

Kernaussagen

Deckung des wachsenden Weltenergiebedarfs und Bewältigung seiner ökologischen, sozialen und politischen Auswirkungen

Eine große globale Herausforderung des 21. Jahrhunderts wird die Deckung des Energiebedarfs für einen anhaltenden sozialen und wirtschaftlichen Fortschritt sein, bei gleichzeitiger Bewältigung der damit verbundenen potenziellen ökologischen und sozio-politischen Probleme. Bis 2050 wird mit einem Anstieg des weltweiten Stromverbrauchs um einen Faktor von etwa 2,5 gerechnet.

Energie, insbesondere Strom, ist für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung ebenso wie für die Erhöhung der Lebensqualität unerlässlich. Es herrscht jedoch weitgehend Einigkeit darüber, dass der globale Energieverbrauchstrend des letzten Jahrhunderts nicht zukunftsfähig ist. Der Klimawandel, ausgelöst durch anthropogene CO₂-Emissionen, hat ökologische Folgen, zu denen sozio-politische Bedrohungen infolge steigender Energiepreise sowie eines möglichen Mangels an sicheren Energiequellen hinzukommen.

- Die Stromerzeugung ist für rd. 27% der weltweiten anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich und stellt die bei weitem größte und am schnellsten wachsende Quelle von Treibhausgasemissionen dar.
- Die Versorgungssicherheit ist weltweit zu einem wichtigen Anliegen geworden, insbesondere in Ländern, die selbst über wenig fossile Energieressourcen verfügen und daher von Energieimporten abhängig sind.

In Zukunftsszenarien mit unveränderten politischen Rahmenbedingungen führt die starke wirtschaftliche Expansion vieler Entwicklungsländer, die mit einem energieintensiveren Lebensstil einhergeht, zusammen mit dem voraussichtlichen Anstieg der Weltbevölkerung um 50% – von dem ein Großteil auf Entwicklungsländer entfällt – zu einem wachsenden Energiebedarf. Der damit verbundene Anstieg des Verbrauchs an fossilen Energieträgern wird sich unaufhaltsam fortsetzen, sofern die Regierungen in aller Welt keinen Kurswechsel in der Energiepolitik vollziehen. Die Kernenergie hat das Potenzial, eine wichtige Rolle bei der Begrenzung dieser Probleme zu spielen.

Gegenwärtiger und voraussichtlich künftiger Beitrag der Kernenergie zur weltweiten Energieversorgung

Im Jahre 2006 wurden 2,6 Mrd. MWh Strom in Kernkraftwerken erzeugt, womit 16% des weltweiten und 23% des Strombedarfs der OECD-Länder gedeckt wurden.

- Im Juni 2008 waren in 31 Staaten/Volkswirtschaften insgesamt 439 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 372 GWe in Betrieb.

- Auf Frankreich, Japan und die Vereinigten Staaten entfallen 57% der weltweiten Kernenergieleistung; insgesamt 16 Länder erzeugten 2007 mehr als ein Viertel ihres Stroms in Kernkraftwerken.

Im Juni 2008 befanden sich in 15 Staaten/Volkswirtschaften insgesamt 41 Kernkraftwerke im Bau. In Asien beträgt die durchschnittliche Bauzeit derzeit 62 Monate; von den 18 Reaktoren, die zwischen Dezember 2001 und Mai 2007 ans Netz gingen, wurden drei in 48 Monaten oder weniger errichtet.

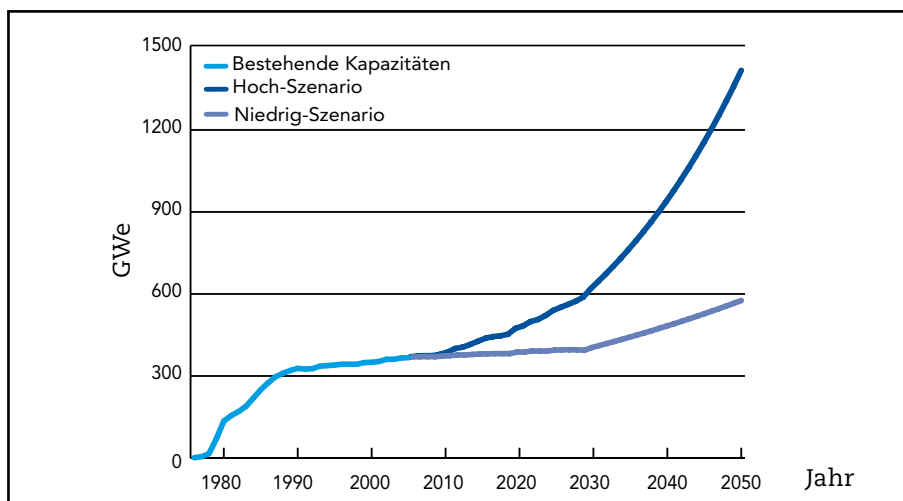
Aus denderzeitigen Plänen und Absichtserklärungen der Länder ist zu schließen, dass im Jahre 2020 die Vereinigten Staaten, Frankreich, Japan, Russland, China und Korea über die größten installierten Kernkraftwerksleistungen verfügen werden. Der stärkste Kapazitätsausbau ist in China und den Vereinigten Staaten geplant.

Die NEA hat die Entwicklung der weltweiten Kernkraftwerksleistung bis 2050 in einem Hoch- und einem Niedrig-Szenario mit folgenden Ergebnissen geschätzt:

- Bis 2050 wird die weltweit installierte Kernkraftwerksleistung um einen Faktor von 1,5 bis 3,8 zunehmen.
- Im Hoch-Szenario wird der Anteil der Kernenergie an der weltweiten Stromerzeugung von derzeit 16% auf 22% im Jahr 2050 ansteigen.
- In beiden Szenarien wird sich die nukleare Stromerzeugung weiterhin stark auf den OECD-Raum konzentrieren.
- Der Beitrag von Ländern, die bislang keine Kernreaktoren betreiben, wird nur rd. 5% zu der im Jahre 2020 weltweit installierten Kernkraftwerksleistung ausmachen.

Diese Projektionen decken sich weitgehend mit denen anderer Organisationen. Die Geschichte der Kernenergie zeigt, dass es möglich ist, weltweit neue Kernkraftwerke in einem Ausmaß zu bauen, wie es für die Realisierung des NEA Hoch-Szenarios bis 2050 erforderlich wäre.

Voraussichtliche Kernkraftwerkskapazitäten NEA Hoch- und Niedrig-Szenario



Rolle der Kernenergie bei der Verringerung der negativen Auswirkungen des wachsenden Energieverbrauchs

Die Kernenergie könnte eine wichtige Rolle spielen bei der Vermeidung von CO₂-Emissionen, bei der Verbesserung der Versorgungssicherheit und bei der Verhinderung von erheblichen Gesundheitsauswirkungen infolge der Verbrennung fossiler Energieträger.

Klimawandel

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC) ist zu dem Ergebnis gekommen, dass die CO₂-Emissionen, einschließlich jener aus der Stromerzeugung, um die Hälfte reduziert werden müssen, um die Folgen des Klimawandels auf ein vertretbares Maß zu begrenzen.

- Über den gesamten Lebenszyklus gerechnet ist Kernenergie so gut wie CO₂-frei.
- Um das anspruchsvolle Emissionsminderungsziel des IPCC zu erreichen, müssen mehrere Technologien kombiniert werden; die Kernenergie ist jedoch die einzige Technologie, die ihre Fähigkeit zur Senkung der CO₂-Emissionen in hinreichendem Umfang bewiesen hat.
- Die Kernenergie könnte in Zukunft einen zunehmenden Beitrag zur Stromerzeugung wie auch zu einer nahezu CO₂-freien Wärmeerzeugung leisten; eine potenziell vielversprechende Entwicklung ergibt sich auch aus der weltweiten Forschung und Entwicklung (FuE) zur Wasserstoffgewinnung für den Transportsektor mit Hilfe von Kernenergie.

Der Großteil der potenziellen externen Kosten der Elektrizitätserzeugung (d.h. der Kosten, die nicht im Preis abgebildet sind, einschließlich der Folgen des Klimawandels) ist im Fall der Kernenergie bereits internalisiert; hingegen sind bei fossilen Energieträgern die externen Kosten in etwa genauso hoch sind wie die direkten Kosten.

Versorgungssicherheit

Kernenergie ist zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit besser geeignet als Öl oder Gas, weil der erforderliche Brennstoff – Uran – aus verschiedenen Quellen bezogen werden kann und die wichtigsten Anbieter in politisch stabilen Ländern angesiedelt sind.

- Die sicher identifizierten Uranvorkommen sind ausreichend, um eine Expansion der weltweiten Kernenergieleistung bis mindestens 2050 zu gestatten (ohne Wiederaufbereitung). Mit den vermuteten Vorkommen, deren Nachweis auf regionalen geologischen Daten beruht, könnte die Uranversorgung für mehrere Hunderte von Jahren gesichert sein.
- Die derzeit bekannten Uranvorkommen könnten auch ausreichen, um ein deutlich ausgebautes globales Kernenergieprogramm über Jahrtausende mit Brennstoff zu versorgen; dazu wären aber sogenannte Schnelle

Brutreaktoren erforderlich, die technologisch zwar bereits weit entwickelt sind, sich aber noch nicht im kommerziellen Einsatz befinden.

- Auf Grund der hohen Energiedichte von Uran (beim derzeitigen Stand der Technik kann mit 1 Tonne Uran die gleiche Menge an Energie erzeugt werden wie mit 10 000 bis 16 000 Tonnen Öl) ist der Transport weniger störungsanfällig, und große Energievorräte lassen sich leichter anlegen als mit fossilen Brennstoffen.

Gesundheitsfolgen

Kernenergie könnte zur Verringerung der erheblichen Gesundheitsauswirkungen beitragen, die auf die Verbrennung fossiler Energieträger zurückzuführen sind.

- Die Gesundheitsfolgen von betrieblichen Emissionen von Kernkraftwerken sind verschwindend gering im Vergleich zu denen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe.
- Die Zahl langfristiger Todesfälle, die auf Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger zurückzuführen sind, ist weitaus höher als die Zahl der Todesfälle infolge von Unfällen bei der Energieerzeugung (alle Energiequellen zusammengenommen).
- Der Vergleich von Daten zur Häufigkeit und zu den Folgen tatsächlicher Unfälle zeigen, dass das Unfallrisiko für die Kernenergie, entgegen der allgemeinen Vorstellung, wesentlich geringer ist als für fossile Energieträger.

Bewältigung der Herausforderungen für den Ausbau der Kernenergie

Die Kernenergie bietet die Chance, einen großen Teil des voraussichtlichen Anstiegs des Strombedarfs zu decken und zugleich die mit dem steigenden Stromverbrauch verbundenen potenziellen ökologischen, politischen und wirtschaftlichen Probleme zu verringern. Dennoch sind weite Teile der Öffentlichkeit der Ansicht, dass die Risiken der Kernenergie größer sind als ihre Vorteile. Die Nuklearindustrie ebenso wie die Regierungen, die Kernenergie einsetzen möchten, müssen Lösungen für die realen und/oder empfundenen Probleme in Bezug auf Sicherheit, Entsorgung und Stilllegung, Nichtverbreitung von Kernwaffen, Anlagensicherung sowie Kostenstruktur finden.

Sicherheit

Reaktorsicherheit ist eine globale Angelegenheit: Ein bedeutendes Vorkommnis in einem Land kann erhebliche Auswirkungen in den Nachbarländern haben. Die Nuklearindustrie hat Sicherheit und Umweltschutz zu ihren obersten Prioritäten erklärt, und daran darf sich nichts ändern; eine wirkungsvolle staatliche Aufsicht wird weiterhin äußerst wichtig sein.

- Die Sicherheitsbilanz der Kernkraftwerke und sonstigen kerntechnischen Anlagen im OECD-Raum ist hervorragend, wie sich an einer Reihe von Sicherheitsindikatoren zeigt. Diese gute Sicherheitsbilanz ist der technischen Reife der Branche sowie dem soliden regulatorischen Rahmen zu verdanken.
- Die Sicherheitsbilanz der Nuklearindustrie hat sich in den letzten Jahrzehnten weiter verbessert. Neue Reaktorkonzepte weisen passive Sicherheitsmerkmale auf, die die Anlagen insbesondere im Falle von unvorhergesehenen Ereignissen in sicherem Zustand halten können, ohne dass aktive Steuer- und Regeleinrichtungen zum Einsatz kommen müssen.
- In Anbetracht des wachsenden Interesses am Bau neuer Reaktoren und der Entwicklung der nächsten Generation von Reaktoren, arbeitet die internationale Staatengemeinschaft an Initiativen zur Erhöhung der Wirksamkeit und Effizienz des regulatorischen Rahmens.
- Denjenigen Ländern, die ohne bisherige Erfahrungen in diesem Bereich neue Kernkraftwerke bauen wollen, muss bei der Einführung zufriedenstellender industrieller, regulatorischer und rechtlicher Praktiken geholfen werden.

Entsorgung und Stilllegung

Die Verzögerungen und teilweise auch Misserfolge, zu denen es bei einigen großen Programmen zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle gekommen ist, wirken sich nach wie vor sehr nachteilig auf das Image der Kernenergie aus; Regierungen und Nuklearindustrie müssen zusammenarbeiten, um eine sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle zu gewährleisten.

- Da bislang noch keine Endlagerstätte für abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung eingerichtet wurde, wird von einigen die Ansicht vertreten, dass Endlagerung technisch schwierig, vielleicht sogar unmöglich sei.
- Die tatsächlich erzeugten Mengen an radioaktiven Abfällen sind gering und es stehen Techniken für ihre Entsorgung zur Verfügung. Auf internationaler Ebene herrscht Konsens darüber, dass die Endlagerung von hochaktiven Abfällen in geologischen Formationen technisch machbar und sicher ist.
- Eine Vielzahl von Kernreaktoren wurde bereits erfolgreich stillgelegt, darunter mehrere Reaktoren in den Vereinigten Staaten mit Kapazitäten von über 100 MWe, die vollständig zurückgebaut wurden.
- Die Kosten der Abfallentsorgung und der Stilllegung von Kernkraftwerken machen nur rd. 3% der Gesamtkosten der Nuklearstromerzeugung aus; es bestehen Finanzierungssysteme für Entsorgungs- und Stilllegungsverpflichtungen.

Nichtverbreitung und Anlagensicherung

Die internationale Nukleargemeinschaft muss zusammenarbeiten, um die Verbreitung von Kernwaffen und den Missbrauch von radioaktivem Material durch kriminelle oder terroristische Vereinigungen zu verhindern.

- Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen stellt seit fast vier Jahrzehnten erfolgreich die rechtliche und politische Grundlage für das internationale System zur Begrenzung der Verbreitung von Kernwaffen dar.
- Multilaterale Ansätze für den nuklearen Brennstoffkreislauf, die derzeit im Gespräch sind, können der internationalen Staatengemeinschaft größere Sicherheit bieten, dass proliferationsrelevante Technologien nicht verbreitet werden.
- Fortgeschrittene Nukleartechnologien zielen darauf ab, das Proliferationsrisiko zu verringern und die Resistenz gegenüber Sabotage und terroristischen Bedrohungen zu erhöhen.

Kosten

Auf Durchschnittskostenbasis sind Bau und Betrieb von Kernkraftwerken in den meisten Fällen wirtschaftlich rentabel. Regierungen, die Investitionen in Kernreaktoren fördern wollen, müssen aber u.U. die mit der Planung und Genehmigung verbundenen bzw. die im Bereich der Entsorgung radioaktiver Abfälle und der Reaktorstilllegung gesehenen finanziellen Risiken verringern.

- Ein 2005 durchgeführter internationaler Vergleich der Durchschnittskosten der Stromerzeugung in Kern-, Kohle- und Gaskraftwerken zeigt, dass sich die Kernenergie im Wettbewerb mit Kohle und Gas behaupten kann, abhängig in gewissem Maße von den jeweiligen örtlichen Umständen. In der Zwischenzeit sind die Ölpreise auf ein Vierfaches angestiegen (Stand Juni 2008), und die Preise anderer fossiler Brennstoffe sind ihnen in diesem Aufwärtstrend gefolgt.
- Die Urankosten machen nur rd. 5% der Kosten der nuklearen Stromerzeugung aus.
- Die wirtschaftlichen Herausforderungen für Kernkraftwerke sind in den Investitionskosten, weniger in den Durchschnittskosten der Stromerzeugung begründet.
- Die Rentabilität der bereits getätigten Kernkraftwerksinvestitionen wurde vielfach durch eine bessere Verfügbarkeit, durch Leistungssteigerungen und Verlängerungen von Betriebsgenehmigungen erhöht; die durchschnittliche Verfügbarkeit der Kernenergieanlagen ist in den letzten 15 Jahren weltweit um 10 Prozentpunkte gestiegen und liegt nun bei 83%. Viele Anlagen wurden nachgerüstet, wodurch ihre Leistung in einigen Fällen um bis zu 20% erhöht wurde; zudem wurde die Laufzeit zahlreicher Reaktoren von 40 auf 60 Jahre verlängert.

Kernenergie und Gesellschaft

Wenn die Kernenergie expandieren soll, wird es zunehmend darauf ankommen, in Zusammenarbeit zwischen politischen Entscheidungsträgern, Nuklearindustrie und der Zivilgesellschaft den Wissensaufbau und die Öffentlichkeitsbeteiligung zu fördern.

- Umfrageergebnissen zufolge ist über die Hälfte der Einwohner der Europäischen Union der Ansicht, dass die Risiken der Kernenergie größer sind als ihre Vorteile.
- Die Bedenken der Öffentlichkeit betreffen eher bestimmte mit der Kernenergie zusammenhängende Risiken (radioaktive Abfälle, terroristische Bedrohung und Weiterverbreitung von Kernwaffen) als den eigentlichen Betrieb von Kernkraftwerken.
- Je mehr die Menschen über Kernenergie wissen, umso eher befürworten sie sie; die meisten haben jedoch das Gefühl, nicht hinreichend informiert zu sein.
- Das größte Vertrauen hat die Öffentlichkeit in Informationen aus der Wissenschaft und von Nichtregierungsorganisationen.
- Maßnahmen zur Einbeziehung der betroffenen Öffentlichkeit und zur Vertrauensbildung dürften zunehmend an Bedeutung gewinnen, wenn die Kernenergie als fester Bestandteil der Energiepolitik eines Landes akzeptiert werden soll.

Weiterentwicklung der Technologie

Die gegenwärtige Generation von Reaktoren hat eine hervorragende Bilanz und wird die Basis für eine Expansion der Kernenergie in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten bilden. Die internationale Zusammenarbeit in den Bereichen Reaktorkonzepte und Brennstoffkreislauf verspricht noch größere Fortschritte für die Zukunft.

Fortgeschrittene Reaktoren

Zukünftige Leichtwasserreaktoren – der voraussichtlich wichtigste Reaktortyp bis Mitte dieses Jahrhunderts – werden auf Konzepten der Generation III+ mit verbesserten Sicherheitsmerkmalen und einer höheren Wirtschaftlichkeit beruhen; vier Reaktoren der Generation III+ sind bereits in Betrieb, weitere befinden sich im Bau.

- Künftige gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren – die vermutlich um 2020 auf den Markt kommen werden – können bei ausreichend hohen Temperaturen betrieben werden, um die Gewinnung von Wasserstoff für den Transportsektor und sonstige Prozesswärmeanwendungen zu ermöglichen.
- Für Entwicklungsländer entworfene Kleinreaktoren zeichnen sich durch Konzepte inhärenter und passiver Sicherheit aus, die in Ländern mit begrenzter Erfahrung im Bereich der Kernenergie von besonderem Vorteil sind; diese Technologien werden allerdings noch nicht kommerziell genutzt.
- Kernenergiesysteme der Generation IV, die ab 2030 im kommerziellen Einsatz sein dürften, bieten eine verbesserte Proliferationsresistenz und einen erhöhten physischen Schutz; in globalen Initiativen wird auf eine sichere, nachhaltige Entwicklung der Kernenergie hingearbeitet, die eine zuverlässige Versorgung zu wettbewerbsfähigen Preisen bei gleichzeitiger Minimierung des Abfallaufkommens gestatten soll.

- Die Kernfusion befindet sich noch immer in einem experimentellen Stadium und wird wohl kaum vor Beginn der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, wenn nicht sogar erst später, für die kommerzielle Stromerzeugung genutzt werden können.

Gegenwärtige und fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe

In der aktuellen Praxis wird zwischen den Ländern unterschieden, die nukleare Brennstoffe wiederaufbereiten, und denen, die dies nicht tun. Unter den drei Ländern mit den größten Kernkraftwerksparks nutzen Frankreich und Japan die Möglichkeit der Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente, während die Vereinigten Staaten von dieser Technologie derzeit nicht Gebrauch machen. Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe mit Wiederaufbereitung werden gegenwärtig in mehreren Ländern, darunter auch die Vereinigten Staaten, untersucht und entwickelt.

- Durch Wiederaufbereitung der derzeitigen Bestände an abgebrannten Brennelementen wäre die Brennstoffversorgung für etwa 700 Reaktorbetriebsjahre von Leichtwasserreaktoren gesichert. Andere potenziell vorhandene Brennstoffquellen könnten die Brennstoffversorgung für weitere 3 000 Reaktorjahre gewährleisten.
- Schnelle Reaktoren mit geschlossenem Kernbrennstoffkreislauf, wie sie vom Generation IV International Forum gegenwärtig untersucht werden, könnten so ausgelegt werden, dass sie existierende Plutoniumbestände verbrennen oder Plutonium aus nicht spaltbaren Uranisotopen erbrüten. Durch Letzteres kann die Energieausbeute aus einer gegebenen Menge an Uran um bis zu einem 60-Fachen erhöht werden, womit die Uranvorräte noch für Tausende von Jahren ausreichen würden.
- Die Wiederaufbereitung bietet auch Vorteile in Bezug auf die Entsorgung abgebrannter Brennelemente, da sie eine deutliche Verringerung der Menge derjenigen hochaktiven Abfälle ermöglicht, die der geologischen Endlagerung zugeführt werden müssen.
- Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe könnten in Zukunft eine Abtrennung langlebiger Isotope und deren anschließende Beseitigung durch Wiederbestrahlung in kommerziellem Umfang ermöglichen. Die Radioaktivität der Abfallstoffe aus abgebrannten Brennelementen würde dann innerhalb von einigen hundert Jahren auf ein niedrigeres Niveau sinken als das des Urans, aus dem der Brennstoff hergestellt wurde.

Zusammenfassung des Berichtes

Soziale, politische und ökologische Auswirkungen des weltweiten Energieverbrauchs im 21. Jahrhundert

Energie, insbesondere Strom, ist für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung ebenso wie die Erhöhung der Lebensqualität unerlässlich. Es herrscht jedoch weitgehend Einigkeit darüber, dass der Energieverbrauchstrend des letzten Jahrhunderts nicht zukunftsfähig ist. Der Klimawandel, ausgelöst durch anthropogene CO₂-Emissionen, hat ökologischen Folgen, zu denen sozio-politische Bedrohungen infolge steigender Energiepreise sowie eines möglichen Mangels an sicheren Energieversorgungsquellen hinzukommen.

Die starke wirtschaftliche Expansion vieler Entwicklungsländer, die mit einem energieintensiveren Lebensstil verbunden ist, sowie die voraussichtliche Verdoppelung der Weltbevölkerung, von der der Großteil auf die Entwicklungsländer entfällt, werden den Energieverbrauch im 21. Jahrhundert stark anwachsen lassen. Der aktuelle jährliche Pro-Kopf-Energieverbrauch schwankt stark je nach Land und Region; auf die Entwicklungsländer, die rund drei Viertel der Weltbevölkerung stellen, entfällt heute nur ein Viertel des Weltenergieverbrauchs. Bei Fortführung der bisherigen Politik dürften sowohl die gesamte Primärenergieversorgung als auch der weltweite Stromverbrauch bis 2050 um einen Faktor von etwa 2,5 steigen.

Wenn die Mehrzahl der Länder ihre bisherige Politik fortsetzt, wird der Verbrauch fossiler Energieträger zur Deckung des stetig wachsenden Energiebedarfs unaufhaltsam ansteigen, und die Kernenergie wird wohl kaum einen wesentlichen Beitrag leisten. Dieser Anstieg des Verbrauchs von fossilen Brennstoffen wird mit erhöhten CO₂-Emissionen einhergehen, die – wie die Wissenschaft und die Erfahrungen der jüngsten Vergangenheit gezeigt haben – entsprechend starke Auswirkungen auf unser Klima haben werden, und dürfte infolge einer verringerten Energieversorgungssicherheit und steigender Energiepreise zu politischer und wirtschaftlicher Instabilität führen.

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen der Vereinten Nationen hat in seinem jüngsten, 2007 veröffentlichten Bericht aufgezeigt, dass umweltverträgliche Energiequellen unerlässlich sind, um die Konzentration an Treibhausgasen und insbesondere CO₂ in der Atmosphäre zu begrenzen. Die Stromerzeugung ist für 27% der weltweiten anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich und die bei weitem größte und am raschesten wachsende Quelle von Treibhausgasemissionen.

Die Deckung des für einen fortgesetzten sozialen und wirtschaftlichen Fortschritt erforderlichen Energiebedarfs bei gleichzeitiger Bewältigung seiner potenziellen ökologischen und soziopolitischen Auswirkungen gilt als eine der großen globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Bis 2050 dürfte sich der globale Stromverbrauch um einen Faktor von etwa 2,5 erhöhen.

2005 lag der Pro-Kopf-Stromverbrauch des Großteils der Weltbevölkerung deutlich unter 4 000 kWh, dem Wert, unterhalb dessen eine rasche Abnahme der Lebenserwartung und des Bildungsniveaus zu beobachten ist. Der stärkste Anstieg des Stromverbrauchs im Zeitraum bis 2030 ist in Indien und China zu erwarten. In den Vereinigten Staaten ist der Stromverbrauch in den vergangenen 55 Jahren kontinuierlich gestiegen, und es sind keine Zeichen einer Verlangsamung zu erkennen. Da andere Länder das gleiche Entwicklungsniveau anstreben wie die OECD-Länder, wird ihr Energieverbrauch früher oder später demselben Muster folgen. Mit einer Stabilisierung des Stromverbrauchs ist daher kaum zu rechnen.

Sollten die VN-Projektionen für die Bevölkerungsentwicklung und die Projektionen des IPCC für das Pro-Kopf-BIP und die Energieintensität zutreffen, muss die CO₂-Intensität des globalen Energiesystems um einen Faktor von 4 reduziert werden, um die dem IPCC zufolge zur Stabilisierung des Klimas erforderliche Senkung der CO₂-Emissionen um 50% bis 2050 zu erzielen. Dies ist eine gewaltige Herausforderung, zumal die IPCC-Daten zeigen, dass sich die CO₂-Intensität in den letzten 35 Jahren um weniger als 10% verringert hat.

Treffen die Projektionen zu, muss der durchschnittliche CO₂-Ausstoß je Energieverbrauchseinheit bis 2050 um einen Faktor von 4 reduziert werden.

Auch die Versorgungssicherheit ist weltweit zu einem wichtigen Anliegen geworden, vor allem in Ländern, die selbst über wenig fossile Energieressourcen verfügen und daher von Energieimporten abhängig sind. Der Großteil der problemlos gewinnbaren Öl- und Gasreserven der Welt konzentriert sich auf einige wenige Länder im Nahen Osten sowie die Russische Föderation. In den letzten Jahrzehnten war dies eine erhebliche Ursache von Spannungen wirtschaftlicher und politischer Art.

Gegenwärtiger und voraussichtlich künftiger Beitrag der Kernenergie zur weltweiten Energieversorgung

Im Prinzip könnte ein großer Teil des voraussichtlichen Anstiegs des Strombedarfs durch Kernenergie gedeckt werden, womit zugleich die globalen ökologischen, politischen und wirtschaftlichen Probleme verringert werden könnten, die an fossile Brennstoffe geknüpft sind.

Der gegenwärtige Beitrag der Kernenergie zur Weltenergieversorgung

Die ersten für die zivile Nutzung bestimmten Kernreaktoren wurden in den 1950er Jahren gebaut, womit der Grundstein für eine starke Expansion der Kernenergie in den 1970er und 1980er Jahren gelegt wurde. Die Reaktorunfälle von Three Mile Island (1979) und Tschernobyl (1986) sowie der Einbruch der Preise für fossile Brennstoffe Mitte der 1980er Jahre setzten diesem raschen Wachstum ein Ende.

Im Juni 2008 waren in 31 Staaten /Volkswirtschaften insgesamt 439 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 372 GWe in Betrieb. Im Jahre 2006 wurden 2,6 Mrd. MWh Strom in Kernkraftwerken erzeugt, womit 16% des weltweiten und 23% des Stromverbrauchs der OECD-Länder gedeckt wurden. Die weltweite Betriebserfahrung mit Kernkraftwerken beläuft sich heute auf umgerechnet

über 12 700 Reaktorjahre. 57% der weltweiten Kernkraftwerksleistung entfallen auf Frankreich, Japan und die Vereinigten Staaten; 16 Länder erzeugten 2007 mehr als ein Viertel ihres Stroms in Kernkraftwerken.

Im Juni 2008 waren in 15 Staaten/Volkswirtschaften insgesamt 41 Kernkraftwerke im Bau. Durch diese Kraftwerke wird sich die weltweite Kernenergieleistung um 9,4% erhöhen. In Asien beträgt die durchschnittliche Baudauer derzeit von 62 Monate; von den 18 Reaktoren, die zwischen Dezember 2001 und Mai 2007 ans Netz gingen, wurden drei in 48 Monaten oder weniger fertiggestellt.

Die Stromproduktion der bereits existierenden Kernkraftwerke wurde durch eine höhere Verfügbarkeit, Leistungssteigerungen und Verlängerungen der Betriebsgenehmigungen ausgeweitet. Die Verfügbarkeit der Kernenergieanlagen ist in den vergangenen zehn Jahren weltweit deutlich gestiegen. Obwohl sich die Erzeugungskapazität nur um 1% jährlich erhöht hat, nahm die Nuklearstromerzeugung um 2,5% pro Jahr zu. Durch die Nachrüstung bestehender Anlagen wurde die weltweite Erzeugungskapazität um rd. 7 GWe gesteigert, und in den Vereinigten Staaten wurde für 48 Reaktoren die Betriebsgenehmigung verlängert (Stand Mai 2008), so dass ihre zulässige Betriebsdauer von 40 auf 60 Jahre steigt.

Obwohl die meisten Dienstleistungsunternehmen im Bereich des Brennstoffkreislaufs in Frankreich, der Russischen Föderation, dem Vereinigten Königreich und den Vereinigten Staaten angesiedelt sind, verfügen insgesamt 18 Länder über Kapazitäten zur Herstellung von Brennelementen, wozu sie z.T. angereichertes Uran importieren müssen.

Der voraussichtliche künftige Beitrag der Kernenergie

Insbesondere in China, Indien, der Russischen Föderation, der Ukraine und den Vereinigten Staaten ist der Bau einer großen Zahl neuer Kernkraftwerke geplant. In Westeuropa liegen derzeit keine festen Pläne für neue Kapazitäten vor, abgesehen von den in Finnland und Frankreich im Bau befindlichen Kernkraftwerken. Die Regierung des Vereinigten Königreichs setzt sich für den Bau neuer Kernkraftwerke ein, bislang sind aber noch keine festen Aufträge erteilt worden. Die neu gewählte italienische Regierung hat vor kurzem ebenfalls Interesse am Bau von Kernreaktoren bekundet. Mehrere europäische Länder – Belgien, Deutschland, Spanien und Schweden – beabsichtigen, ihre Abhängigkeit von der Kernenergie deutlich zu reduzieren, da sie sich für einen Ausstieg aus der Kernenergie entschieden haben. In einigen dieser Länder ist die politische Meinung jedoch gespalten, und wird die Kernenergie noch eine Zeitlang eine wichtige Rolle im Energiemix spielen. Als Datum für die endgültige Stilllegung aller Kernreaktoren ist in Deutschland 2022 und in Belgien sowie Schweden 2025 vorgesehen. In Osteuropa ist die Einstellung zur Kernenergie wesentlich positiver, und viele Länder haben dort die feste Absicht, neue Kernkraftwerke zu bauen.

2006 deckten
insgesamt
439 Kernkraftwerke
16% des weltweiten
und 23% des
Strombedarfs der
OECD-Länder.

NEA-Annahmen

Niedrig-Szenario – Neue Kernkraftwerke werden in den zwei Jahrzehnten bis 2030 nur als Ersatz für stillgelegte Anlagen gebaut. Die Kapazität wird durch Laufzeitverlängerungen, Kraftwerksnachrüstung und Ersatz durch leistungsstärkere Anlagen auf demselben Niveau gehalten oder leicht erhöht.

Zwischen 2030 und 2050:

- erfolgreiche CO₂-Abtrennung und -Speicherung,
- erfolgreicher Einsatz erneuerbarer Energien,
- wenig Erfahrung mit neuen Nukleartechnologien,
- geringe öffentliche und politische Akzeptanz der Kernenergie.

Hoch-Szenario – Die Laufzeitverlängerungen und Kraftwerksnachrüstungen setzen sich fort. Die derzeitigen Pläne und maßgeblichen Absichtserklärungen der Länder für den Kapazitätsausbau bis 2030 werden weitgehend umgesetzt.

Zwischen 2030 und 2050:

- keine großen Fortschritte bei CO₂-Abtrennung und -Speicherung,
- enttäuschende Ergebnisse im Bereich erneuerbarer Energien,
- gute Erfahrungen mit Nukleartechnologien,
- zunehmende Sensibilisierung der Öffentlichkeit für den Klimawandel und die Versorgungssicherheit, wodurch die Regierungen stark beeinflusst werden,
- hohe öffentliche und politische Akzeptanz der Kernenergie,
- weithin genutzte und erfolgreiche Emissionshandelssysteme.

Aus den derzeitigen Plänen und maßgeblichen Absichtserklärungen der Länder ist zu schließen, dass die Vereinigten Staaten, Frankreich, Japan, Russland, China und Korea 2020 über die größten installierten Kernkraftwerksleistungen verfügen werden. Der stärkste Leistungsausbau ist in China und den Vereinigten Staaten geplant. Die Länder, die weltweit am meisten Kernenergie produzieren, sind mit Ausnahme von Frankreich nicht diejenigen, die auch am stärksten von Kernenergie abhängig sind. In der Gruppe der fünf voraussichtlich größten Kernenergieproduzenten im Jahr 2020 werden die Vereinigten Staaten und China wahrscheinlich nur einen Kernenergieanteil von 20% bzw. 5% aufweisen. Obwohl einige Länder, in denen es bislang keine Kernkraftwerke gibt, beabsichtigen, in die Kernenergieerzeugung einzusteigen, dürfte sich die weltweit installierte Kernenergieleistung dadurch bis 2020 nur um rd. 5% erhöhen.

Die NEA hat ein Hoch- und ein Niedrig-Szenario für die Entwicklung der nuklearen Stromerzeugung aufgestellt, deren Projektionen zufolge die weltweit installierte Kernkraftwerksleistung zwischen 2008 und 2050 von 372 GWe auf zwischen 580 und 1 400 GWe anwachsen könnten. Im Hoch-Szenario erhöht sich der Anteil der Kernenergie an der weltweiten Stromerzeugung von derzeit 16% auf 22% im Jahr 2050. Diese Projektionen decken sich weitgehend mit denen anderer Organisationen.

Um diesen Leistungsausbau zu erreichen, müssten zwischen 2030 und 2050 durchschnittlich 23 (Niedrig-Szenario) bis 54 (Hoch-Szenario) neue Reaktoren pro Jahr fertiggestellt werden, um die vom Netz gehenden Kraftwerke zu ersetzen und die Nuklearstromerzeugung zu erhöhen. Die Geschichte der Kernenergie zeigt, dass es

möglich ist, weltweit neue Kernkraftwerke in einem Ausmaß zu bauen, wie es für die Realisierung des NEA Hoch-Szenarios bis 2050 erforderlich wäre. Aus der Erfahrung der Vergangenheit lässt sich auch ableiten, dass die weltweiten Fähigkeiten zum Bau von Kernkraftwerken ausreichen würden, um bis zum

Jahr 2030 einen Anteil der Kernenergie an der weltweiten Stromerzeugung von mindestens 30% zu erreichen – sofern die Länder in aller Welt dies anstreben –, im Vergleich zu 10% im Referenzszenario der Internationalen Energie-Agentur (IEA).

Im Hoch- ebenso wie im Niedrig-Szenario werden die OECD-Länder in der nuklearen Stromerzeugung vorherrschend bleiben. Trotz des raschen Wirtschaftswachstums, mit dem in Indien und China gerechnet wird, dürfte der Anteil dieser Länder an der globalen Kernenergieleistung 2050 noch immer relativ gering sein.

Laut den NEA-Projektionen werden die OECD-Länder bis 2050 in der nuklearen Stromerzeugung vorherrschend bleiben.

Rolle der Kernenergie bei der Verringerung der negativen Auswirkungen des wachsenden Energieverbrauchs

Auswirkungen auf den Klimawandel

Laut den Analysen des IPCC müssen die jährlichen CO₂-Emissionen gegenüber ihrem Niveau von 2005 um die Hälfte reduziert werden, um die Folgen des Klimawandels auf ein vertretbares Maß zu begrenzen. Bis 2050 müssen die Emissionen auf rd. 13 Gt/Jahr gesenkt werden. Untersuchungen zufolge werden die Emissionen 2050 bei 60 Gt/Jahr liegen, sofern keine drastischen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Die Stromerzeugung ist derzeit für 27% der weltweiten anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich und die bei weitem größte und am raschesten wachsende Quelle von Treibhausgasemissionen. Die Kernenergie ist über den gesamten Lebenszyklus gerechnet so gut wie CO₂-frei.

Die Stromerzeugung ist die größte und am raschesten wachsende Quelle von Treibhausgasemissionen.

Laut IEA muss eine breite Palette von Technologien kombiniert werden, um dieses sehr anspruchsvolle Emissionsminderungsziel zu erreichen, was äußerst hohe Effizienzsteigerungen sowohl in der Stromerzeugung als auch im Stromverbrauch, einen massiven Ausbau der erneuerbaren Energien, die Einführung von Technologien zur CO₂-Abtrennung und -Speicherung in großem Rahmen sowie einen sehr deutlichen Ausbau der Kernenergie beinhaltet.

Die Kernenergie ist jedoch die einzige so gut wie CO₂-freie Technologie, die ihre Fähigkeit zur Senkung zur CO₂-Emission in hinreichendem Umfang bewiesen hat. Laut den Projektionen des NEA Hoch- und Niedrig-Szenarios könnten die CO₂-Emissionen bis 2050 um 4-12 Gt/Jahr reduziert werden, wenn statt Kohle Kernenergie zur Stromerzeugung eingesetzt werden würde; im Hinblick auf den vom IPCC empfohlenen Zielwert von 13 Gt/Jahr wäre dies erheblich.

Kernenergie ist eine Form der Stromerzeugung, bei der so gut wie kein CO₂ freigesetzt wird; zudem ist sie die einzige Technologie, die ihre Fähigkeit zur Emissionsminderung im erforderlichen Umfang erwiesen hat.

Im Konzept der externen Kosten, das für die Stromerzeugung angewendet wird, sind Faktoren berücksichtigt, die nicht im Preis eingerechnet sind, darunter auch die Folgen des Klimawandels. Werden die externen Kosten in Kostenrechnungen für Stromerzeugungsketten berücksichtigt, zeigt sich, dass Kernenergie und Wasserkraft über den gesamten Lebenszyklus betrachtet die am wenigsten kostspieligen Formen der Stromerzeugung sind.

Dennoch wurde die Kernenergie im Kyoto-Protokoll nicht in die Liste der für die Clean-Development- und Joint-Implementation-Mechanismen zulässigen Technologien aufgenommen. Zudem war die Laufzeit des Kyoto-Protokolls zu kurz, um nennenswerte Auswirkungen auf die Investitionsentscheidungen der Kraftwerksindustrie zu haben. Inzwischen hat der Verhandlungsprozess für ein Folgeabkommen begonnen. Da der Kraftwerkssektor der größte CO₂-Verursacher ist und ein stärkeres Emissionswachstum aufweist als alle anderen Sektoren, sollte das abzuschließende Folgeabkommen wesentlich langfristiger ausgerichtet sein und alle zur Verfügung stehenden Optionen berücksichtigen.

Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit

Kernenergie ist zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit besser geeignet als fossile Energieträger, weil der erforderliche Brennstoff – Uran – aus verschiedenen Quellen bezogen werden kann und die wichtigsten Anbieter in politisch stabilen Ländern angesiedelt sind. Auf Grund der hohen Energiedichte von Uran (beim derzeitigen Stand der Technik kann mit 1 Tonne Uran die gleiche Menge an Energie erzeugt werden wie mit 10 000 bis 16 000 Tonnen Öl) ist der Transport auch weniger störungsanfällig. Die hohe Energiedichte sowie der geringe Anteil, den das Uran an den Kosten der Nuklearstromerzeugung hat, sorgen zudem dafür, dass große Energievorräte einfach und kostengünstig gelagert werden können.

Die derzeit gesicherten Uranvorkommen könnten ausreichend sein, um ein deutlich ausgebautes globales Kernenergieprogramm über Jahrtausende mit Brennstoff zu versorgen; dazu wären aber sogenannte Schnelle Brutreaktoren erforderlich, eine Technik, die bereits weit entwickelt ist, aber noch nicht kommerziell genutzt wird.

Die bereits entdeckten Uranvorkommen sind ausreichend, um bei einem offenen Brennstoffkreislauf (d.h. ohne Wiederaufbereitung) eine Expansion der weltweiten Kernenergieleistung bis mindestens 2050 zu gestatten, womit mehrere Jahrzehnte blieben, um neue Vorkommen zu entdecken. Das Verhältnis Rohstoffvorräte/Verbrauch ist für Uran derzeit besser als für Gas oder Öl. Mit den vermuteten Vorkommen, auf deren Vorhandensein regionale geologische Daten schließen lassen, könnte die Uranversorgung für Hunderte von Jahren gesichert sein.

Durch die Wiederaufbereitung der Bestände an bestrahlten Brennelementen, die noch über die Hälfte des ursprünglichen Energiegehalts aufweisen, könnte Brennstoff für etwa 700 Reaktorjahre bereitgestellt werden (Leichtwasserreaktoren mit einer Nennleistung

von 1 000 MWe und einer Verfügbarkeit von 80%). Zusätzliche Ressourcen, z.B. in Form von angereichertem Uran sowie Uran und Plutonium aus ehemaligen militärischen Beständen, könnten die Brennstoffversorgung für weitere rd. 3 100 Reaktorjahre sichern.

Durch die Umwandlung von nicht spaltbarem Uran in spaltbares Material in schnellen Brutreaktoren mit geschlossenem Brennstoffkreislauf könnte die Energieausbeute von Uran um bis zu einem 60-Fachen erhöht werden. Bei Nutzung dieser Technologie wäre die nukleare Brennstoffversorgung für Jahrtausende gesichert, allerdings werden schnelle Brutreaktoren noch nicht kommerziell eingesetzt. Frankreich, die Russische Föderation, Indien und Japan verfügen über betriebsbereite schnelle Brutreaktoren (bei denen es sich z.T. um Forschungsreaktoren handelt).

Auswirkungen auf die Gesundheit

Der steigende Energieverbrauch hat einen erheblichen Einfluss auf die Gesundheit. Die Auswirkungen von Luftverschmutzung sind nicht sicher, laut Schätzungen des OECD-Umweltausblicks bis 2030 dürften sie derzeit jedoch für fast 1 Million vorzeitiger Todesfälle pro Jahr verantwortlich sein. Die Kernenergie könnte einen Beitrag zur Verringerung der Gesundheitsschädigungen leisten, die auf die Verbrennung fossiler Energieträger zurückzuführen sind.

Bei einer rationalen Beurteilung der Gesundheitseffekte alternativer Technologien für die Stromerzeugung sollten sowohl die langfristigen Gesundheitsfolgen einer möglichen Freisetzung von Radioaktivität bei Unfällen als auch die wesentlich stärker verbreiteten Emissionen aus dem Betrieb fossiler Kraftwerke berücksichtigt werden. Es ist bekannt, dass Gas- und Partikelemissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger (SO_x , NO_x und Feinstaub) erhebliche gesundheitsschädigende Effekte haben. Lebenszyklusanalysen von Stromerzeugungsketten machen deutlich, dass die Kernenergie (auch bei Berücksichtigung der Auswirkungen radioaktiver Emissionen) eine der Technologien zur Stromerzeugung ist, die sich am besten zur Vermeidung emissionsbedingter Gesundheitsschädigungen eignet. Die Zahl der Todesfälle infolge emissionsbedingter Gesundheitsschädigungen ist weitaus höher als die der Todesfälle auf Grund von Unfällen in der Energieversorgungskette.

Vergleiche von Daten zur Häufigkeit und zu den Folgen tatsächlicher Unfälle in OECD-Ländern im Zeitraum 1969-2000, bezogen auf komplette Energieversorgungsketten, zeigen, dass Kernenergie ganz erheblich sicherer ist als Öl, Kohle und Erdgas, die wiederum deutlich sicherer sind als Flüssiggas (LPG). Die Aufmerksamkeit von Politik und Öffentlichkeit konzentriert sich jedoch auf das – sehr geringe – Risiko schwerwiegender Unfälle, die auf Grund der freigesetzten Radioaktivität langfristige Todesfälle zur Folge haben könnten.

Bewältigung der Herausforderungen für den Ausbau der Kernenergie

Wenn das Potenzial der Kernenergie voll ausgeschöpft werden soll, müssen die Zweifel der Öffentlichkeit in Bezug auf Sicherheit, Abfallentsorgung, Nichtverbreitung und Kosten angesprochen werden.

Trotz des Potenzials, das die Kernenergie im Hinblick auf die Verringerung globaler ökologischer und sozio-ökonomischer Bedrohungen besitzt, ist ein großer Teil der Öffentlichkeit der Ansicht, dass die Risiken der Kernenergie größer sind als ihre Vorteile. Wenn das Potenzial der Kernenergie in den kommenden Jahrzehnten voll ausgeschöpft werden soll, müssen die Zweifel von Öffentlichkeit und Politik in Bezug auf einige Aspekte dieser Technologie zerstreut werden, insbesondere Sicherheit, Abfallentsorgung und Reaktorstilllegung, physischer Schutz und Nichtverbreitung sowie Kostenstruktur.

In Anbetracht des wachsenden Interesses am Bau neuer Reaktoren und der Entwicklung der nächsten Generation von Reaktorkonzepten arbeitet die internationale Staatengemeinschaft an Initiativen zur Erhöhung der Wirksamkeit und Effizienz des regulatorischen Rahmens.

Sicherheit

Die Nuklearindustrie muss Sicherheit und Umweltschutz weiterhin als oberste Priorität behandeln. Die rasche Expansion der Kernenergie in den 1970er und 1980er Jahren endete vor allem infolge der Reaktorunfälle von Three Miles Island und Tschernobyl. Hinzu kam, dass der Betrieb von Kernkraftwerken auf Grund niedriger Preise für fossile Brennstoffe in vielen Ländern nicht mehr wirtschaftlich war. Trotz der derzeit hohen Preise für fossile Brennstoffe könnte jeder weitere Unfall, ganz gleich ob dabei signifikante Mengen an Radioaktivität in die Umwelt freigesetzt würden oder nicht, ernste Auswirkungen auf die Zukunft der Kernenergie haben.

Die nukleare Sicherheit ist eine globale Angelegenheit: Ein bedeutendes Ereignis in einem Land kann erhebliche Auswirkungen in den Nachbarländern haben. Auch wenn die Verantwortung für die nukleare Sicherheit eindeutig bei den einzelnen Ländern liegt, bemüht sich

die internationale Staatengemeinschaft um eine stärkere Harmonisierung der nationalen Sicherheitsvorkehrungen im Rahmen des Multinational Design Evaluation Programme (MDEP) und anderer internationaler Initiativen.

Das MDEP ist eine mit der Unterstützung der NEA von zehn Ländern eingeleitete Initiative zur Entwicklung innovativer Ansätze für eine optimale Nutzung der Ressourcen und Kenntnisse der nationalen Aufsichtsbehörden, die in Zukunft mit der Prüfung neuer Reaktorkonzepte betraut werden. Das Hauptziel der im Rahmen des MDEP unternommenen Anstrengungen ist die Festlegung von Aufsichtsverfahren und Vorschriften zur Erhöhung der Sicherheit neuer Reaktorkonzepte, die als Referenz dienen könnten. Die sich daraus entwickelnde Konvergenz der Aufsichtsverfahren und Vorschriften könnte eine bessere Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Aufsichtsbehörden ermöglichen und die Wirksamkeit und Effizienz der Prüfungen der Reaktorkonzepte erhöhen, die Teil der Genehmigungsverfahren der einzelnen Länder sind.

Neue Reaktorkonzepte zeichnen sich durch passive Sicherheitssysteme aus, die die Anlage insbesondere im Fall unvorhergesehener Ereignisse in sicherem Zustand halten, ohne dass aktive Steuer- und Regeleinrichtungen zum Einsatz kommen müssen. Einige fortgeschrittene Konzepte für – noch nicht gebaute – Kleinreaktoren umfassen integrale Kühlsysteme, bei denen sich Dampferzeuger, Druckhalter und Pumpen alle im Reaktordruckbehälter befinden, um das Risiko und die Folgen von Kühlmittelverluststörfällen zu verringern.

Es ist möglich, dass Länder, die bislang nur über sehr begrenzte Erfahrung mit Kernkraftwerken und dem entsprechenden regulatorischen Rahmen verfügen, Kernenergieprogramme einrichten. In diesem Fall ist es Pflicht der internationalen Staatengemeinschaft und insbesondere der Verkäuferländer sicherzustellen, dass diese „neuen“ Nuklearstaaten geeignete betriebliche und regulatorische Ansätze verfolgen und angemessene gesetzliche Verfahren einrichten.

Entsorgung und Stilllegung

Beim Großteil der radioaktiven Abfälle handelt es sich um schwach aktive und kurzlebige mittelaktive Abfälle, auf die jedoch nur ein kleiner Teil der Gesamtradioaktivität des Abfallaufkommens entfällt. Die Technologien zur Entsorgung dieser Abfälle sind weit ausgereift, und die meisten Länder mit umfangreichen Nuklearprogrammen haben Einrichtungen für ihre Entsorgung geschaffen oder befinden sich in einem fortgeschrittenen Stadium ihrer Entwicklung.

Die Verzögerungen und teilweise auch Misserfolge, zu denen es bei einigen großen Programmen zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle gekommen ist, wirken sich nach wie vor sehr nachteilig auf das Image der Kernenergie aus. Regierungen und Nuklearindustrie müssen zusammenarbeiten, um eine sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle zu gewährleisten. Da bislang noch keine Endlagerstätte für hochaktive Abfälle eingerichtet werden konnte, wird von einigen die Ansicht vertreten, dass Endlagerung technisch sehr schwierig, vielleicht sogar unmöglich sei. Außerdem wird gelegentlich angenommen, dass Abfallentsorgung und Reaktorstilllegung mit untragbaren Kosten verbunden sind.

Die erzeugten Mengen an hochaktiven Abfällen sind gering und können über lange Zeiträume sicher gelagert werden. In einem Leichtwasserreaktor mit einer Nennleistung von 1 000 MWe fallen z.B. rd. 25 Tonnen abgebrannter Brennelemente pro Jahr an, die für die Entsorgung als hochaktive Abfälle konditioniert werden können; werden diese abgebrannten Brennstäbe wiederaufbereitet, entstehen ungefähr 3 m³ verglaste hochaktive Abfälle.

Als Konsenslösung für die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und hochaktiver Abfälle gilt weltweit die Endlagerung in geologischen Formationen, deren technologische Grundlagen weitestgehend gesichert sind. Bislang wurde noch keine Endlagerstätte für abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle genehmigt, durch partizipative Entscheidungsprozesse

Dass es bislang nicht gelungen ist, Endlagerstätten für hochaktive Abfälle zu bauen, ist einer der Hauptgründe für die negative Wahrnehmung der Kernenergie – inzwischen gibt es jedoch einen internationalen Konsens zu Gunsten der geologischen Endlagerung.

auf nationaler Ebene werden jedoch Fortschritte in diesem Bereich erzielt. In den Vereinigten Staaten wurde bereits ein Standort ausgewählt, für den umfassende Untersuchungen durchgeführt wurden. In Finnland wurde ein Standort festgelegt, der auf politischer und lokaler Ebene auf Zustimmung stößt, und es ist möglich, dass dies in Schweden ebenfalls bald der Fall sein wird. In zahlreichen anderen Ländern, darunter Frankreich, Japan und das Vereinigte Königreich, wird derzeit nach geeigneten Standorten für Endlagerstätten für hochradioaktive Abfälle gesucht. Sollte es allen Ländern, die derzeit Anstrengungen in diesem Bereich unternehmen, gelingen, bis 2050 eine Endlagerstätte zu eröffnen, stünde dann nur für etwa ein Viertel der im Hoch-Szenario der NEA anfallenden abgebrannten Brennelemente und hochaktiven Abfälle noch kein endgültiger Entsorgungsweg fest.

Verschiedene Reaktoren wurden bereits erfolgreich stillgelegt, darunter mehrere Kernkraftwerke in den Vereinigten Staaten mit einer Kapazität von über 100 MWe, deren vollständiger Rückbau mit Entsorgung der dabei angefallenen Abfälle erfolgt ist. Eine vom britischen Handels- und Industrieministerium durchgeführte Analyse zeigte, dass die Kosten der Abfallentsorgung und Stilllegung von Kernkraftwerken nur 3% der Gesamtkosten der Nuklearstromerzeugung ausmachen. Es bestehen Finanzierungssysteme für die mit der Stilllegung verbundenen Verbindlichkeiten.

Schätzungsweise 70% der aktuellen weltweiten Stilllegungsverbindlichkeiten hängen mit militärischen Aktivitäten aus der Zeit des Kalten Kriegs und nicht mit dem Betrieb ziviler Kernkraftwerke zusammen.

Nichtverbreitung und Sicherung

Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen hat die Verbreitung von Kernwaffen seit fast vierzig Jahren erfolgreich eingedämmt.

Die Möglichkeit, dass nukleares Material oder Kerntechnologien, die für zivile Zwecke der Stromerzeugung bestimmt sind, für militärische Zwecke missbraucht werden könnten, weckt bei vielen Menschen große Besorgnis. Die im Rahmen des Vertrags über die Nichtverbreitung von Kernwaffen entwickelten Sicherungsmaßnahmen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) haben der internationalen Staatengemeinschaft gute Dienste im Hinblick darauf geleistet, die Nutzung von Nuklearmaterial oder Kerntechnologien für militärische Zwecke zu verhindern. Der Nichtverbreitungsvertrag

(NVV) wurde von 191 Ländern unterzeichnet und ist 1970 in Kraft getreten; 1995 wurde er auf unbestimmte Zeit verlängert. Die Sicherungsmaßnahmen werden durch diplomatische, politische und wirtschaftliche Maßnahmen flankiert und durch Ausfuhrkontrollen für kritische Technologien ergänzt.

Der NVV bildet seit fast vierzig Jahren die rechtliche Grundlage des internationalen Systems für die Eindämmung der Verbreitung von Kernwaffen. Seine künftige Wirksamkeit und Akzeptanz könnten jedoch durch verschiedene politische, juristische und technologische Entwicklungen in Frage gestellt werden. Um seinen fortgesetzten Erfolg zu sichern, muss er verbessert werden.

Besorgnis über die Verbreitung von Wiederaufbereitungs- und Anreicherungstechnologien hat die IAEO dazu veranlasst, multilaterale Ansätze vorzuschlagen, die für mehr Gewissheit darüber sorgen sollen, dass Anlagen des Brennstoffkreislaufs nicht zur Weiterverbreitung von Kernwaffen führen.

Diese Ansätze zielen darauf ab, die bestehenden kommerziellen Abmachungen für Anreicherung und Wiederaufbereitung durch eine Reihe möglicher Zusatzmechanismen zu stärken, darunter die Einführung internationaler Brennstoffliefergarantien, Anreize für die freiwillige Umwandlung existierender, einer nationalen Aufsicht unterstehender Anlagen in multinationale Einrichtungen sowie die Schaffung neuer multinationaler Anlagen für die Wiederaufbereitung und Entsorgung abgebrannter Brennelemente in gemeinschaftlichem Eigentum.

Mehrere andere Vorschläge sind ebenfalls im Gespräch bzw. befinden sich in der Entwicklung. Dazu gehören die auf Initiative der Vereinigten Staaten eingerichtete Global Nuclear Energy Partnership (GNEP), die im August 2008 21 Teilnehmerländer zählte, sowie das Projekt der Russischen Föderation für die Einrichtung einer internationalen Urananreicherungsanlage (IUEC). Auch Japan, Deutschland sowie eine Gruppe von sechs Ländern, die kommerzielle Anreicherungsanlagen betreiben, haben Vorschläge in die internationale Debatte zu diesem Thema eingebracht.

Während die internationalen Sicherungsmaßnahmen einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des Proliferationsrisikos leisten, können bestimmte Auslegungsmerkmale der Reaktoren die Umsetzung der entsprechenden Kontrollen erleichtern. Fortgeschrittene Nukleartechnologien werden so ausgelegt, dass sich die Proliferationsresistenz erhöht und ein verbesserter Schutz vor terroristischen Bedrohungen und Sabotage gewährleistet ist.

Kosten und Finanzierung

Ein 2005 von NEA und IEA durchgeführter internationaler Vergleich der Durchschnittskosten der Stromerzeugung in Kern-, Kohle- und Gaskraftwerken zeigte, dass sich Kernenergie im Wettbewerb mit Kohle und Gas behaupten kann, was allerdings in gewissem Maße von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten abhängig ist. In der Zwischenzeit haben sich die Ölpreise vervierfacht (Stand Juni 2008), und die Preise anderer fossiler Brennstoffe sind ihnen auf diesem Aufwärtstrend gefolgt. Bau und Betrieb neuer kerntechnischer Anlagen sind in wirtschaftlicher Hinsicht im richtigen Umfeld ganz klar rentabel. Sensitivitätsanalysen der Kosten der nuklearen Stromerzeugung machen allerdings deutlich, dass diese Kosten in besonderem Maße von den Gesamtbaukosten (ohne Zinsen) sowie den Kapital- bzw. Finanzierungskosten abhängig sind. Auch die hohen im Vorfeld anfallenden Kosten wirken abschreckend auf Investoren. Die wirtschaftliche Herausforderung für Kernkraftwerke liegt in den Investitionskosten, weniger in den Durchschnittskosten der Stromerzeugung.

Die Kosten der Nuklearstromerzeugung lassen sich in drei Hauptbestandteile aufgliedern: Anlageinvestitionen, Betrieb und Wartung sowie Brennstoffkreislauf. Die für den Kraftwerksbau erforderlichen Anlageinvestitionen machen üblicherweise 60% der Gesamtkosten der nuklearen Stromerzeugung aus, auf Betrieb und Wartung einerseits und Brennstoffkreislauf andererseits entfallen jeweils rd. 25% bzw. 15%. Die Urankosten selbst machen nur rd. 5% der Stromerzeugungskosten aus. Damit unterscheidet sich die Kostenstruktur der Nuklearenergie deutlich von derjenigen der fossilen Stromerzeugung, bei der die Brennstoffkosten dominieren.

Aus einem internationalen Vergleich geht hervor, dass sich Kernenergie im Wettbewerb mit Kohle und Gas behaupten kann; um Investitionen in Kernenergie zu fördern, müssen die Regierungen jedoch u.U. die Planungs- und Genehmigungsrisiken verringern.

Die Einführung wettbewerblicher Märkte für Strom hat sich im Allgemeinen günstig auf die bestehenden Kernkraftwerke ausgewirkt. Infolge des Wettbewerbsdrucks wurden Anstrengungen zur Verbesserung der Betriebsleistung unternommen, so dass der inhärente Wert der Anlagen voll ausgeschöpft werden konnte. In neuen ebenso wie bestehenden Anlagen kann die Wirtschaftlichkeit durch Leistungserhöhungen, Laufzeitverlängerungen und Verfügbarkeitssteigerungen verbessert werden. Die durchschnittliche Verfügbarkeit der Kernenergieanlagen hat sich in den letzten 15 Jahren weltweit um fast 10 Prozentpunkte erhöht und liegt nun bei 83%. Fünf Länder erzielten 2006 eine durchschnittliche Verfügbarkeit von über 90%, und 2007 hat sich die Zahl dieser Länder auf sechs erhöht; die weltbesten Reaktoren weisen heute eine Verfügbarkeit von rd. 95% auf. Viele Kraftwerke wurden nachgerüstet, um mehr Strom erzeugen zu können, und für einige wurde eine Leistungssteigerung von beachtlichen 20% erzielt. Für eine große Zahl von Kernkraftwerken wurde die zulässige Laufzeit von 40 auf 60 Jahre verlängert.

Die hohen Investitionskosten und die langen Genehmigungsverfahren führen bei den Investoren zu großer Zurückhaltung beim Bau neuer Kraftwerke. Regierungen, die Investitionen in Kernreaktoren fördern möchten, müssen u.U. die realen oder unterstellten finanziellen Risiken im Zusammenhang mit der Planung und Genehmigung von Kernkraftwerken sowie mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle und der Reaktorstilllegung beseitigen oder verringern. Im Hinblick auf die Reduzierung der politikbezogenen Risiken der Investoren wäre es ferner von Vorteil, einen breiten nationalen Konsens über das zu verfolgende Nuklearprogramm zu erzielen.

Außerdem müssen die Regierungen gegebenenfalls klare, langfristige Vorkehrungen für die Festsetzung eines Preises für CO₂-Emissionen oder einen Emissionshandel schaffen. Der Großteil der potenziellen externen Kosten ist im Fall der Kernenergie bereits internalisiert, wohingegen die externen Kosten bei fossilen Energieträgern in etwa genauso hoch sind wie die direkten Kosten. Auch die Art und Weise, wie die Einnahmen der Kraftwerksbetreiber aus der Stromerzeugung besteuert werden, kann Einfluss auf die relative Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Stromerzeugungsoptionen haben und Negativanreize für den Bau kapitalintensiver Anlagen wie Kernkraftwerke und erneuerbare Energieanlagen schaffen. Die Regierungen sollten sicherstellen, dass ihre steuerlichen Bestimmungen mit ihren energiepolitischen Zielen in Einklang stehen.

Eine der wichtigsten Herausforderungen für den Ausbau der Kernenergie besteht darin, Länder, die eigene Kernenergieprogramme starten, von der Notwendigkeit der Einhaltung des internationalen Rechtsrahmens zu überzeugen.

Gesetzlicher Rahmen, Infrastruktur und Ressourcen

Der derzeitige internationale Rechtsrahmen besteht aus rechtsverbindlichen Verträgen, Abkommen, Vereinbarungen und Resolutionen, die durch zahlreiche nicht rechtsverbindliche Verhaltensregeln, Richtlinien und Standards ergänzt werden. Dieser Rahmen hat in den letzten fünfzig Jahren erhebliche Veränderungen erfahren. Auf nationaler und internationaler Ebene muss der Rechtsrahmen flexibel genug sein, um an künftige Entwicklungen, wie einen deutlichen Anstieg der weltweiten Kernenergieproduktion, angepasst werden zu können. Eine der wichtigsten Herausforderungen für den Ausbau

der Kernenergie besteht darin, Länder, die eigene Kernenergieprogramme starten, von der Notwendigkeit der Einhaltung der Regeln des internationalen Rechtsrahmens zu überzeugen. Diese Herausforderung betrifft auch jene Länder, die bereits Nuklearprogramme aufgenommen haben, bislang aber ablehnen, ihre Regelungen an den bestehenden internationalen Rahmen anzupassen.

Nationale Aufsichtsorgane sind wichtige Bestandteile des nationalen Rechtsrahmens, die folgenden Kriterien gerecht werden müssen:

- angemessene rechtliche, technische sowie organisatorische Kompetenz,
- adäquate personelle und finanzielle Ressourcen zur Erfüllung ihrer Aufgaben,
- Freiheit vor Einflussnahme, die Sicherheitsinteressen zuwiderlaufen könnte.

In Anbetracht des voraussichtlichen Anstiegs der Nachfrage nach Kernenergie könnten die betroffenen Akteure nicht nur umfassendere und bestimmtere nationale Gesetze, sondern auch wirkungsvollere internationale Abkommen über die Einbeziehung der Öffentlichkeit einfordern. Die Weiterentwicklung und Umsetzung verantwortungsvoller Governance-Strukturen ist ein notwendiger Schritt auf dem Weg zu Aufklärung, Stärkung der Eigenverantwortung und Einbeziehung der Öffentlichkeit in den Entscheidungsprozess über die Zukunft der Kernenergie und deren Gestaltung. Damit dies effektiv geschehen kann, bedarf es eines Rechtsrahmens, der Transparenz und die Einbeziehung der betroffenen Akteure fördert. Die Gesetzgeber werden voraussichtlich dafür sorgen, dass den betroffenen Akteuren mehr Rechte eingeräumt werden, um im Rahmen festgelegter gesetzlicher Verfahren am Entscheidungsprozess im Nuklearbereich teilzuhaben. Bereits heute sind sie überzeugt, dass eine stärkere Einbeziehung der betroffenen Akteure in den Entscheidungsprozess zur Umsetzung einer wirkungsvolleren Kernenergie- und Umweltpolitik führt, die das Vertrauen der Öffentlichkeit erhöht.

Ein großer Teil des heute in der Nuklearindustrie beschäftigten Personals wurde während der Zeit des Ausbaus der Nuklearprogramme in den 1960er und 1970er Jahren ausgebildet. Diese Fachkräfte stehen heute kurz vor dem Ruhestand oder haben ihn bereits erreicht. Die lange Lebensdauer der Kernkraftwerke hat im Zusammenspiel mit der Notwendigkeit spezialisierter technischer Kompetenzen zur Folge, dass die Nuklearindustrie in vielen Ländern inzwischen Probleme hat, die bestehende Kompetenz- und Qualifikationsbasis zu sichern und neue Kompetenzen für einen möglichen Ausbau der Kernenergie bereitzustellen. Das Angebot an qualifizierten Kräften wird durch die zunehmende Liberalisierung des Strommarkts beeinträchtigt, die in Kostensenkungsdruck und Reduzierung der staatlichen Mittel für die Kernforschung resultiert. Die meisten Länder sind sich der Notwendigkeit der Sicherung eines Bestands an qualifizierten Kräften inzwischen bewusst geworden, und in jüngster Zeit wurden auf internationaler, regionaler und nationaler Ebene Initiativen gestartet, um mehr Studierende für den Nuklearbereich zu gewinnen und ihnen den Zugang zu den entsprechenden Studiengängen zu erleichtern. Trotz der bereits erzielten Fortschritte müssen diese Anstrengungen weiter ausgedehnt werden.

Infolge einer alternden Erwerbsbevölkerung in der Nuklearindustrie, des in der letzten Zeit verzeichneten Rückgangs des Baus neuer Kraftwerke und der Notwendigkeit spezialisierter Kompetenzen sieht sich der Kernenergiesektor heute mit Personalengpässen konfrontiert.

Kernforschung ist in zahlreichen Bereichen unerlässlich, darunter Sicherheit, Entsorgung radioaktiver Abfälle, Nuklearwissenschaft und Technologieentwicklung. In den 1990er Jahren haben die meisten OECD-Länder mit eigenen Nuklearprogrammen die Mittel, die für FuE im Bereich Kernspaltung bereitgestellt werden, deutlich reduziert. Diese Verringerung der inländischen Ressourcen führte dazu, dass internationale Organisationen wie die NEA und die IAEA als Sammelpunkt des Fachwissens und der Ressourcen nationaler Forschungslabors, Unternehmen und Hochschulen zunehmend an Bedeutung gewannen. Diese Organisationen spielen auch eine wichtige Rolle bei Aktivitäten im Zusammenhang mit der Wissensbewahrung.

Die geringe Zahl der Kernkraftwerke, die in den letzten Jahren weltweit gebaut wurden, führte zu einer starken Konsolidierungsbewegung im Reaktorbausektor, weshalb die Kapazitäten für den Bau neuer Kraftwerke derzeit begrenzt sind. Entsteht jedoch eine entsprechende Nachfrage, können diese Kapazitäten wieder aufgestockt werden. Und es gibt Belege dafür, dass dies bereits geschieht.

Kernenergie und Gesellschaft

Unter der Voraussetzung, dass die Nuklearstromerzeugung wettbewerbsfähig ist, gilt die Besorgnis der Öffentlichkeit mehr bestimmten mit der Kernenergie zusammenhängenden Risiken (radioaktive Abfälle, Terrorismus, Weiterverbreitung) als dem eigentlichen Betrieb der Kraftwerke. Es ist anzunehmen, dass der Widerstand gegen die Kernenergie deutlich nachlassen würde, wenn die Frage der Endlagerstätten gelöst wäre.

Wenn die Kernenergie expandieren soll, wird es zunehmend darauf ankommen, in Zusammenarbeit zwischen politischen Entscheidungsträgern, Nuklearindustrie und Zivilgesellschaft den Wissensaufbau und die Öffentlichkeitsbeteiligung zu fördern.

Derzeit ist jedoch noch über die Hälfte der Bürger der Europäischen Union der Ansicht, dass die Risiken der Kernenergie größer sind als ihre Vorteile. Dies gilt insbesondere für Menschen in Ländern, in denen es keine Kernkraftwerke gibt, und die daher wenig persönliche Erfahrung mit Kernenergie haben bzw. sich unzureichend informiert fühlen. Je besser die Menschen über Kernenergie informiert sind, umso eher befürworten sie diese. Die meisten Menschen haben jedoch das Gefühl, nicht ausreichend informiert zu sein. Das größte Vertrauen hat die Öffentlichkeit in Informationen von Wissenschaftlern und Nichtregierungsorganisationen, wohingegen das Vertrauen in die nationalen Regierungen, die Energiekonzerne und die Atomsicherheitsbehörden in diesem Bereich wesentlich geringer ausfällt. Wenn die Kernenergie expandieren soll, wird es zunehmend auf eine

kontinuierliche Zusammenarbeit zwischen politischen Entscheidungsträgern, Nuklearindustrie und Zivilgesellschaft ankommen, die den Wissensaufbau und die Einbeziehung der Öffentlichkeit fördert.

Als äußerst wirkungsvoll hat es sich diesbezüglich erwiesen, den Bürgern durch direkte Einbeziehung ein tiefgreifenderes Verständnis nuklearer Fragen zu vermitteln. Ebenso wichtig wie die Informationsbereitstellung für die Aufklärung der Öffentlichkeit über die Risiken der Kernenergie ist indessen der Aufbau von Vertrauen in der Öffentlichkeit. Hierzu bedarf es einer offenen und klaren Kommunikation, der im Spannungsfeld der widerstreitenden Anforderungen von Sicherheit und Kostendruck eine bedeutende Rolle zukommen muss.

Weiterentwicklung der Technologie

Fortgeschrittene Reaktoren

Zu den fortgeschrittenen Reaktoren zählen jene der Generationen III, III+ und IV. Etwa 80% der derzeitigen Kernkraftwerke arbeiten mit Leichtwasserreaktoren der Generation II, von denen die meisten in den 1970er und 1980er Jahren erbaut wurden. Leichtwasserreaktoren dürften noch bis Mitte des Jahrhunderts in der Nuklearstromerzeugung vorherrschend sein. Die Mehrzahl der künftigen Kernkraftwerke wird jedoch auf Reaktorkonzepten der Generation III+ beruhen; vier Leichtwasserreaktoren der Generation III+ sind bereits in Betrieb, weitere befinden sich im Bau. Diese fortgeschrittenen Reaktorkonzepte bieten verbesserte Sicherheitsmerkmale und sind wirtschaftlicher als die derzeit in Betrieb befindlichen Reaktoren der Generation II.

Die Kernenergie könnte einen zunehmenden Beitrag zur CO₂-freien Wärmeerzeugung wie auch zur Stromerzeugung leisten; eine wichtige mögliche Entwicklung ist die Wasserstoffgewinnung für den Verkehrssektor.

Die Kernenergie könnte in Zukunft einen immer wichtigeren Beitrag zur Stromversorgung sowie zu einer so gut wie CO₂-freien Wärmeerzeugung leisten. Zwei Anwendungen von Nuklearwärme aus Leichtwasserreaktoren werden derzeit bereits genutzt: Fernwärmeerzeugung und Meerwasserentsalzung. Für die meisten anderen industriellen Prozesse sind Temperaturen erforderlich, die nur in gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren hergestellt werden können. Diese Reaktoren sind so ausgelegt, dass sie über Gasturbinen Strom erzeugen und bei ausreichend hohen Temperaturen für die Wasserstoffgewinnung und sonstige Prozesswärmeanwendungen betrieben werden können. Im Bestreben, die Abhängigkeit von Ölimporten zu reduzieren, werden weltweit erhebliche Mittel in FuE im Bereich der Wasserstoffgewinnung durch Kernenergie investiert, wobei ab etwa 2020 mit einer kommerziellen Nutzung gerechnet werden kann. Die Wasserstoffgewinnung könnte in den kommenden Jahrzehnten zu einer wichtigen Nutzungsmöglichkeit der Kernenergie werden.

Ein großer Teil des voraussichtlichen Anstiegs des Weltstromverbrauchs wird von Entwicklungsländern ausgehen, für die große Kernkraftwerke, wie sie in Ländern mit fortgeschrittener Kernenergietechnologie entwickelt und gebaut werden, nicht immer geeignet sind. Außer zur Deckung der Grundlastnachfrage in den großen aufstrebenden Volkswirtschaften, wie China und Indien, werden solche großen Kernkraftwerke den Anforderungen dieser Länder nicht optimal gerecht. Auf Grund ihrer geografischen Isolierung besteht in manchen Bevölkerungszentren Bedarf an kleinen und mittleren Reaktoren, die nach Möglichkeit auch Wärme und/oder Trinkwasser erzeugen sollten. Mehrere Konzepte für kleine und mittlere Reaktoren der Generation III/III+ werden derzeit in Erwägung gezogen, und bei der Hälfte dieser Reaktordesigns erübrigt sich der Brennelementwechsel vor Ort, wodurch sich die Kapitalkosten verringern und das Proliferationsrisiko sinkt. Es handelt sich dabei zumeist um Leichtwasserreaktoren mit inhärenten und passiven Sicherheitsmerkmalen, wie integralen primären Kühlsystemen. Solche

Auslegungsmerkmale sind besonders für Länder mit begrenzter Erfahrung im Nuklearbereich von Vorteil. Diese Reaktortechnologien werden allerdings noch nicht kommerziell genutzt.

Mit der Kommerzialisierung von Energiesystemen der Generation IV auf der Grundlage fortgeschrittener Reaktorkonzepte ist ab 2030 zu rechnen. Rund um den Globus wird derzeit eine breite Palette fortgeschrittener Reaktorkonzepte untersucht, und es ist deutlich zu erkennen, dass eine erhebliche internationale Zusammenarbeit nötig sein wird, um den maximalen Nutzen aus knappen FuE-Mitteln zu ziehen. Ein wichtiger Aspekt von Energiesystemen der Generation IV ist die verstärkte Proliferationsresistenz sowie der weiter verbesserte physische Schutz gegenüber terroristischen Bedrohungen. Das Generation IV International Forum (GIF) hat sechs Energiesysteme einschließlich ihres Brennstoffkreislaufs ausgewählt, die Gegenstand spezifischer FuE-Anstrengungen werden sollen; bei einigen davon handelt es sich um schnelle Reaktoren mit geschlossenem Brennstoffkreislauf. Derzeit bestehen mindestens drei internationale Initiativen zur Förderung einer sicheren, nachhaltigen, proliferationsresistenten Expansion verlässlicher Nukleartechnologien zu wettbewerbsfähigen Preisen, mit denen das Abfallaufkommen minimiert werden kann:

Die Kernfusion befindet sich noch immer in einem experimentellen Stadium und wird wohl kaum vor Beginn der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, wenn nicht erst später für die kommerzielle Stromerzeugung genutzt werden können.

- das GIF, für das die NEA das technische Sekretariat führt,
- die Global Nuclear Energy Partnership unter der Leitung der Vereinigten Staaten,
- das International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles unter Leitung der IAEO.

Auf der FuE-Ebene gelang bereits die kontrollierte Kernfusion, allerdings nur für wenige Sekunden. Das französische Cadarache wurde als Standort für den Bau des 5 Mrd. Euro teuren Internationalen Thermonuklearen Experimentellen Reaktors (ITER) gewählt, dem nächsten wichtigen Entwicklungsschritt. Die Kernfusion ist inhärent wesentlich komplexer als die Kernspaltung, und die Wirtschaftlichkeit dieser Technologie ist sehr ungewiss. Die Kernfusion wird kaum vor Beginn der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, wenn nicht erst später für die kommerzielle Stromerzeugung genutzt werden können.

Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe

Derzeit wird bei der Behandlung abgebrannter Brennelemente zwischen den Ländern unterschieden, die sich für eine Wiederaufbereitung entschlossen haben, und jenen, die beabsichtigen, die abgebrannten Brennelemente nach geeigneter Konditionierung direkt der Endlagerung in geologischen Formationen zuzuführen. Unter den drei Ländern mit den größten Kernkraftwerksparks betreibt Frankreich die Wiederaufbereitung und bietet anderen Ländern entsprechende Dienste auf kommerzieller Basis an; Japan bereitet die Brennstoffe auf, indem es entsprechende

Dienstleistungen bei anderen Ländern erwirbt, während es an eigenen Wiederaufbereitungseinrichtungen arbeitet. Die Vereinigten Staaten bereiten abgebrannte Brennelemente nicht auf, obwohl sie zuvor über entsprechende Kapazitäten verfügten.

Die bestehenden kommerziellen Wiederaufbereitungstechnologien ermöglichen sowohl die Wiedergewinnung von nicht verwertetem Uran und von Plutonium für die anschließende Nutzung in Mischoxid-Brennelementen, die in Leichtwasserreaktoren oder künftigen Schnellen Reaktoren eingesetzt werden können. Zudem ermöglichen sie eine Verringerung des Volumens der Abfälle, die der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen zugeführt werden müssen. Angesichts der sehr niedrigen Uranpreise der 1990er Jahre verlor die Wiederaufbereitung in wirtschaftlicher Hinsicht allerdings an Attraktivität. Außerdem weckte die Plutoniumabtrennung Bedenken über mögliche Proliferationsrisiken. In den letzten Jahren ist der Uranpreis wieder gestiegen.

Fortgeschrittene Wiederaufbereitungstechnologien versprechen die Möglichkeit einer Beseitigung der langlebigen Radioisotope in nuklearen Abfällen.

Fortgeschrittene Wiederaufbereitungstechnologien befinden sich in mehreren Ländern in der Entwicklung und sind Gegenstand internationaler Kooperationen im Rahmen des Generation IV International Forum sowie der von den Vereinigten Staaten geleiteten Global Nuclear Energy Partnership. Von diesen Technologien verspricht man sich zahlreiche Vorteile. So kann das Proliferationsrisiko verringert werden, wenn die Trennung von Plutonium und Uran vermieden wird. Im Wege der Abtrennung der langlebigen Isotope aus den abgebrannten Brennelementen (Partitioning) zur anschließenden Wiederbestrahlung können sie durch Umwandlung (Transmutation) beseitigt werden. Die Radiotoxizität der Abfälle aus der Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente würde sich dann durch radioaktiven Zerfall auf natürliche Weise in nur wenigen Jahrhunderten auf ein Niveau verringern, das unter dem des Natururans liegt, aus dem der Nuklearbrennstoff ursprünglich hergestellt wurde. Das Volumen und die Wärmelast der in geologische Endlager verbrachten Abfälle könnte dadurch deutlich reduziert werden, womit die Kapazität der Endlagerstätten erheblich erhöht werden könnte.

Darüber hinaus ist es möglich, Thorium zur Energieerzeugung in Kernreaktoren einzusetzen. Von Thorium wird angenommen, dass es in der Erdkruste in wesentlich größeren Mengen vorhanden ist als Uran. Das in der Natur vorkommende Thoriumisotop kann in ein spaltbares Uranisotop umgewandelt werden. In mehreren Ländern laufen FuE-Anstrengungen zum Thorium-Brennstoffkreislauf, diese Technologie hat jedoch noch nicht das kommerzielle Stadium erreicht.