinden.

11. Welcher Ausbau der Kernenergiekapazität wird bis 2030 erwartet?

Nach dem IAEA-Bericht „Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050“ von 2012 lag die gesamte KKW-Kapazität im Jahr 2011 weltweit bei 369 GWe. Die Prognosen für die zukünftige nukleare Stromerzeugungskapazität sind 421-508 GWe („low“ und „high“ Szenario) für 2020, 456-740 GWe im Jahr 2030 und 460-1137 GWe für 2050. Diese Schätzungen berücksichtigen Stilllegungen am Ende der Betriebslebensdauer. Die IAEA-Prognosen für die KKW-Kapazität im Jahr 2030 (niedrigste und höchste Werte) waren vor dem Fukushima Daiichi-Unfall um 10% höher. Allerdings war in früheren Publikationen der IAEA sogar das „low“ Szenario stets zu optimistisch geschätzt. Wenn man nur die derzeit öffentlich bekanntgegebenen Pläne zu Neubauten, Lebensdauererweiterungen und Stilllegungen von KKW berücksichtigt, kommt man zu 410 GWe im Jahr 2020 (was nahe am IAEA „low“ Szenario liegt) und zu weniger als 400 GWe im Jahr 2030.

12. Hat sich die Anzahl der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke im Jahr 2012 erhöht?

Nein. Es wurden nur zwei Kernkraftwerke ans Netz angeschlossen und zwei Blöcke wurden nach langen Stillständen wieder angefahren. Es waren zwei permanente Stilllegungen in Vorbereitung der Außerbetriebnahme und zwei geplante Blöcke wurden gestrichen. Zum Ende des Jahres 2012 waren weltweit insgesamt 64 Kernkraftwerke in Bau mit einer gesamten Stromerzeugungskapazität von 62 GWe. Der Bau von drei neuen Blöcken wurde begonnen. Nach dem Fukushima Daiichi Unfall im März 2011 wurden alle Kernkraftwerke in Japan für die jährliche Inspektion und Brennstoffwechsel abgeschaltet, waren dann für längere Zeit nicht in Betrieb und wurden – bis auf wenige Ausnahmen – auch nicht wieder ans Netz genommen. Es ist noch nicht absehbar, ob Japan zur vorhergegangenen Kernenergie-Politik zurückkehrt.

13. Kann die nukleare Option beliebig ausgeweitet werden?

Nein. Die derzeitigen Beschränkungen industrieller Kapazitäten und notwendiger Arbeitskraftreserven für den Bau von Kernkraftwerken machen einen raschen Ausbau in großem Maßstab problematisch und er wäre abhängig von politischen Entscheidungen hinsichtlich mittel- und langfristiger Investitionen in die nukleare Option.

Beitrag zur Klimapolitik

14. Welche Änderungen der Treibhausgasemissionen (GHG) werden zwischen jetzt und 2035 erwartet?

Die International Energy Agency (IEA) schätzt in ihrem World Energy Outlook 2012, dass die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe im Jahr 2011 einen Rekordwert von 31,2 Gt (Gigatonnen) erreicht haben, mit einem Anstieg von 1 Gt, oder 3,2% im Vergleich zum Jahr 2010. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe trägt etwa 60% zu den gesamten anthropogenen Treibhausgas-Emissionen von etwa 50 Gt CO₂ eq. pro Jahr bei (andere Emissionen stammen von der Abholzung, der Landwirtschaft, usw.). Der Energiesektor, d.h. der Sektor der Erzeugung von Elektrizität und Wärme, hat im Jahr 2010 etwa 12,5 Gt CO₂ eq-Emissionen (25% der Gesamtemission, 42% der Emissionen aus dem Energiebereich) verursacht.

Die Emissionen sind mit der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre direkt verbunden, wobei man annimmt, dass die CO₂-Konzentration mit der globalen mittleren Temperatur der Erde zusammenhängt. Eine Konzentration über 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre führt zu einem Anstieg von mehr als 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau. Für die meisten Ökosysteme wurden zwei Grad als kritische Grenze der Anpassungsfähigkeit an eine Temperaturänderung ausgemacht. Daher haben sich viele Staaten, besonders die Europäische Union (EU), auf das „Zwei-Grad-Ziel“ festgelegt, einem Klimaziel, das den globalen mittleren Temperaturanstieg unter 2°C halten will.

Allerdings zeigt die Extrapolation der derzeitigen Trends (auch bei Berücksichtigung der derzeit vorhersehbaren, zukünftigen Verbesserungen in der Klimapolitik), dass dieses Ziel nicht erreicht werden kann – was bedeutet, dass viel radikalere Änderungen der politischen Randbedingungen erforderlich sind. Es wird erwartet, dass bis zum Jahr 2035 die Energie-bedingten CO₂-Emissionen auf 37,0 Gt pro Jahr ansteigen werden, was vermutlich zu einer globalen Temperaturerhöhung von 3,6°C zum Ende des Jahrhunderts führen wird.

15. Ist nicht die Kernenergie der beste und billigste Weg zur Reduzierung der CO₂-Emissionen?

Nein. In IASA Global Energy Assessment 2012 werden Einschränkungen für die mögliche Nutzung der Kernenergie zur Erreichung der Klimaziele deutlich gemacht. Obwohl die Kernenergie im Prinzip potenziell zur Klimastabilisierung beitragen kann, ist ihre Nutzung kontrovers wegen „des ungelösten Problems der langfristigen Abfalllagerung, des Risikos katastrophaler Unfälle und der damit zusammenhängenden Haftungsfragen sowie der möglichen Verbreitung waffenfähigen spaltbaren Materials“. Und weiter: „eine zusätzliche Befürchtung besteht darin, dass das Ungleichgewicht in den Forschungs- und Entwicklungsbudgets mit Begünstigung der Kernenergie zu einer mangelnden Unterstützung anderer wichtiger Optionen führen kann. Verglichen mit der aktuellen Kernenergiekapazität erreichen die Forschungs- und Entwicklungsausgaben die höchsten Staatshilfen unter allen versorgungsbezogenen Optionen“¹¹. Wenn man die Kosten zur Reduzierung der CO₂-Emissionen für die verschiedenen Optionen vergleicht, kann die Kernenergie mit der Energieeffizienz nicht konkurrieren. Energieeffizienzmaßnahmen erlauben nicht nur Einsparungen bei der CO₂-Emission, sondern sparen auch Energie – was bedeutet, dass die Kosten der CO₂-Reduzierung negativ werden (man gewinnt Geld durch CO₂-Reduzierung). Keine Option, die auf Energiebereitstellung beruht, kann damit konkurrieren – insbesondere die Kernenergie nicht.

16. Kann der Ausbau der Kernenergie rasch genug erfolgen, um die Erfordernisse der Klimapolitik zu erfüllen und fossile Energien zu ersetzen?

Nein. Die benötigte Expertise und Arbeitskraft für einen solchen Ausbau der Kernenergie könnte nicht zeitgerecht verfügbar gemacht werden. Schon heute besteht in einigen Ländern ein Mangel an ausgebildetem Personal. Die in Bau befindlichen Kernkraftwerke könnten den Einsatz fossiler Energiequellen nicht kompensieren. Nur ein deutlicher Zuwachs der nuklearen Stromerzeugung könnte bewirken, dass gerade der gegenwärtige Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung erhalten bleibt. Dieser Prozentsatz ist im letzten Jahrzehnt langsam aber stetig von 16% auf 12,3% gefallen und dürfte in den nächsten zwei Jahrzehnten weiter abfallen.

17. Können die Klimaziele ohne Ausbau der Kernenergie erreicht werden?

Ja. Eines der gemeinhin akzeptierten Klimaziele ist das so genannte „Zwei-Grad-Ziel“, das bedeutet, dass die gesamten Treibhausgasemissionen, vom Beginn der Industriellen Ära bis zu einer CO₂-neutralen Wirtschaft, die in der Zukunft erreicht werden muss, einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten dürfen (dieser Grenzwert ist so festgelegt, dass die CO₂-Konzentration in der

¹¹ IASA Global Energy Assessment 2012

Atmosphäre unter 450 ppm bleibt). Dadurch soll der globale mittlere Temperaturanstieg unter 2°C bleiben, dem kritischen Wert, bei dem sich die meisten Ökosysteme noch dem Temperaturanstieg anpassen können. In dem IASA-Bericht „Global Energy Assessment“ von 2012 wird ein Energiepfad aufgezeigt, der mit dem 2°C-Wert bis 2050 kompatibel ist, und von einem Ausstieg aus der Kernenergie ausgeht. Die Stabilisierung der globalen Temperatur bei +2°C kann ohne Kernenergie erreicht werden, entweder durch Sequestration¹² einer signifikanten Menge von CO₂, oder durch Reduzierung im Wachstum des Energiebedarfs. Änderungen des Lebensstils und Änderungen der politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen könnten ebenfalls zur Erreichung der Klimaziele beitragen.

Uranversorgung für Kernbrennstoff

18. Kann die gegenwärtige Uranproduktion den gegenwärtigen Bedarf der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke decken?

Nein. Die jährliche globale Uranproduktion bleibt seit 1990 hinter dem Bedarf zurück (im Jahr 2011 lag die Produktion von 54.000 Tonnen um 20% unter dem Bedarf von 68.000 Tonnen).

19. Werden in den nächsten zwei Jahrzehnten bis 2030 Engpässe in der Uranversorgung erwartet?

Das könnte passieren. In der Vergangenheit konnte für eine Weile die Lücke zwischen Uranbedarf und -produktion durch die Überproduktion aus dem Zeitraum vor 1990 geschlossen werden, aber diese Bestände sind heute fast aufgebraucht. Gegenwärtig wird die Differenz zwischen Bedarf und Produktion nur durch die so genannten „Sekundären Ressourcen“ (Verdünnung des hoch angereicherten Urans aus militärischem Ursprung zu schwach angereichertem Reaktorbrennstoff, Wiederanreicherung von Uranresten in Abraumhalden, Wiederverwendung von Uran aus der Wiederaufbereitung und Uraneinsparungen durch die Verwendung von Plutonium in Mischoxidbrennstoffen (MOX)) geschlossen. Heute ist nur der Beitrag der erstgenannten sekundären Ressourcen mehr als marginal, aber der US-Russische Vertrag von 1992 über das „Down-Blending“ des russischen waffenfähigen Urans läuft im Jahr 2013 aus. Außerdem liegt die tatsächliche Erweiterung der primären Uranproduktion gegenwärtig hinter der Planung der großen Bergbaugesellschaften zurück. Daher könnte die Versorgung in naher Zukunft problematisch werden. Realistische Uranproduktionsszenarien für den Zeitraum bis 2030 wurden vorgestellt und zeigen, dass Versorgungslücken in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrzehnts auch in einem stationären Kernenergie-Szenario (Fortschreibung des gegenwärtigen Bedarfs) auftreten könnten.

¹² Bindung oder Lagerung von CO₂ in Reservoiren anstelle der Emission in die Atmosphäre wird Sequestration genannt.

Versorgungslücken sind wahrscheinlich für Szenarien mit Kernenergieausbau, speziell im „High Case“ der IAEO von 2012¹³, dem „High Case“ der OECD/NEA 2008¹⁴ und den Schätzungen der World Nuclear Association (WNA) („Low Case“ und „High Case“)¹⁵.

20. Wie lange würden die bekannten und vernünftigerweise vorhersehbaren Uranressourcen beim gegenwärtigen Uranbedarf ausreichen?

Die Internationale Atomenergieorganisation (IAEO) und die Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD prognostizieren, dass bei dem gegenwärtigen Bedarf die Uranressourcen für 100 Jahre ausreichen. Allerdings ist das eine theoretische Aussage. Tatsächlich wäre es besser, nur die „bestätigten und wahrscheinlichen“ Reserven („proven and probable“ reserves) für eine solche Vorhersage heranzuziehen. Zuverlässige globale Daten über diese Ressourcenklasse stehen nicht zur Verfügung, man kann aber abschätzen, dass etwa 1,4 Millionen Tonnen Uran dieser Klasse vorhanden sind. Diese Reserven würden etwa für zwei Jahrzehnte reichen (bei einer Fortschreibung des gegenwärtigen jährlichen Bedarfs von knapp 70.000 Tonnen). Sicher dürfte mehr Uran abbaubar sein. Aber die zukünftige Verfügbarkeit kann nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden und hängt von mehreren Faktoren ab, die über die Zeit hinweg zu noch größeren Unsicherheiten führen. Zu diesen Faktoren gehört die Zunahme der Abbaukosten infolge der Abnahme des Uransgehalts im abbaubaren Erz. Es besteht kein Zweifel, dass der Uranabbau mit der Zeit schwieriger und teurer wird, was voraussichtlich Auswirkungen auf die Kernenergienutzung haben wird.

Zudem wird es in der Zukunft zu einem Punkt kommen, an dem die „CO₂-neutrale“ Energieproduktion aufgrund des hohen Energiebedarfs bei der Ausbeutung minderwertiger Uranlagerstätten fragwürdig wird. Eine seriöse Prognose, wie lange die Uranressourcen reichen werden, ist nicht möglich, insbesondere weil nicht sicher ist, wie sich die zukünftige Kernenergienutzung entwickeln wird.

21. Wie lange würden die bekannten und vernünftigerweise vorhersehbaren Uranressourcen bei steigender Kernenergieproduktion ausreichen?

Ausgehend von der IAEO-Prognose von 2012, dass man mit einer Stromerzeugungskapazität von 456-740 GWe im Jahr 2030 („Low Case“ und „High Case“-Szenario) rechnen kann, könnte eine jährliche Produktion im Bereich von 3.600 – 5.800 TWh erwartet werden. Dies kann mit der im Jahr 2011 erzeugten Nuklearstrommenge von 2.518 TWh verglichen werden. Das heißt, im Jahr 2030 würde der Verbrauch der Uranressourcen um 43% bis 130% höher sein als heute. Demgemäß würden die

¹³ IAEA 2012 “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050”

¹⁴ OECD/NEA Nuclear Energy Outlook 2008

¹⁵ World Nuclear Association (WNA) 2013, „Nuclear Century Outlook Data“, Webpage snapshot

Uranressourcen, wenn sie in den kommenden Jahrzehnten nicht erheblich erweitert werden können, nicht für das 21. Jahrhundert ausreichen. Für das „High Case“-Szenario würden bis zum Jahr 2030 etwa 2,4 Millionen Tonnen Uran benötigt werden, eine Menge, die grob derjenigen entspricht, die in den letzten 70 Jahren bis heute insgesamt abgebaut wurde. Es ist nicht anzunehmen, dass die Bergbauindustrie diesen riesigen Bedarf abdecken könnte. Selbst für ein „Low-Case“-Szenario muss man die Auslegungspläne für den Betrieb der gegenwärtig in Bau befindlichen oder geplanten Reaktoren der Generation III und Generation III+ für 60 Jahre berücksichtigen¹⁶. Wenn das Niveau von 456 GWe im Jahr 2030 („Low Case“-Szenario) bis 2070 fortgeschrieben wird, würde der kumulative Uranbedarf zu einem Betrag anwachsen, der vergleichbar ist mit der von der IAEO/NEA ausgewiesenen Summe des gesamten „identifizierten“ Uranressourcen, die für Produktionskosten unter 130 \$/kg Uran abbaubar ist. Es ist unklar, ob die Bergbauindustrie dieser Herausforderung gerecht werden kann.

22. Kann Plutonium-Brüten das Problem der Uranversorgung lösen?

Schnelle Spaltreaktoren sind seit mehr als einem halben Jahrhundert Thema von Forschung und Entwicklung, dies hat aber zu keiner ausgereiften Technologie geführt. Im Gegenteil haben sich eine Menge technischer und ökonomischer Probleme, sowie Probleme hinsichtlich erforderlicher Werkstoffe, Anlagensicherheit und internationale Sicherheit herausgestellt. Selbst das effiziente Brüten von mehr Plutonium, als im Reaktorkern genutzt wird, wurde bisher nicht überzeugend nachgewiesen. Daher ist unklar, ob oder wann effiziente Plutonium-Brutreaktoren in der Zukunft verfügbar sein werden. Interessierte Teilnehmer des internationalen Generation-IV-Forums haben das ehrgeizige Ziel, in den 2030ern Brüter zu demonstrieren. Selbst wenn dies eintreten sollte, könnten die Brüter vor der Mitte des Jahrhunderts keine relevante Rolle spielen. Tatsächlich muss aber ein klimafreundliches Energiesystem bis zum Jahr 2050 etabliert sein. Wenn Gesellschaften sich danach dennoch entscheiden sollten, eine Plutonium-Wirtschaft in großem Maßstab zu starten, werden sie mit schwerwiegenden Konsequenzen durch die Handhabung riesiger Mengen an erforderlichem Plutonium konfrontiert sein, mit einem dramatischen Anstieg globaler Gefahren der nuklearen Proliferation. Zusammengefasst ist das Plutonium-Brüten keine Lösung.

Versorgungssicherheit

23. Ist Uran eine einheimische Energiequelle und trägt es zur

¹⁶ Es wird erwartet, dass diese Reaktoren der Generation III/III+ den Großteil des Kernenergieausbaus zwischen jetzt und dem Jahr 2030 ausmachen werden (im Jahr 2013 waren drei Kernkraftwerke der Generation III/III+ in Betrieb, 17 in Bau und 112 in Planung).

Versorgungssicherheit bei?

Sicherlich nicht in der Europäischen Union. Derzeit sind die Abbauaktivitäten in Kasachstan, Kanada, Australien, Namibia, Russland, Niger, Usbekistan, USA, China und der Ukraine für 94% des weltweit abgebauten Urans verantwortlich. Alle Länder mit größeren Kernenergieprogrammen in der EU sind hochgradig von Uranimporten abhängig. Weniger als 2% des Uranbedarfs der EU wird von Minen auf EU-Territorium abgedeckt. Die Kernenergie kann nicht zur Versorgungssicherheit der EU beitragen.

24. Können Kernkraftwerke erneuerbare Energien unterstützen, indem sie im Lastfolgebetrieb arbeiten?

Nein. Die meisten erneuerbaren Energiequellen (Wind und Photovoltaik) erzeugen Strom in Abhängigkeit von den veränderlichen Wetterbedingungen. Um eine strikte Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch zu erzielen, müssen innerhalb der Stromnetze auch Energiebereitsteller vorhanden sein, die im Lastfolgebetrieb arbeiten (um die Leistungsabgabe stets an den veränderlichen Bedarf während eines Tages oder am Wochenende anzupassen). Diese Funktion könnte durch Wasser- oder Gaskraftwerke erfüllt werden. Die Mehrzahl der existierenden Kernkraftwerke ist für den Grundlastbetrieb ausgelegt, um negative Auswirkungen für die Brennelemente und die großen metallischen Komponenten infolge veränderter Betriebsbedingungen (Leistung, Temperatur, Druck), thermischer Zyklen, Ermüdung, usw. zu vermeiden. Das bedeutet, dass sie bei Vollast 24 Stunden pro Tag, je nach Auslegung die meisten für 12 Monate, einige für 18 oder sogar 24 Monate arbeiten sollten. Nur wenige der existierenden Reaktoren haben eine begrenzte Befähigung, die Ausgangsleistung dem veränderlichen Bedarf während eines Tages oder Wochenendes anzupassen. Durch diese Charakteristika haben nukleare Leistungsreaktoren nur begrenzte Möglichkeiten, die Balance zwischen Produktion und Bedarf, ebenso wie die Frequenz im Netz zu regulieren. Neuere Reaktoren bieten eine begrenzte Form erweiterter Lastfolge-Tauglichkeit, z.B. kann der Areva EPR die elektrische Ausgangsleistung zwischen 990 und 1650 MW mit 82 MW pro Minute verändern. Wenn man bedenkt, dass der Anteil an zeitlich schwankenden erneuerbaren Energiequellen vermutlich ansteigt, ist dies nicht ausreichend.

Fragen in Zusammenhang mit dem Fukushima-Unfall

25. Kann man weitere schwere Unfälle nach Fukushima ausschließen?

Nein. Obwohl durch Fukushima Naturkatastrophen und schwere Unfälle nun ins Zentrum der Aufmerksamkeit gerückt sind und erste Verbesserungen an KKW ausgeführt wurden und werden, um die Wahrscheinlichkeit weiterer schwerer Unfälle zu reduzieren (allerdings sind weitere Verbesserungen und neue Sichtweisen hinsichtlich schwerer Unfälle erforderlich), können diese nicht völlig ausgeschlossen werden. Wenige der bisher stattgefundenen schweren Unfälle und Nahezu-Unfälle haben Ähnlichkeiten miteinander, und es ist wahrscheinlich, dass der nächste schwere Unfall sich von denen, die bereits stattgefunden haben, unterscheiden wird. Man muss auch berücksichtigen, dass mindestens für die nächsten 20-30 Jahre (wohl wissend, dass Laufzeitverlängerungen für die Kernkraftwerke der Generation II erfolgt sind und dass die derzeit in Bau befindlichen Reaktoren mehr als zur Hälfte ebenfalls zur veralteten Generation II-Technologie gehören) der Großteil der Gesamtbetriebszeit von laufenden Kernkraftwerken durch Generation II entstehen wird, mit einer eher bescheidenen Verminderung des Risikos für schwere Unfälle. Unter diesen Umständen ist es durchaus wahrscheinlich, dass ein weiterer schwerer Unfall innerhalb der nächsten 20-30 Jahre erfolgen wird.

26. Wie konnte ein Unfall wie in Fukushima passieren und können Unfälle wie in Fukushima wieder auftreten?

In Fukushima ereignete sich eine Naturkatastrophe, gegen die das System nicht ausgelegt war. Der Tsunami nach dem Erdbeben war 14 m hoch und überschritt die Höhe von 5,7 m, gegen die das Kraftwerk ausgelegt war. Derartige Ereignisse können nicht ausgeschlossen werden; es kann auch an den Standorten anderer Kraftwerke passieren, dass Naturkatastrophen die bei der Auslegung des Kraftwerks angenommenen Grenzwerte überschreiten. Eine periodische Überprüfung der angenommenen Naturgefährdungen und mögliche Nachrüstungen der Kraftwerke können die Risiken minimieren, diese aber nicht vollständig ausschalten. Ein Schutz gegen Tsunamis und Überflutungen kann keine Immunität gegen andere zukünftige schwere Unfälle bewirken. Die dominierenden externen Risikoquellen sind Standort-spezifisch und können von einer großen Vielfalt an Ursachen herrühren, wie Sandstürme, Hurrikane und tropische Stürme, Erdbeben, Vulkanausbrüche, Flugzeugabstürze, LNG-Tankerunfälle und so weiter.

27. Kann der Fukushima-Unfall als den „größter anzunehmender Unfall“ überschreitend bezeichnet werden (Super-GAU) und welche Lehren können für den Nachweis der Sicherheit gezogen werden?

Ja, der Fukushima-Unfall war ein Super-GAU. Der Begriff „größter anzunehmender Unfall“ (GAU) wurde in der Frühzeit der nuklearen Sicherheit verwendet und meinte einen Unfall, der in der Kraftwerksauslegung als Grenzfall betrachtet wurde. Unfälle, die über diesen Unfall hinausgehen, können als GAU-überschreitend (umgangssprachlich Super-GAU) beschrieben werden. Heute wurde anstelle von einigen Grenzfällen das Konzept der Auslegungsstö- und unfälle (design basis accident: DBA) eingeführt. Im Fall von Unfällen, die die Auslegungsbasis überschreiten, spricht man von auslegungsüberschreitenden Unfällen (beyond design basis accident: BDBA). Gemeinsam ist beiden Konzepten, dass es Unfälle gibt, gegen die eine Anlage geschützt sein muss, während das Eintreten anderer als zu unwahrscheinlich angesehen wird (Fukushima war gegen Tsunamis bis 5,7 m geschützt, aber der Tsunami, der das Kernkraftwerk traf, war 14 m hoch). In Zukunft werden bei dem Sicherheitsnachweis von Kernkraftwerken die so genannten auslegungsüberschreitenden Unfälle genauer betrachtet werden müssen.

28. Was hat sich durch Fukushima geändert – wurde die Sicherheit von Kernkraftwerken verbessert?

Fukushima hat Naturkatastrophen als Ursache schwerer Unfälle in den Fokus der Forschung gerückt, ebenso wie die schweren Unfälle selbst. Viele Kernkraftwerke haben als Reaktion auf Fukushima ihre Sicherheitsmargen diesbezüglich überprüft, nachgewiesen oder verbessert und Upgrades implementiert. Allerdings sind die Untersuchungen und Sicherheitsverbesserungen als Folge von Fukushima von Anlage zu Anlage unterschiedlich, was teilweise unterschiedlichen gesetzlichen Anforderungen oder einem unterschiedlichen Verständnis von Sicherheitskultur in den verschiedenen Anlagen zugeschrieben werden kann, so dass eine einfache, alle Kernkraftwerke umfassende Aussage nicht möglich ist.

29. Was sind die „Stress-Tests“ und können Stress-Tests die Sicherheit der KKW in Europa verbessern?

Als Folge des Fukushima-Unfalls hat der Rat der Europäischen Union ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) und die Europäische Kommission aufgefordert, Rahmen und Modalitäten für Stress-Tests mit Unterstützung der WENRA (Western European Nuclear Regulators' Association) zu entwickeln. Eine der wichtigsten Zielsetzungen war die Überprüfung der Robustheit von europäischen KKW im Fall extremer Naturereignisse und Naturkatastrophen (wie in Fukushima) und die Einschätzung der Fähigkeit der Kernkraftwerke,

auch schwere Unfälle bewältigen zu können. Die Stress-Tests wurden für alle Europäischen Kernkraftwerke nach denselben Prinzipien durchgeführt. Die Betreiber präsentierten ihre Ergebnisse in „Betreiberberichten“, die von den nationalen Behörden bewertet und in nationalen Berichten zusammengefasst wurden. Allerdings wird es wegen der großen Fülle an Material, das durch die Stress-Tests aufgedeckt wurde und die sehr unterschiedlichen Verbesserungserfordernisse in den verschiedenen Anlagen Jahre dauern, bis die Ergebnisse der Auswertungen effektiv umgesetzt sein werden – unter der Voraussetzung, dass die Verbesserungen tatsächlich wie angekündigt umgesetzt werden.

30. Hat Fukushima die Prioritäten der Energiepolitik verändert?

Ja, aber von Staat zu Staat in unterschiedlicher Weise. Länder wie Deutschland, Italien, Belgien und die Schweiz haben den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen und sogar Frankreich scheint eine erste Phase des Ausstiegs bezüglich seiner ältesten Reaktoren in Betracht zu ziehen. Die Situation in Japan bleibt nach wie vor unklar – nachdem alle Blöcke während einer Periode der Evaluation abgeschaltet waren, gibt es Anzeichen, dass Japan einen Neustart des Nuklearprogramms in Betracht ziehen könnte. Länder wie China setzen nach eine Pause und einer Revision ihrer KKW den Ausbau ihres Nuklearprogramms fort.

31. Sind die radioaktiven Freisetzungen von Fukushima mit denen von Tschernobyl vergleichbar?

Es gibt bis jetzt keine genauen Informationen zu den Freisetzungen. Es ist charakteristisch für einen schweren Unfall, dass die Zahlen zu den Freisetzungen sowohl aus Cherbobyl als auch aus Fukushima mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Der Unfall in Chernobyl war durch heftigere Prozesse gekennzeichnet, ein Großteil des radioaktiven Materials, das im Kraftwerk vorhanden war, wurde freigesetzt. Aber während in Chernobyl nur ein (etwas größerer) Block betroffen war, wurden in Fukushima vier (etwas kleinere) Blöcke, sowie deren Abklingbecken schwer beschädigt.

Vorliegende Studien¹⁷ legen nahe, dass die Freisetzungen von Edelgasen wie Xe-133 in Fukushima jene aus Chernobyl um einen Faktor 2 bis 3 übersteigen. Schätzungen zur Freisetzung anderer Isotope in die Atmosphäre (!), wie I-131, liegen bei 10%. Xe-133 und I-131 sind Leitisotope, wenn es um die Folgenabschätzung für kurze Zeiträume geht. Für mittelfristige bis langfristige Zeiträume kann Cs-137 als Leitisotop herangezogen werden. Die Freisetzungen von Cs-137 aus Fukushima

¹⁷ A. Stohl et al., “Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition”, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, p. 2313-2343, 2012
IRSN, “Fukushima, one year later, Initial analyses of the accident and its consequences”, Report IRSN/DG/2012-003 of March 12, 2012

wurden zu 40% derer aus Chernobyl geschätzt. Allerdings basieren diese Schätzungen auf Luftproben, die in einiger Entfernung vom Standort Fukushima genommen wurden, sowie Messungen von atmosphärischen Strahlungswerten am Standort, und beinhalten nicht die direkten Freisetzungen ins Meer durch kontaminiertes Wasser. In einer kürzlich veröffentlichten Studie¹⁸ wurden die Freisetzungen von Cs-137 ins Meer (bis 18. Juli 2011) zu 30% der Cs-137 Freisetzungen aus Chernobyl geschätzt. Es gibt eine kleine Überlappung bei den Schätzungen zu den gesamten Meeres- und atmosphärischen Freisetzungen, da ein Teil des radioaktiven Materials im Meer erst in die Atmosphäre freigesetzt und dann ins Meer ausgewaschen wurde, aber Messungen von Meerwasserproben zeigten einen dramatischen Anstieg an Aktivität, der zeitgleich mit der Entdeckung, dass kontaminiertes Wasser aus Fukushima durch Lecks ins Meer gelangte, auftrat. Es kann daher geschlossen werden, dass Meeres- und atmosphärische Anteil summiert werden sollten. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Freisetzungen aus Fukushima der ersten vier Monate nach dem Unfall die gleiche Größenordnung wie die Freisetzungen aus Chernobyl zu haben scheinen. Allerdings wird es mehr Zeit bedürfen um genaue Schätzungen zu Freisetzungen anstellen und um die Folgen für Gesundheit und Umwelt bewerten zu können. Besonders über die direkten Freisetzungen ins Meer seit Sommer 2011 und mögliche zukünftige Freisetzungen dieser Art ist derzeit nicht bekannt.

Anlagensicherheit und internationale Sicherheit

32. Sind niedrige Bestrahlungsdosen, die beim Normalbetrieb von Kernkraftwerken auftreten, gefährlich?

Es gibt eine große Anzahl unterschiedlicher Meinungen darüber. Aus den meisten Ergebnissen von Experimenten und den Analysen medizinischer Statistiken kann man folgern, dass es keinen Dosis-Schwellwert gibt – nur die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung ist bei niedrigen Strahlungsniveaus geringer. Es gibt Behauptungen, dass in der Umgebung von Kernkraftwerken in Deutschland, USA, Japan und Kanada und in der Umgebung der Wiederaufbereitungsanlagen in Sellafield (UK) und La Hague (Frankreich) Krebserkrankungen häufiger sind, als anderswo. Allerdings sind statistische Auswertungen kleiner Datenmengen immer schwierig und es gibt in der wissenschaftlichen Community keine Übereinstimmung zu diesem Thema.

¹⁸ P. Bailly du Bois et al., "Estimation of marine source term following Fukushima Dai-ichi accident", Journal of Environmental Radioactivity 114 (2012), 2-9

33. Wie wird die Sicherheit von Kernkraftwerken festgestellt?

Es gibt zwei komplementäre Herangehensweisen zur Bewertung der Sicherheit von Kernkraftwerken: (1) den deterministischen und (2) den probabilistischen Ansatz. Die IAEA (Internationale Atomenergieorganisation) verlangt sowohl die deterministische, wie auch die probabilistische Analyse bei der Sicherheitsanalyse von Nuklearanlagen, inklusive Kernkraftwerken.

Eine Schwierigkeit bei den existierenden Sicherheitsrichtlinien liegt darin, dass jeder Block eines Kernkraftwerks individuell betrachtet wird, unabhängig davon, ob ein Block oder mehrere Blöcke an einem Standort stehen (an manchen Standorten gibt es Kernkraftwerke mit sechs oder sieben Blöcken). Die Unfälle in Fukushima im März 2011 haben gezeigt, dass alle Blöcke einer Nuklearanlage an einem Standort bei Sicherheitsbewertungen simultan betrachtet werden müssen. Die Fukushima-Unfälle haben ebenfalls aufgezeigt, dass alle potenziell unfallauslösenden Ereignisse bei solchen Bewertungen berücksichtigt werden müssen, auch wenn sie nach Expertenmeinung sehr selten auftreten.

34. Können probabilistische Analysen (PSA) gültige Werte für die Häufigkeit schwerer Unfälle für existierende Kernkraftwerke liefern?

Nein, das ist nicht deren Ziel. Öffentlich verfügbare PSA-Informationen geben an, dass für existierende Kernkraftwerke der Generation I und II die Häufigkeit schwerer Unfälle im Bereich von einem Unfall alle 10.000 bis ein Unfall alle 100.000 Jahre liegt¹⁹. Im Zeitraum der Betriebserfahrung mit kommerzieller Kernenergie von mehr als 15.000 Reaktorjahren²⁰ ereigneten sich drei oder fünf schwere Unfälle, je nachdem, ob man in Fukushima Daiichi von einem oder drei separaten Unfällen ausgeht. Auf dieser Basis wäre die Häufigkeit schwerer Unfälle entweder ein Unfall in 5.000 Jahren oder ein Unfall in 3.000 Jahren, also höher als der durch PSA berechnete Häufigkeitsbereich. Dies kann der Tatsache zugeschrieben werden, dass viele PSA externe Gefahren noch nicht berücksichtigt haben, dass in der PSA der Einfluss menschlicher Zuverlässigkeit auf die Wahrscheinlichkeit schwerer Unfälle nicht vollständig einbezogen wird, und dass existierende PSA bestimmte Faktoren, wie Sicherheitskultur oder Managementstil entweder gar nicht oder schlecht abbilden. Dazu kommt, dass in der PSA das Risiko, das von Sabotage, Terrorismus oder Kriegsgeschehen ausgeht, nicht berücksichtigt wird. Schließlich wird in den meisten PSA das Risiko von schweren Unfällen in Lagerbecken abgebrannter Brennelemente nicht berücksichtigt. Obwohl eine PSA nicht als Garantie,

¹⁹ Der Block 4 des KKW Kola (VVER-440/213) (Rosatom 2010) hat eine Kernschädigungshäufigkeit (CDF) von $1,3 \times 10^{-4}/a$, Die Blöcke 1-4 von Dukovany 4 (VVER-440/213) haben einen CDF-Wert von $1,7 \times 10^{-5}/a$ (Czech Republic 2010)

²⁰ Mit etwa 400 Blöcken in Betrieb steigt die kumulative Erfahrung des Betriebs kommerzieller Kernkraftwerke in jedem Kalenderjahr um 400 Reaktorjahre.

dass schweren Unfälle nicht öfter als eine bestimmte Anzahl pro Jahr auftreten werden, aufgefasst werden kann, sind PSA dennoch hilfreich bei der Erfassung vergleichbarer Abschätzung von Risiken, die in der Analyse einbezogen sind, und sie sind daher wichtig für die Festlegung von Prioritäten bei der Nachrüstung von Anlagen.

35. Die Sicherheit von Kernkraftwerken nimmt kontinuierlich zu. Hat dies nicht das Sicherheitsproblem gelöst?

Nein. Die Unfälle von Tschernobyl und Fukushima haben klar gezeigt, dass selbst in Kernkraftwerken, die als sicher angesehen wurden, schwere Unfälle eintreten können. Trotz einer Periode der Verschärfung von Sicherheitsstandards haben die Unfälle in Fukushima im März 2011, bei denen drei Reaktoren der Generation-II Kernschmelzen in großem Maße und schwerwiegende Beschädigungen des Containments erfahren haben, gezeigt, dass schwere Unfälle nach wie vor nicht ausgeschlossen werden können. Außerdem erfüllen nicht alle Kernkraftwerke die Sicherheits-Richtlinien der IAEO, obwohl diese nur als Minimalanforderung angesehen werden.

36. Werden zukünftige, so genannte „Inhärent sichere“ Reaktoren das Sicherheitsproblem lösen?

Nein. „Inhärente Sicherheit“ bezieht sich auf Sicherheitsmerkmale eines Reaktors, die einen Reaktor von einer anormalen oder gefährlichen Situation aufgrund von fundamentalen physikalischen Prinzipien in ein sicheres Regime zurückführen können – sollte beispielsweise das Kühlwasser eines Leichtwasserreaktors verloren gehen (etwa infolge eines Rohrbruchs), wird die nukleare Kettenreaktion gestoppt, weil das Kühlmittel als Moderator gebraucht wird. Eine Reaktorauslegung kann in kleinerem oder größerem Umfang inhärente Sicherheitsmerkmale, oder passive Sicherheitssysteme bzw. passive Komponenten nutzen. Auch wenn manchmal für Reaktoren der Generation IV behauptet wird, sie seien „inhärent sicher“, kann dies niemals für eine Reaktorauslegung als Ganzes wahr sein: ... „es ist technisch nicht einwandfrei zu behaupten, dass irgendein Reaktor, sei es ein wassergekühlter Reaktor oder ein anderer Typ, ein inhärent sicherer Reaktor sei. Die Verwendung dieses Begriffs ist eine Fehlbenennung und unangemessen für jede stromerzeugende Technologie. Alle Energietechnologien sind mit Risiko behaftet und es ist erforderlich, die Risiken und Vorteile jeder Technologie sorgfältig und objektiv auszuwerten, bevor Entscheidungen über neue Anwendungen getroffen werden.“²¹

²¹ OECD/NEA Issue Brief: An analysis of principal nuclear issues No. 5, June 1989

37. Ist es wahr, dass alle in Bau befindlichen Leistungsreaktoren der Generation III angehören?

Nein. Gegenwärtig (2013) sind 65 Kernreaktoren in Bau, einige davon wurden bereits in den frühen 80ern begonnen. Vierzig von ihnen gehören zur Generation II oder der Generation II+; die meisten dieser alten Reaktordesigns werden in Schwellenländern gebaut, aber auch zwei in der Europäischen Union (Mochovce 3&4, weniger als 200 km von Wien, Österreich, entfernt).

38. Warum ist der Sicherheitsaspekt im Fall der Kernenergie derart stark im Fokus?

Eine spezielle Eigenschaft des nuklearen Risikos ist, dass die Wahrscheinlichkeit schwerer Unfälle bei gut ausgelegten Anlagen zwar klein ist, die Konsequenzen im Fall des Eintritts aber potenziell katastrophal sind. Menschen und Staaten, die niemals von dem Betrieb der Kraftwerke profitiert haben, können stark in Mitleidenschaft geraten und die betroffenen Gebiete können für Jahrhunderte unbewohnbar werden.

39. Kann der Kostendruck des Elektrizitätsmarkts Einfluss auf das Risiko von Unfällen in Kernkraftwerken haben?

Ja. Die Notwendigkeit der Kostenreduzierung führt zu einem Abbau der Belegschaft und gefährdet Investitionen in Sicherheitsmaßnahmen. In einigen Fällen der vergangenen Jahre hat dies zu einer Herabsetzung der Sicherheitsstandards und zu einer Abnahme der Sicherheitskultur geführt.

40. Werden einige Kernkraftwerke ohnehin nicht abgeschaltet, wenn sie ihre Altersgrenze erreicht haben?

Wegen des steigenden Energiebedarfs und der fehlenden Akzeptanz für neue Anlagen wurden erfolgreich Versuche zur Lebensdauererlängerung der Anlagen vorgenommen. Bedauerlicherweise steigen allerdings die Sicherheitsrisiken bei einem bestimmten Alter²², hauptsächlich weil einige Komponenten durch Materialermüdung infolge starker Beanspruchung geschädigt sind. Eine alte Anlage mit einem Laufzeitverlängerungsprogramm weiter zu betreiben ist häufig billiger, als der Bau einer neuen Anlage – und die öffentliche Akzeptanz ist höher, obwohl das Risiko, das von diesen Anlagen ausgeht, größer ist. Zum Beispiel wurde Fukushima Daiichi 1 wenige Wochen vor dem Unfall eine Lebensdauererlängerung von 10 Jahren nach einer Betriebszeit von 40 Jahren zugestanden.

²² Wie bei Autos treten die technischen Probleme in Kernkraftwerken mit der höchsten Häufigkeit im Allgemeinen zu Beginn des Betriebs und wieder zum Ende der Lebensdauer auf.

41. Sind Cyber-Attacken für Kernkraftwerke relevant?

Über diesen Punkt gibt es unterschiedliche Meinungen. Ein größeres Problembewusstsein hinsichtlich Cyber-Attacken, sowie vorbeugende und mildernde Maßnahmen z.B. durch „Computer Emergency Response Teams“ oder „Computer Security Incident Response Teams“ wären wichtig. Da Cyber-Attacken nicht verhindert werden können, wird angenommen, dass die Angreifer einen Vorlauf von etwa 2 Jahren vor Schutztechnologien haben. Ein Beispiel einer Cyber-Attacke auf eine Nuklearanlage wurde berichtet: „stuxnet“ – ein Internet-Wurm – hatte Windows-PCs infiziert. Der Wurm blieb inaktiv, solange nicht eine spezielle Siemens-Software auf dem Zielrechner gefunden wurde, und ein Siemens S7 PLC Hardware-Controller an den Zielrechner angeschlossen war. Waren diese Bedingungen aber erfüllt, führte der Wurm eine schichtweise Attacke durch, bis er den S7 PLC kontrollierte. Diese Siemens-Hardware wurde im iranischen Uran-Anreicherungsprogramm verwendet, das der Wurm erfolgreich um ein bis zwei Jahre verzögern konnte. Ein Artikel in der New York Times nennt US- und israelische Geheimdienste als gemeinschaftlich verantwortlich für die Entwicklung des Wurms – dem wurde von offizieller Seite nie widersprochen.

42. Sind Kernkraftwerke mögliche Ziele für terroristische oder militärische Angriffe?

Ja. Kernkraftwerke sind durch den erheblichen Schaden (oder zumindest die psychologische und soziale Zerrüttung), den ein Angriff verursachen könnte, potenzielle Ziele für militärische oder terroristische Angriffe. Kernreaktoren waren bereits in der Vergangenheit Ziele von militärischen Angriffen, als Teil von Strategien gegen Proliferation.

43. Welche Konsequenzen könnten terroristische Angriffe oder militärische Aktionen auf kerntechnische Anlagen haben?

Angriffe auf Kernkraftwerke können zu radioaktiven Freisetzungen führen, ähnlich denen der schwersten nuklearen Unfälle. Selbst wenn ein Reaktor abgeschaltet werden konnte, erzeugt er noch über Tage und Wochen große Mengen an Nachzerfallswärme. Deshalb kann es sein, dass es nicht ausreicht, den Reaktor abzuschalten. Sollte die Kühlung des Reaktors durch Terroristen oder militärische Aktionen unterbrochen werden, könnte dies zu einer nuklearen Katastrophe führen. Neben den möglichen lang andauernden Folgen auf die Umwelt, die ein solcher Angriff haben könnte, können auch die Auswirkungen auf die Elektrizitätserzeugung relevant sein.

44. Wie bereiten sich Anlagen gegen terroristische Angriffe vor?

Informationen über die Abwehrmaßnahmen gegen terroristische Angriffe werden aus naheliegenden Gründen geheim gehalten. Technische Maßnahmen und erhöhte Überwachung von Standorten,

sowie Vorsichtsmaßnahmen durch die Polizei, Geheimdienste und das Militär, können Risiken vermindern, aber nicht vollständig vermeiden. Allerdings ist bekannt, dass KKW für Fälle wie den Verlust der Kontrolle über die Infrastruktur, wie dies bei absichtlich herbeigeführten Flugzeugabstürzen an dem Standort erfolgen könnte, Vorbereitungen treffen. Es ist auch bekannt, dass in einigen Ländern einige Nuklearanlagen durch Raketenabwehr geschützt werden, aber ob diese Maßnahmen ausreichend und effektiv gegen alle möglichen Arten des Angriffs sind, kann bezweifelt werden.

Einfluss des Klimawandels auf die Sicherheit von kerntechnischen Anlagen

45. Sind die Häufigkeiten und Intensitäten von Erdbeben und Tsunamis eine Folge des Klimawandels?

Möglicherweise. Das Abschmelzen des Inlandeises (Gletscher, die Grönlandeisdecke, usw.) sind ein sichtbares Merkmal der globalen Erwärmung. Die daraus folgende Reduktion des Gewichts der Landmassen kann zu Veränderungen der Spannungen in der Erdkruste führen und Erdbeben und Tsunamis auslösen. Ob dies bereits bemerkbar ist, ist Thema wissenschaftlicher Debatten. Das Schadenspotenzial von Tsunamis kann auch durch das Klimawandel-bedingte Absterben von Korallenriffen und Mangrovenwäldern entlang der Küsten verstärkt werden, da deren Dämpfungseffekt auf die Wellen verloren geht.

46. Kann die Zunahme extremer Wetterereignisse die Sicherheit kerntechnischer Anlagen gefährden?

Nicht notwendigerweise. Allerdings wird eine Zunahme extremer Wetterereignisse in Häufigkeit und Intensität mit dem Fortschritt der globalen Erwärmung erwartet; bisher konnten Zunahmen aber nur für ausgewählte Regionen bewiesen werden. Im Allgemeinen wird es möglich sein, durch Aufrüstung kerntechnischer Anlagen diese zu befähigen, extremeren Situationen standzuhalten, aber dies wird nur möglich sein, wenn reguläre Neubewertungen der Auslegungsstörfälle erfolgen, die dem Fortschritt der Klimaänderung entsprechen. Zusammenfassend gesagt, werden extreme Wettersituationen zunehmen und da die Entscheidung, welche Extremereignisse in der Auslegung berücksichtigt werden müssen, und welche nicht, zu einem guten Teil auf Wahrscheinlichkeiten basiert, werden die Schutzmaßnahmen nachgerüstet werden müssen. Das bedeutet, dass die Kosten der nuklear erzeugten Elektrizität infolge des Klimawandels ansteigen werden.

47. Wird ein Anstieg der mittleren globalen Temperatur den Betrieb von

Kernkraftwerken beeinflussen?

Ja. Ein Anstieg der mittleren globalen Temperatur könnte einen Einfluss auf die verfügbaren Wasserquellen haben. Ebenso wie konventionelle Wärmekraftwerke brauchen Kernkraftwerke Wasser für die Kühlung. Es gibt nicht nur eine Rückkopplung von der Energienutzung zur globalen Erwärmung, sondern auch von der globalen Erwärmung zur Energie – bezeichnet als Energie-Wasser-Nexus. Es wird angenommen, dass durch die Erderwärmung in der Zukunft die Frischwasserquellen abnehmen werden und die Kohle-, Gas- und nuklear erzeugte Elektrizität mit der Landwirtschaft um das Wasser konkurrieren wird.

Katastrophenschutz

48. Kann ein effektiver Katastrophenschutz und Krisenmanagement das Problem eines schweren Nuklearunfalls lösen?

Katastrophenvorsorge ist eine *Conditio-sine-qua-non* für effektiven Katastrophenschutz und Krisenmanagement. Erfolgreiche Katastrophenvorsorge bedeutet, dass die Bevölkerung in einer nuklearen Katastrophensituation adäquat zu reagieren und zu handeln weiß. Katastrophenvorsorge bedarf angemessener, zuverlässiger Informationsstrukturen und -systeme, sowie eines regelmäßigen Trainings. Wenn die Bevölkerung entsprechend vorbereitet ist, können Katastrophenschutz und Krisenmanagement die Auswirkungen eines nuklearen Unfalls mindern – z.B. kann die rechtzeitige Einnahme von Jodtabletten Ablagerung des Radio-Jods in der Schilddrüse verhindern. Dennoch können diese Maßnahmen nicht vor anderen Folgen der Strahlung schützen, und wenn Katastrophenschutz auch helfen kann, das Problem des „schweren Unfalls“ kann dadurch sicherlich nicht gelöst werden.

49. Konnte der Katastrophenschutz effektive Hilfe bei den nuklearen Unfällen in der Vergangenheit bieten?

Bei den Unfällen von Three Mile Island (USA) und Tschernobyl zeigte sich, dass die damals verfügbaren Katastrophenschutzpläne unzureichend waren. Auch in der jüngeren Vergangenheit, im Jahr 1999 während des Unfalls in Tokai Mura in Japan funktionierte das Krisenmanagement schlecht – die Behörden wurden zu spät informiert, und es verging zu viel Zeit, bevor Gegenmaßnahmen ergriffen werden konnten. Trotzdem, oder gerade deswegen besteht die Notwendigkeit, aktive Katastrophenvorsorge zu fördern, um in der Zukunft besser auf nukleare Unfälle vorbereitet zu sein.

Die Katastrophenschutzmaßnahmen, die während der Unfälle in Fukushima ergriffen wurden, scheinen unmittelbare Gesundheitsschäden (d.h. im Zeitraum von Stunden bis Tagen nach dem

Unfall) verhindert zu haben; allerdings muss sich die Wirksamkeit dieser Maßnahmen hinsichtlich der Spätfolgen, der Krebserkrankungsgefahr, erst erweisen.

50. Können Staaten, die sich gegen die Nutzung der Kernenergie entschieden haben, ohne Katastrophenschutz auskommen?

Nein. Wie der Unfall von Tschernobyl eindrucksvoll demonstrierte, werden radioaktive Wolken nicht durch Staatsgrenzen aufgehalten und können einige hundert Kilometer innerhalb eines Tages zurücklegen. Daher können auch Staaten, die keine Kernkraftwerke besitzen, durch nukleare Katastrophen in Mitleidenschaft gezogen werden, müssen teure Schutzmaßnahmen planen und im Katastrophenfall umsetzen. Die ursprüngliche Erwartung an Kernkraftwerke, man könne das Risiko kontrollieren und auf ihren Standort begrenzen, hat sich nicht erfüllt – stattdessen gibt es eine Abwälzung des Risikos auf die Öffentlichkeit: Notfallvorsorge und Katastrophenmanagement.

Radioaktiver Abfall

51. Konnten Endlager für hoch radioaktiven Abfall kommerzieller Kernkraftwerke bereits in Betrieb genommen werden?

Nein. Bis heute, 2013, wurde weltweit kein einziges solches Endlager in Betrieb genommen. Allerdings ist am Standort Olkiluoto in Finnland ein Endlager in Form eines geologischen Tiefenlagers für abgebrannte Kernbrennstoffe seit 2004 in Bau, und für einige andere Endlager (z.B. Osthhammer in Schweden) ist das Genehmigungsverfahren bereits im Gange, oder zumindest in Vorbereitung. Aber selbst wenn zu erwarten ist, dass innerhalb der nächsten 15 Jahre einige Endlager in Betrieb genommen werden, fehlt trotzdem die Betriebserfahrung – und die Konzepte der Endlager müssen sich erst in der Praxis beweisen.

52. Sind Transporte und Lagerstätten von nuklearem Abfall nicht im Großen und Ganzen sicher?

Nein. Bei Unfällen (oder Angriffen), auf Transporten, aus Zwischen- oder Endlagern kann es zu signifikanten radioaktiven Freisetzungen kommen. Hochradioaktiver Abfall muss für sehr lange Zeitspannen abgeschirmt werden. Die Sicherheit von Endlagern für hochradioaktiven Abfall muss für einen Zeitrahmen von bis zu einer Million Jahre nachgewiesen werden, was praktisch unmöglich ist. Es gibt derzeit einen Konsens, dass geologische Tiefenlager am besten als Endlager geeignet sind. Trotzdem existieren noch Wissenslücken und viele Fragen über Endlager in tiefen Gesteinsformationen sind noch ungeklärt.

53. Ist kontrollierte Oberflächenlagerung oder geologische Tiefenlagerung der

verantwortlichere Weg, um mit radioaktivem Abfall umzugehen?

Es gibt Argumente für und wider die Oberflächenlagerung, ebenso wie für tiefe geologische Endlagerstätten. Man kann nicht vorhersehen, ob die Gesellschaft in einigen Jahrtausenden (bzw. Jahrzehntausenden!) in der Lage sein wird, die Kontrolle über die Endlager aufrecht zu erhalten. Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen strebt an, das Abfallproblem „jetzt“ zu lösen und den Zugang zu waffenfähigem Material zu verhindern. Aber einen sicheren und geologisch stabilen Standort zu garantieren, ist schwierig. Die Oberflächenlagerung hat den Vorteil, dass es weniger wahrscheinlich ist, dass das Wissen über die Handhabung des Abfalls verloren geht. Oberflächenlagerung garantiert, dass der Abfall zugänglich bleibt, sollte sich die Notwendigkeit ergeben, den Abfall zu einem anderen Standort zu verlegen, oder sollten in der Zukunft bessere Lösungen für das Abfallproblem gefunden werden. Allerdings würde bei Oberflächenlagerung das „radiologische Erbe“ einer großen Zahl zukünftiger Generationen aufgebürdet werden, welche die Abfälle weiter handhaben, nukleare Proliferation verhindern und mit dem Risiko radioaktiver Freisetzungen leben müssten.

54. Kann radioaktiver Abfall durch Transmutation ungefährlich gemacht werden und ist es ratsam, in diese Richtung zu forschen?

Transmutation erfordert eine vollständig neue, komplexe, anspruchsvolle und teure Wiederaufarbeitungstechnologie, um die verschiedenen Elemente, die sich im radioaktiven Abfall befinden, von einander zu trennen. Weitere Herausforderungen bestehen in der Notwendigkeit, Brennelemente zu fertigen, die teilweise aus den hochradioaktiven Anteilen, die vom Atommüll absepariert wurden, zusammengesetzt werden müssen sowie in der Erforschung und Demonstration schneller Reaktortypen, die benötigt werden, um Anteile des vorliegenden Atommülls effektiv „verbrennen“ zu können. Nicht nur werden für die Demonstration einer solchen Technologie mindestens einige Jahrzehnte benötigt, sondern auch für die nachfolgend angestrebte Nutzung der Transmutationstechnologie wird man viele Jahrzehnte brauchen – und sehr beträchtliche Geldmittel. Welche Vorteile und Nachteile für die Umwelt und welche neuen Herausforderungen für Anlagensicherheit und internationale Sicherheit mit der Transmutationstechnologie verbunden sind, ist bislang nicht umfassend abgeschätzt worden. Auch die insgesamt erreichbaren Vorteile sind fragwürdig: die meisten Spaltprodukte – auch besonders langlebige – können gar nicht effektiv „verbrannt“ werden, die Effizienz der Vernichtung von transuranischen Elementen (wie Plutonium) hängt entscheidend von der Abtrenneffektivität, die im industriellen Maßstab möglich wird, ab. Aus heutiger Sicht ist nicht zu erwarten, dass die Transmutationstechnologie eine sichere Endlagerung überflüssig machen kann. Es könnten nur die Abfallmengen – und damit der erforderliche Raumbedarf in Endlagern – sowie die Radiotoxizität in einem gewissen Ausmaß reduziert werden.

Solange keine detaillierte und unabhängige, prospektive Wissenschafts- und Technikfolgenabschätzung durchgeführt worden ist, erscheinen teure Investitionen in die Erforschung der Transmutationstechnologie nicht empfehlenswert.

55. *Wie kann das Problem des nuklearen Abfalls gelöst werden?*

Es gibt keine zufriedenstellende Lösung für das Abfallproblem. Man kann nur danach streben, die zusätzlich produzierten Abfallmengen zu minimieren. Für den bereits angehäuften Abfall muss eine auf breitem Einverständnis beruhende Lösung in einer umfassenden und offenen öffentlichen Debatte gesucht werden.

Proliferation

56. *Sind Kernwaffen jemals durch Proliferation aus dem kommerziellen Brennstoffzyklus entstanden?*

Obwohl dies im Prinzip möglich ist, ist bisher kein Fall von direkter, offener Proliferation aus dem kommerziellen Brennstoffzyklus bekannt. Allerdings weiß man, dass nicht alle Länder, die nukleare Waffen entwickeln, oder im Verdacht stehen, nukleare Waffen zu entwickeln, nuklear spaltbares Material aus speziell gewidmeten Produktionsstätten gewonnen haben; einige (wie Israel und Nordkorea) haben sich auf Forschungsreaktoren gestützt (nicht aber auf den kommerziellen Brennstoffzyklus). Gleichwohl war der erste größere kommerzielle Reaktor (Calderhall, England) auch der erste Plutoniumlieferant für das britische Kernwaffenprogramm, und die Sowjetunion betrieb Reaktoren mit doppeltem Verwendungszweck (dual-use), sie lieferten Strom für die Öffentlichkeit und Plutonium für das Militär. In den meisten Staaten, die den Kernwaffenstatus erreichten, fehlte eine klare Trennlinie zwischen kommerziellen und militärischen Nuklearprogrammen (so z.B. in Frankreich, China oder Indien).

57. *Kann abgebrannter Brennstoff aus kommerziellen Kernkraftwerken zur Herstellung von Kernwaffen verwendet werden?*

Ja. Es ist unter Experten weitgehend unumstritten, dass nahezu jedes Plutonium für den Bau von Kernwaffen herangezogen werden kann. Allerdings kommt das so genannte „Waffen-Plutonium“ aus nicht-kommerziellen Reaktoren, deren Brennstoff nach einer relativ kurzen Periode des „Abbrands“ im Reaktor entnommen wird. Dadurch wird der relative Prozentsatz an Plutonium-239 (mehr als 90%) maximiert, was für den Einsatz in Kernwaffen wünschenswert ist. Aber auch „Reaktor-Plutonium“, das aus kommerziellen Reaktoren oder größeren Forschungsreaktoren entladen wird, kann zur Herstellung von Waffen verwendet werden. Allerdings muss dazu die Abtrennung des

Plutoniums vom abgebrannten radioaktiven Kernbrennstoff beherrscht werden.

58. Ist die Urananreicherung relevant für Proliferationsgefahren?

Ja. Die Urananreicherung ist unvermeidbar für die gegenwärtigen Kernenergieprogramme, aber die Technologie wurde ursprünglich in den ersten militärischen Nuklearprogrammen der 1940er zur Produktion von hochangereichertem Uran für Waffenzwecke entwickelt und eingesetzt. Eine weltweit zunehmend wichtige Anreicherungstechnologie – die Gaszentrifugen, die sich von Europa aus weiter verbreitet hat – ist in besonderem Maße zivil-militärisch ambivalent. Zentrifugen-Kaskaden können nicht nur eingesetzt werden, um niedrig angereichertes Uran für Reaktorbrennstoff zu erzeugen, sondern können auch leicht und effektiv umkonfiguriert werden, um hoch angereichertes, waffenfähiges Uran zu produzieren. Mit einer sehr kleinen, im Geheimen errichteten Anlage könnte in etwa einem Jahr signifikante Mengen hoch angereichten Urans für ein Waffenprogramm produziert werden – und sie wäre praktisch von außen nicht aufspürbar. Derzeit illustriert das iranische Nuklearprogramm, dass die Zentrifugen-Anreicherung eine Proliferationsförderliche Technologie ist, aber sie ist nun in globalem Maßstab die Technologie der Wahl. Bedauerlicherweise steht heute keine proliferations-resistente Technologie zur Verfügung.

59. Können Kernwaffen durch "Anfänger" konstruiert und gebaut werden?

Ja, auf der Basis eines geeigneten technologischen Know-hows kann ein Staat Kernwaffen bauen. Die meisten Aspekte der Konstruktion von Kernwaffen der ersten Generation sind mehr oder weniger öffentliches Wissen, ebenso Verbesserungen aus der Frühzeit des Kernwaffendesigns. Es ist allerdings schwierig, anspruchsvollere Waffenkonzepte mit minimierter physikalischer Größe und Gewicht zu entwickeln, die durch Raketen und nicht nur mithilfe von Flugzeugen oder anderweitig an ihr Ziel befördert werden können. Der Zugang zu waffenfähigem Material, wie hoch angereichertes Uran oder Plutonium, ist vermutlich durch die weltweit angestiegene Menge dieser Materialien einfacher geworden

60. Kann Proliferation verhindert werden?

Die internationale Staatengemeinschaft – unter Führung der mächtigen Kernwaffenstaaten und der IAEO – unternimmt große Anstrengungen, um die nukleare Proliferation einzudämmen. Es ist allerdings schwer zu glauben, dass nukleare Proliferation gestoppt werden kann, während die derzeit verfügbare nukleare Spalttechnologie in vielen nationalen Kernenergieprogrammen genutzt wird. Die Hauptgründe dafür sind die zivil-militärische ambivalente Natur der Kerntechnologie und die inhärenten Widersprüche des derzeitigen Nichtverbreitungsregime, das bestrebt ist, Proliferation zu verhindern, aber gleichzeitig die Verbreitung der zivilen Nutzung ambivalenter Technologie fördert,

die ihrerseits die Tür zu militärischen Programmen öffnen kann. Die Probleme werden verstärkt durch die unausgewogenen Rechte und Pflichten, verschiedener Gruppen von Mitgliedstaaten innerhalb des Regimes. Das Proliferationsproblem wird derzeit besonders verdeutlicht durch den problematischen Zugang zu sensiblen Technologien, wie Wiederaufbereitung oder Anreicherung, und die Verwendung von Plutonium oder hoch angereichertem Uran in zivilen Programmen. Es ist daher problematisch, sich nur auf die IAEA-Sicherungsmaßnahmen (safeguards) zu verlassen, die keine hundertprozentige Sicherheit liefern können, insbesondere so lange freiwillig akzeptierte verbesserte Sicherheitsmaßnahmen („additional safeguards protocol“) nicht in allen Staaten Gültigkeit haben. Unilaterale Export-Kontrollmaßnahmen werden durch die indigenen Anstrengungen, Zugang zu sensiblen Technologien zu erlangen, und die kommerziellen Interessen der Lieferstaaten unterlaufen. Ohne das technische Kernproblem der zivil-militärischen Ambivalenz anzugehen, ist eine nachhaltige Lösung des Proliferationsproblems nicht in Sicht.

Ökonomie und Wettbewerbsfähigkeit

61. Bietet die Kernenergie kommerzielle Vorteile?

Nein. Die finanziellen Investitionsrisiken der Kernkraft sind durch die im Vergleich zu anderen Technologien sehr hohen – und weiter ansteigenden – Kapitalkosten von Bedeutung. Einige Länder, die wieder in Kernenergieprogramme einsteigen wollen, wie z.B. Finnland und die USA, haben direkte oder indirekte finanzielle Unterstützungsprogramme für den Nuklearsektor eingeführt. In den USA wurden verschiedene Maßnahmen beschlossen, durch die der Steuerzahler sechs bis acht Reaktoren mit vermutlich etwa 13 Mrd Dollar stützen wird. Obwohl viele externe Kosten der Kernenergie nicht in den Vergleichsrechnungen enthalten sind, schneidet die Kernenergie nicht besser ab als die meisten alternativen Technologien. Verbesserungen der Energieeffizienz (Reduktion der Energieintensität bei Güterverkehr, Dienstleistungen und dem privaten Endverbraucher) sind sogar wesentlich vorteilhafter als die Kernenergie, sowohl in Hinblick auf Investitionen, wie auch bezüglich des CO₂-Reduktionspotenzials.

62. Sind die existierenden Kernreaktoren unter freien Marktbedingungen wettbewerbsfähig?

Befürworter der Kernenergie behaupten, dass die existierenden, bereits abbeschriebenen Kernreaktoren verglichen mit thermischen Kraftwerken bei der Stromerzeugung wettbewerbsfähig sind. Dies mag in vielen Fällen richtig sein, allerdings sind die ökonomischen Bedingungen Änderungen unterworfen, und ein Kernkraftwerk, das heute wirtschaftlich betrieben wird, kann morgen seine Wettbewerbsfähigkeit verlieren. Ein solches Beispiel liegt vor – in den USA führten die

ökonomischen Umstände dazu, dass einer der landesweit größten Energieproduzenten, Dominion Corporate, sich dazu entschloss, das KKW Kewaunee (Druckwasserreaktor mit 583 MW, 1974 in Wisconsin eröffnet) im zweiten Quartal 2013 stillzulegen. Als Dominion Kewaunee im Jahr 2005 kaufte, lagen die Strompreise im Mittleren Westen der USA im Bereich \$40-50/MWh, die Erdgaspreise ab Bohrloch bei \$6-10 pro Million Btu und der Strombedarf der USA war steigend. Heute (2013) liegen die Strompreise dort bei etwa \$30/MWh, die Gaspreise bei \$2-3/mBtu, und der Strombedarf ist in den letzten 5 Jahren in den USA nicht gestiegen. Der Betrieb der Anlage war wirtschaftlich nicht mehr vertretbar.

63. Werden die Baukosten für Kernkraftwerke sinken?

Nein. Ein Vergleich der Kostenentwicklungen zeigt, dass die Errichtungskosten für Kernkraftwerke gestiegen sind, während die für alternative Technologien fallen. Außerdem ist bekannt, dass die Schätzungen für Bauzeiten und Kosten von Kernkraftwerken ungenau sind und bei Baubeginn in der Regel unterschätzt werden. Es gibt keinen Grund anzunehmen, dass sich dies in der nahen Zukunft ändern wird. Im Gegenteil, post-Fukushima-Upgrades der Sicherheitsanforderungen werden die Preise und Baukosten eher steigen lassen.

Zum Beispiel wurde für Olkiluoto, dem ersten Reaktor der Generation III+, der in Finnland durch AREVA gebaut wird, ein EPR („Europäischer Druckwasserreaktor“) mit einer installierten Leistung von 1,6 GWe, die Bauzeit auf vier Jahre geplant und die Kosten auf 3,2 Milliarden Euro angesetzt. Heute ist die geschätzte Bauzeit elf Jahre, die Kosten 8,5 Milliarden Euro (das bedeutet 5.300 € pro installiertem kWe).

64. Ist die Kernenergie gegenwärtig durch öffentliche Vorhaben subventioniert?

Ja. Die Subventionen für Kernenergie sind höher als diejenigen für erneuerbare Energien oder fossile Brennstoffe²³. Zu den Zuschüssen aus öffentlicher Hand zu kerntechnischer Forschung und Entwicklung kommen noch die Kosten für Aufsichtsbehörden, Strahlungsüberwachungssysteme, Katastrophenschutzplanungssysteme auf nationaler Ebene, und Nicht-Proliferationsaktivitäten (z.B. Comprehensive Test-ban Treaty Organization, CTBTO) auf internationaler Ebene, die von öffentlichen Geldern bezahlt werden. Zusätzlich hat die Nuklearindustrie nicht jene Versicherungslast zu tragen, die andere Industrien schultern müssen.

65. Wie hoch wären die finanziellen Verluste bei einem schweren Unfall in

²³ Im Jahr 2007 hat das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) eine Studie veröffentlicht, in der geschätzt wird, dass von 1950 bis 2006 ein Gesamtäquivalent von 54 Milliarden Euro an Fördermitteln für den Nuklearbereich in Deutschland ausgegeben wurden. Das sind 2000 Euro pro installiertem kWe.

Europa?

Zu Beginn des Jahres 2013 hat das Französische Institut für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit (IRSN) die Gesamtkosten für einen schweren Unfall eines 900 MW Reaktor in Frankreich mit begrenzter Freisetzung von radioaktivem Material in die Atmosphäre mit etwa 120 Milliarden Euro beziffert. Dieser Wert könnte sich verdoppeln, wenn Wetter und andere Bedingungen ungünstig sind. 77% der Kosten wären die Folge von Imageschäden (z.B. wenn Verbraucher als Folge des Unfalls auch nicht verstrahlten Produkten aus der Region misstrauen, oder Einbrüche bei Tourismus und Export). Nach einem schweren Unfall mit unkontrollierten radioaktiven Freisetzungen in die Atmosphäre würden die Gesamtkosten bei 430 Milliarden Euro liegen.

66. Decken Versicherungen die nuklearen Risiken adäquat ab?

Nein. Die internationalen Abkommen, die die Haftungsfrage regeln (Vienna Convention und Paris Convention) teilen die Haftung zwischen Betreiber und Staat, in dem die Anlage steht, und den Mitgliedstaaten des Abkommens auf. Zudem wurde die Haftungssumme für Folgeschäden eines schweren Unfalls begrenzt. Wenn die europäischen Betreiber von Kernkraftwerken Versicherungen für die gesamten Kosten eines schweren Unfalls abschließen müssten, würden die Kosten der Stromerzeugung erheblich steigen.

Legale Dimension

67. Könnten die Probleme und Risiken der Kernenergie auf internationalem Niveau gelöst werden?

Das Risiko von zukünftigen nuklearen Unfällen kann nicht ausgeschlossen werden. Das Risiko, dass die Nukleartechnologie durch Regierungen oder Terroristen missbraucht wird, ist vorhanden und nicht unter Kontrolle. Solange die nukleare Gefahr besteht, könnten viele Maßnahmen die existierenden Risiken reduzieren. Die Realisierung hängt vom politischen Willen der Regierungen ab. Einige der allerwichtigsten Maßnahmen z.B. zur Reduzierung des Risikos eines weiteren nuklearen Unfalls sind:

- Verstärkung der realen und mentalen Unabhängigkeit der nuklearen Aufsichtsbehörden von der „Nuclear-Community“;
- bindende und präzise Ziele innerhalb der EU für die nukleare Sicherheit, entsprechend dem Stand der Technik, inklusive dem Schutz vor Kernschmelzereignissen;
- mehr Kontrolle durch die Zivilgesellschaft unterstützt durch unabhängige Experten und eine radikale Änderung hin zu realer Transparenz durch Betreiber und Aufsichtsbehörden.

Technologieneutralität?

68. Sollte Europa die Kernenergie wie erneuerbare Energiequellen subventionieren, um die Klimaziele zu erreichen?

Nein. Wie in dem "Global Energy Assessment" (GEA) 2012²⁴ ausgeführt wird, muss man, sollen die Klimaziele eingehalten werden (d.h. soll der Anstieg weltweiten Durchschnittstemperatur unter 2°C gehalten werden), über ein neues Energieversorgungssystem nachdenken, das primär auf erneuerbaren Energiequellen und Energieeffizienz-Maßnahmen beruht. Projiziert man auf Grundlage der derzeitigen politischen Rahmenbedingungen in die Zukunft, dann kann man erkennen, dass die Klimaziele nicht erreicht werden können – und das selbst wenn man annimmt, dass punktuell neue Technologien wie Kohlenstoffeffang und -sequestration verfügbar werden könnten. Drastische Änderungen sind nötig, um die Klimaziele zu erreichen – im GEA wird ein Szenario gezeichnet, in dem intermittierende erneuerbare Energiequellen den Strombedarf zu einem hohen Anteil decken, unterstützt von Technologien, die schnell überschüssige Elektrizität speichern können, und wieder abgeben, wenn diese benötigt wird.

- Die Kernenergie passt nicht in ein solches Szenario. Sie ist nicht als Hauptpfeiler für die Stromerzeugung zusammen mit erneuerbaren Energiequellen geeignet. Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen ist intermittierend, nicht gleichmäßig, – eine komplementäre Stromerzeugungsanlage muss in der Lage sein, schnell anzufahren bzw. die Produktion schnell zu reduzieren (Lastfolgebetrieb) – etwas, das ein Kernkraftwerk nicht – oder nur begrenzt – bieten kann. Außerdem trägt die Kernenergie nicht zur Versorgungssicherheit in Europa bei.
- Die Kernkraft ist keine wirklich neue Technologie, im Gegensatz zu den erneuerbaren Energien. Man kann nicht erwarten, dass Investitionen in Forschung und Entwicklung zur Kernenergie denselben Gewinn abwerfen, wie sie es bei den erneuerbaren Energien tun²⁵. Die verfügbaren Forschungsfördermittel sind begrenzt – Förderung der Kernenergieforschung auf gleichem Niveau wie Forschung zu erneuerbaren Energiequellen würde den erneuerbaren Energien wichtige Quellen entziehen. Fördermechanismen so kosteneffektiv wie möglich einzusetzen und gleichzeitig nach nachhaltigen Lösungen zu

²⁴ IIASA/GEA Council: Global Energy Assessment. Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, USA, 2012.

²⁵ EC COM(2013) 253 final, Brussels, 2.5.2013 zeigt, dass die gesamten Forschungs- und Entwicklungskosten für die Kernenergie in der EU alle erneuerbaren Optionen übertreffen, aber umgekehrt die Innovation und Entwicklung durch die erneuerbaren Energiequellen der letzten 20 Jahre die Entwicklungen im Nuklearsektor bei weitem übertrafen.

streben, bedeutet, dass die erneuerbaren Energien den Vorrang haben sollten.

- Gefahr des Lock-in: Kernkraftwerke der Generation III, die derzeit gebaut werden, haben eine geplante Lebensdauer von 60 Jahren (ohne Laufzeitverlängerungsprogramme mit in Betracht zu ziehen). Investitionen in die Kernenergie beeinflussen die Energie-Infrastruktur für mehr als 60 Jahre. Da Kernkraftwerke nicht mit einem hohen Anteil an intermittierend arbeitenden erneuerbaren Energiequellen kompatibel sind, gefährdet ein Ausbau der Kernenergie in der EU die Europäischen Energie-Roadmap-Ziele²⁶, bei denen die verschiedenen erneuerbaren Energie-Technologien die Rolle der neuen „Arbeitspferde“ im Energiesystem spielen sollen.
- Die CO₂-Emissionen sollten nicht das einzige Kriterium sein, das man in Betracht zieht. Länder, die sich zu Kernenergieprogrammen entschlossen haben, werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten viel in die Nuklearforschung investieren müssen, da fundamentale Probleme, wie die Behandlung von hoch radioaktivem Abfall, Anlagensicherheit und Schutzmaßnahmen gegen schwere Unfälle, Umgangsweise mit den abnehmenden Uranressourcen noch gelöst werden müssen. Diese Investitionen fehlen dann bei der Entwicklung der erneuerbaren Energiequellen, bei denen sie –wie man weiß – zu höherem Gewinn führen würden. Zudem birgt die Kernenergie die Gefahr der Weiterverbreitung von Kernwaffen, und die Bauzeiten von Kernkraftwerken sind notorisch zu lange, die Baukosten bleiben selten im geplanten Budgetrahmen.

Da es fraglich ist, ob die derzeit offenen Fragen in Zusammenhang mit der Kernenergie überhaupt beantwortet werden können, sollte man annehmen, dass es besser ist, niedrig-CO₂-Technologien oder sogar CO₂-neutrale Technologien, die nicht mit den oben erwähnten Problemen belastet sind, zu unterstützen.

²⁶ European Commission: Energy Roadmap 2050, COM(2011) 885 final, 15 Dec. 2011