

# ILK

INTERNATIONALE  
LÄNDERKOMMISSION  
KERntechnik

Baden-Württemberg · Bayern · Hessen



# ILK-Stellungnahme

## zur Nutzung der Kernenergie in Deutschland

*For the english version, please flip this booklet over!*

**November 2005**  
**Nr.: ILK-24 D**

## Vorwort

Die Internationale Länderkommission Kerntechnik - ILK - der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Hessen wurde im Oktober 1999 gegründet und besteht derzeit aus 13 Wissenschaftlern und Experten aus Deutschland, Finnland, Frankreich, Schweden, der Schweiz und den USA. Durch die unabhängige und objektive Beratung der drei Länder in Fragen der Sicherheit kerntechnischer Anlagen, der Entsorgung radioaktiver Abfälle sowie der Risikobewertung der Kernenergienutzung soll die ILK insbesondere einen wichtigen Beitrag liefern, die Zukunftsfähigkeit der Kernenergie in Deutschland zu bewerten.

Vor dem Hintergrund eines voraussichtlich anhaltend steigenden Strombedarfs sowie wirtschaftlicher und ökologischer Herausforderungen sind Weichenstellungen für die Stromerzeugung bis zum Jahr 2020 zu stellen. Dabei ist die Frage der Nutzung der Kernenergie ebenfalls zu berücksichtigen. Die ILK hat sich daher mit der Nachhaltigkeit von Szenarien zur Stromversorgung befasst, und die für eine weitere Nutzung der Kernenergie notwendigen sicherheitsbezogenen Rahmenbedingungen betrachtet. Die Ergebnisse sind in der vorliegenden Stellungnahme zur Nutzung der Kernenergie in Deutschland dargestellt, die auf der 38. ILK-Sitzung am 14./15. November 2005 in Landshut verabschiedet wurde. Die ILK stellt zusammenfassend fest, dass der Beitrag der Kernenergie zu einem nachhaltigen Strommix unverzichtbar ist. Die Sicherheit der Kernenergie ist gewährleistet und fortwährend auf dem Prüfstand und Fortschritte bei der Lösung der Entsorgungsfrage sind kurzfristig erzielbar.

Diese Stellungnahme wendet sich an die Landesbehörden als Auftraggeber der ILK, aber auch an die Bundesbehörden, die Betreiber, die Politik und die Öffentlichkeit.

Der Vorsitzende



Dr. Serge Prêtre

Vorwort	2
Zusammenfassung	4
1 Einführung	6
1.1 Ausgangssituation	6
1.2 Stromversorgung in Deutschland: Gegenwart und Zukunft	7
2 Nachhaltigkeit	9
2.1 Nachhaltigkeitsbewertung von Stromerzeugungstechnologien	9
2.2 Merkmale der Kernenergie	11
2.3 Aggregation der Ergebnisse	13
2.4 Bevorzugter Strommix für 2020	14
3 Sicherheitsbezogener Rahmen für die weitere Nutzung der Kernenergie	17
3.1 Sicherheit des Betriebs der Kernkraftwerke	14
3.1.1 Überprüfung und Erhalt der Sicherheit	18
3.1.2 Aktueller Sicherheitsstatus	24
3.1.3 Zukünftige Verbesserungen der Anlagensicherheit	25
3.2 Maßnahmen gegen terroristische Angriffe	26
3.3 Sicherungsmaßnahmen gegen Proliferation	27
3.4 Entsorgungsaspekte	28
3.5 Genehmigung und Aufsicht	31
4 Weiterentwicklung kerntechnischer Systeme	33
5 Literatur	35
6 Abkürzungsverzeichnis	39
Anhang 1: Nachhaltigkeitsindikatoren für Stromerzeugungstechnologien	40
Mitglieder der ILK	42
ILK-Veröffentlichungen	44

## ILK - Geschäftsstelle beim Bayerischen Landesamt für Umwelt

Bürgermeister-Ulrich-Str. 160  
D - 86179 Augsburg  
Telefon: +49-173-65 707-11/-10  
Telefax: +49-173-65 707-98/-96  
E-Mail: [info@ilk-online.org](mailto:info@ilk-online.org)  
<http://www.ilk-online.org>

## Zusammenfassung

### Der Beitrag der Kernenergie zu einem nachhaltigen Strommix ist unverzichtbar

- Vor dem Hintergrund eines voraussichtlich anhaltend steigenden Strombedarfs, wirtschaftlicher und ökologischer Herausforderungen sowie heute besser beurteilbarer technologischer Entwicklungen sind Weichen für die Stromerzeugung bis zum Jahr 2020 und darüber hinaus zu stellen.
- Die Auswahl zukünftiger Stromerzeugungstechnologien sollte, neben technologischen Gesichtspunkten, dem Nachhaltigkeitsgebot folgen, d. h. wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Kriterien abwägend betrachten und dabei den gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Technologie einschließen. Die ILK bietet dafür ein Modell an.
- Die Nachhaltigkeitsbewertung verfügbarer Stromerzeugungstechnologien zeigt, dass keine Technologie alle Kriterien optimal erfüllt. Die Kernenergie weist sehr gute Leistungsparameter im wirtschaftlichen und ökologischen Bereich auf, wird jedoch unter gesellschaftlichen Aspekten weniger gut bewertet.
- Um die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, Versorgungssicherheit zu gewährleisten und die Kyoto-Ziele zu verwirklichen, kann auf einen Beitrag der Kernenergie zu einem nachhaltigen Strommix nicht verzichtet werden; eine stabile politische Verankerung sollte erreicht werden und eine höhere gesellschaftliche Toleranz sollte gefördert werden.
- Bei einer oft favorisierten verstärkten Nutzung der Windenergie sind ihre stochastische Natur, die Kosten für notwendige Reservekapazitäten („Schattenkraftwerke“ mit CO<sub>2</sub>-Emissionen) und der Erhalt der Netzstabilität zu berücksichtigen.

### Die Sicherheit der Kernenergie ist gewährleistet und fortwährend auf dem Prüfstand

- Eine Vielzahl international anerkannter Maßnahmen gewährleistet eine ständige Prüfung und den Erhalt der Kernreaktorsicherheit auf hohem Niveau. Zu den Maßnahmen zählen die wiederkehrenden Sicherheitsüberprüfungen, die Beurteilung des Sicherheitsmanagements und der Sicherheitskultur, ein Alterungsmanagement und der Erhalt der Fachkompetenz des Personals.
- Diese Maßnahmen und sicherheitstechnische Nachrüstungen haben zu einer ausgezeichneten Sicherheitsbilanz der deutschen Kernkraftwerke geführt, die sich in einer deutlichen Verringerung des verbleibenden Risikos von hypothetischen Unfällen widerspiegelt.
- Möglichkeiten zur Verbesserung der Anlagensicherheit, insbesondere zur weiteren Reduzierung der Risiken durch angenommene schwere Unfälle, sind auch

weiterhin zu verfolgen - möglichst im Einvernehmen zwischen Aufsichtsbehörde und Betreibern, unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen.

- Die deutschen Kernkraftwerke sind gegen terroristische Einwirkungen durch die bestehende Auslegung, zusätzliche Sicherungsmaßnahmen der Betreiber und auf staatlicher Ebene getroffene Maßnahmen geschützt; alle diese Maßnahmen reduzieren die Attraktivität der Kernkraftwerke als Zielobjekte.
- Die Proliferationsgefahr bei der Nutzung der Kernenergie in Deutschland ist angesichts getroffener Sicherungsmaßnahmen und internationaler Überwachung sehr klein.
- Die kerntechnische Ausbildung an Universitäten samt zugehöriger Forschung sowie die aktive Beteiligung deutscher Einrichtungen an internationalen Forschungsinitiativen sind zu fördern. So können auch künftig in Deutschland neue sicherheitstechnische Erkenntnisse umgesetzt und innovative Anlagenkonzepte entwickelt werden.

### Fortschritte bei der Lösung der Entsorgungsfrage sind kurzfristig erzielbar

- Am Zwei-Endlagerkonzept ist auch für Deutschland festzuhalten; es ist international verankert.
- Nationale und internationale Bewertungen einer Endlagerung von hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen am Standort Gorleben stellen dessen Eignung bislang nicht in Frage. Daher sollte das Moratorium aufgehoben, die untertägige Erkundung von Gorleben fortgesetzt und eine Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt werden.
- Für die Endlagerung radioaktiver nicht wärmeentwickelnder Abfälle gibt es am Standort Konrad ein genehmigtes Endlager, das so bald wie möglich errichtet werden sollte.

### Das Atomgesetz sollte angepasst und das Aufsichtssystem überprüft werden

- Aufgrund ihrer sehr guten Sicherheitsbilanz sollten längere Betriebszeiten für Kernkraftwerke ermöglicht werden. Für Betriebszeiten von mehr als 40 Jahren sollte eine besondere Sicherheitsüberprüfung und -bewertung vorgenommen werden.
- Das Aufsichtssystem sollte einem "Peer-review" mit Beteiligung internationaler Experten unterzogen werden; dieser Abgleich mit aktuellen internationalen Erfahrungen, z. B. hinsichtlich Unabhängigkeit der Aufsichtsbehörde und einer Anwendung einer risikoinformierten und ergebnisorientierten Aufsicht, sollte zur Optimierung des derzeitigen Systems genutzt werden.

## 1 Einführung

Diese Ausarbeitung nimmt Stellung zur zukünftigen Stromversorgung in Deutschland, und dabei insbesondere zur möglichen Rolle der Kernenergie in einem nachhaltigen Strommix. Aufgrund der globalen Dimension von Energiethemen (Verfügbarkeit von Ressourcen, Klimawandel etc.) und der Verknüpfung der Strommärkte (die EU strebt einen wettbewerbsorientierten Binnenmarkt an) müssen dabei auch Entwicklungen und Bewertungen außerhalb Deutschlands berücksichtigt werden.

### 1.1 Ausgangssituation

Deutschland sollte ein angemessenes Wirtschaftswachstum anstreben, sowohl aus rein nationaler Sicht als auch, um die Lissabon-Strategie der EU umzusetzen ("wettbewerbsfähigster und dynamischster wissenschaftlicher Wirtschaftsraum der Welt"). Das "Grünbuch" [1], [2] der Europäischen Kommission zeigt große strukturelle Schwächen im Energiebereich auf und spricht die Notwendigkeit strategischer Entscheidungen in den kommenden Jahren an. Zugehörige Themen sind:

- Wettbewerbsfähigkeit (Beseitigung der Hindernisse für ein einwandfreies Funktionieren des Energiemarktes);
- Versorgungssicherheit (Reduzierung der Abhängigkeit von Energieimporten, insbesondere aus geopolitisch sensiblen Regionen, deren Umfang für das Jahr 2030 auf 70% prognostiziert wird) und
- "Umweltschutz/Nachhaltige Entwicklung" (vor allem die Einhaltung des Kyoto-Protokolls oder sogar noch strengerer Anforderungen zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung).

Die Entwicklung von weniger umweltbelastenden Energiequellen ist eines der Ziele, und die Kernenergie wird als Option darin explizit eingeschlossen.

Der Europäische Wirtschafts- und Sozialausschuss [3], [20] hat dargelegt, dass die Kernenergie mittelfristig unverzichtbar ist und daher als Option solange offen gehalten werden sollte, bis neue Technologien, z. B. die Kernfusion, verfügbar sind. Somit sollte die Kernenergie mindestens für die nächsten 30 bis 50 Jahre weiter genutzt werden. Schlüsselprobleme, wie der Schutz gegen Unfälle, die Minimierung des Restrisikos, die Stilllegung und die Entsorgung sollten "harmonisiert" angegangen werden, um ein hohes Maß an Sicherheit und über Verfahrensregelungen einen gesunden Wettbewerb zu gewährleisten.

<sup>1</sup> Zitat aus den "Schlussfolgerungen des Vorsitzes" des Europäischen Rates auf der Sondertagung am 23./24. März 2000 in Lissabon

Aus technischer<sup>2</sup> und organisatorischer<sup>3</sup> Sicht sind zudem internationale Entwicklungen auszumachen, die für die Bewertung und Nutzung der Kernenergie in Deutschland bedeutsam sind.

Die ILK berücksichtigt die obigen Aspekte; sie konzentriert sich auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Optionen zur Stromerzeugung und auf eine Bewertung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen und der Rahmenbedingungen ihres Einsatzes. Dieses liegt in der wissenschaftlichen Kompetenz der ILK; die Aussagen zum Strombedarf und die Überlegungen zu Versorgungsszenarien beruhen auf externer Zuarbeit.

### 1.2 Stromversorgung in Deutschland: Gegenwart und Zukunft

Im Gegensatz zu einigen anderen Europäischen Staaten [7] war Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten - und ist bis heute - in der Lage, Strom zur Deckung des eigenen Bedarfs zu erzeugen. Zusätzlich liefert Deutschland auch Strom in andere Länder, allerdings ist der Umfang sehr klein und z. B. nicht mit den Stromexporten Frankreichs zu vergleichen [7]. Die Stellung eines autarken Stromerzeugers hat sich hinsichtlich positiver Effekte auf den heimischen Arbeitsmarkt und einer Sicherung der nationalen Stromversorgung als erfolgreich erwiesen und wird selten in Frage gestellt. Es wird für diese Studie angenommen, dass Deutschland auf absehbare Zeit nicht zum Netto-Stromimporteur wird.

Der Energiebedarf in Europa wird weiter zunehmen: Für die EU wird für die nächsten Jahre ein jährlicher Anstieg im Bereich von 1,6% und für die neuen Mitgliedsstaaten von 2,2% erwartet, während für die EU-15 Staaten ein Anstieg von etwa 1% prognostiziert wird [8], [9]. Nach einigen Quellen [9] beträgt der resultierende Bedarf an Ersatz- und Neukraftwerken bis zum Jahr 2020 etwa 330 GWe, wobei Ersatzanlagen etwa 2/3 dieses Bedarfs ausmachen.

Vorhersagen für den zukünftigen Strombedarf in Deutschland gehen von leichten Steigerungen [10] bis hin zu einer konstanten Nachfrage aus. Dies ist bedingt durch die derzeitige wirtschaftliche Situation, aber auch durch verstärkte Stromeinsparungen und eine effizientere Nutzung durch private Haushalte und die Industrie. Allerdings wird in der näheren Zukunft eine Verringerung des Strombedarfs nicht erwartet; die aufgrund des Ausstiegs aus der Kernenergie entstehende Versorgungslücke<sup>4</sup> würde also nicht bereits durch einen Rückgang der Nachfrage behoben.

<sup>2</sup> Z. B. Anforderungen der Europäischen Betreiber [4], Entwicklung und Errichtungsgenehmigung des EPR

<sup>3</sup> Z. B. Übereinkommen über nukleare Sicherheit der IAEA [5], WENRA-Anforderungen [6]

<sup>4</sup> Der derzeitige Anteil der Kernenergie beträgt 28% und der der Erneuerbaren 9%. DENA [19] prognostiziert für 2015 eine Windenergieproduktion von 77,2 TWh (zum Vergleich: die Stromproduktion aus Kernenergie belief sich im Jahr 2004 auf 167 TWh). Selbst wenn der Anteil der Erneuerbaren bis zum Jahr 2020 auf 20% ansteigen sollte (wie politisch beabsichtigt), würde dies bei weitem nicht ausreichen, um die durch den Ausstieg aus der Kernenergie entstehende Lücke zu schließen.

Die Stromversorger werden auch zukünftig auf Herausforderungen reagieren müssen, wie z. B. einen steigenden Wettbewerb aufgrund des liberalisierten Marktes, einer größeren Bedeutung der sicheren Versorgung mit Energieressourcen (z. B. Erdgas) oder Preissteigerungen, die ungleich auf die einzelnen Technologien verteilt und schwer vorhersehbar sind. Ferner haben in den letzten Jahrzehnten ökologische Themen an Bedeutung gewonnen und werden weiterhin einen wichtigen und evtl. sogar weiter zunehmenden Einfluss haben (z. B. noch schärfere Maßnahmen gegen den Anstieg von CO<sub>2</sub>-Emissionen).

Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, Handlungsoptionen für die mittelfristige Stromversorgung (konkret bis zum Jahr 2020) zu entwickeln. Eine solche Bewertung ist heute realistischer durchzuführen, da einige technische Entwicklungen, insbesondere bei den neuen Technologien (z. B. Wind- und Sonnenenergie, Biomasse) und der Einfluss politischer Maßnahmen besser als noch vor einigen Jahren beurteilt werden können. Für die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern wird derzeit die Frage einer möglichen CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Lagerung, beispielsweise in ausgebeuteten Gas- und Ölfeldern, diskutiert. Ein großtechnischer Einsatz dieser Technologie innerhalb des Betrachtungszeitraums wird allerdings von der ILK als sehr unwahrscheinlich angesehen und im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Zur Beurteilung von Handlungsoptionen hat die ILK die Auswirkungen von exemplarischen Strommix-Szenarien für Deutschland herangezogen, die in einer kürzlich vorgelegten Studie des VDE dargestellt wurden [18] (siehe Abschnitt 2.4).

Für die Auswahl von Technologien zur Stromerzeugung gibt es verschiedene Ansätze. Nach Meinung der ILK muss die Formulierung einer zukunftsorientierten Energiepolitik neben den bisher bestimmenden wirtschaftlichen Überlegungen ökologische Zwänge und auch gesellschaftliche Einstellungen von Anfang an berücksichtigen. Diese Überlegungen beeinflussen wiederum die gesetzlichen Rahmenbedingungen, innerhalb derer Entscheidungen für zukünftige Kraftwerke getroffen werden. Somit schlägt die ILK vor, sich bei der Bewertung zukünftiger Stromerzeugungstechnologien und des resultierenden Strommixes an den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (s. u.) zu orientieren.

## 2 Nachhaltigkeit

### 2.1 Nachhaltigkeitsbewertung von Stromerzeugungstechnologien

Das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung ist definiert als die Fähigkeit, "die Bedürfnisse der Gegenwart zu befriedigen, ohne gleichzeitig die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zur Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse einzuschränken" [11]. Wie bei den meisten Nachhaltigkeitsbewertungen zieht die ILK die drei Dimensionen Wirtschaftlichkeit (z. B. Gewährleistung der Versorgungssicherheit und "Bezahlbarkeit"), Umwelt (z. B. Schonung der natürlichen Ressourcen und Klimaschutz) und gesellschaftliches Wohlergehen (z. B. Beitrag zum sozialen Frieden) heran, da auf diese Weise alle maßgeblichen Aspekte ausgewogen und unvoreingenommen berücksichtigt werden können. Eine Operationalisierung dieser Dimensionen sollte mittels anerkannter Kriterien und quantifizierbarer Indikatoren erfolgen. Obwohl verschiedene Organisationen, z. B. UNO<sup>5</sup>, IAEO oder OECD bereits auf diesem Gebiet tätig waren, ist ein allgemein anerkannter Satz spezifischer Indikatoren für das Gebiet der Stromversorgung derzeit nicht verfügbar. Die ILK [12] hat daher auf der Basis einer Studie des Paul Scherrer Institutes [13] eine methodische Vorgehensweise für einen Vergleich von Stromerzeugungstechnologien für Deutschland erstellt.

Dieses Instrumentarium soll eine breite gesellschaftspolitische Diskussion über die unterschiedlichen Technologien zur Stromerzeugung aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit ermöglichen. Es deckt den vollständigen Lebenszyklus einer Technologie ab; also nicht nur die eigentliche Stromerzeugung, sondern auch die vorhergehenden Schritte der Gewinnung, Verarbeitung und Herstellung von Rohstoffen, Materialien und Anlagen sowie die Abfallentsorgung.

Zur Aggregation der verschiedenen, sehr unterschiedlichen Indikatoren wird die Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA) vorgeschlagen, mit der Präferenzen der Entscheidungsträger berücksichtigt und ein hohes Maß an Transparenz sichergestellt werden können. Diese Methode hat den Nebeneffekt, dass nachteilige Eigenschaften eines Energieträgers in einer Dimension durch vorteilhafte Eigenschaften in einer anderen Dimension kompensiert werden können. Beispielsweise zeigen einige Aggregationen vergleichsweise gute Ergebnisse für die Sonnenenergie, wenngleich deren Produktionskosten exorbitant hoch bei 60 Cent/kWh liegen. Andere Aggregationsmodelle sind oft auf die Bewertung der Gesamtkosten begrenzt und berücksichtigen gesellschaftliche Aspekte tendenziell nicht hinreichend.

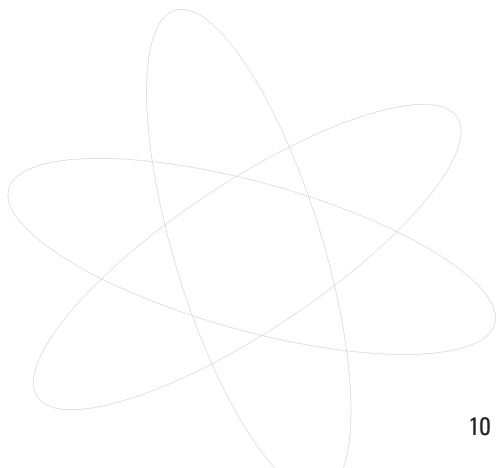
<sup>5</sup> Commission on Sustainable Development (CSD)

Der vergleichende und umfassende Ansatz der ILK folgt der Überlegung, dass höchstwahrscheinlich keine Technologie allein alle Prinzipien und Indikatoren bestmöglich erfüllen kann und somit für eine "optimale" Stromerzeugung sorgen kann. Daher sollten die Vor- und Nachteile einsatzbereiter Technologien berücksichtigt werden und im Vorfeld einer Entscheidung breit angesprochen werden. Das von der ILK vorgeschlagene Modell ist eine der möglichen Grundlagen für eine derartige Diskussion, die quantitative Erkenntnisse über die Auswirkung von verschiedenen Annahmen und unterschiedlichen Gesichtspunkten der gesamtheitlichen Eignung einer bestimmten Technologie liefern kann.

Das ILK-Modell wurde auf die heute in Deutschland in Betrieb befindlichen Stromerzeugungstechnologien angewendet, unter Annahme durchschnittlicher Leistungscharakteristiken dieser Technologien. Die Bewertung erstreckt sich auf die vollständigen Energieketten fossiler (Braunkohle, Steinkohle, Öl und Erdgas) und erneuerbarer Energieträger (Wasser, Wind und Sonne (Photovoltaik)) sowie der Kernenergie. Aufgrund fehlender spezifischer Daten war es nicht möglich, Biomasse als Stromerzeugungstechnologie zu berücksichtigen.

Die ILK hat in dem Aggregationsprozess Gewichtungen vorgenommen, die sie aus ihrer Sicht als "Stakeholder" für angemessen hält. Diskussionen mit Experten [14] haben eine erhebliche Unterstützung für diese Vorgehensweise und ein großes Potential an Übereinstimmung aufgezeigt.

Das Nachhaltigkeitsmodell der ILK wäre prinzipiell auf zukünftige Stromerzeugungstechnologien in Deutschland anwendbar. Eine solche Bewertung bedarf aber einer wissenschaftlich fundierten und prognostizierenden Bestimmung vieler Daten für die jeweilige technologische Entwicklung - diese Daten standen nicht zur Verfügung. Trotzdem lassen sich Auswirkungen auf die Ergebnisse zumindest qualitativ aufzeigen (siehe Abschnitt 2.4).



## 2.2 Merkmale der Kernenergie

Die Ergebnisse für den kompletten Indikatorensatz der jeweiligen Technologie<sup>6</sup> sind im Anhang 1 aufgeführt. Es ist darauf hinzuweisen, dass einige der Indikatorwerte mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, allerdings können die Werte für Vergleichszwecke, d. h. zur Ermittlung von vorläufigen Reihenfolgen, als ausreichend genau angesehen werden. Sie liefern auch die Basis für die Darstellung von Stärken und Schwächen der spezifischen Stromerzeugungstechnologien/-technologieketten, allerdings ausschließlich aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit. Für die Kernenergie ergeben sich folgende vorteilhafte und nachteilige Merkmale:

- ➔ Die Kernenergie weist sehr gute Werte für wirtschaftliche Indikatoren auf:
  - Geringste Produktionskosten von allen Technologie-Optionen; bedingt u. a. durch potentiell lange Betriebszeiten (40 und mehr Betriebsjahre), sehr hohe Verfügbarkeit (mehr als 85%) und geringe Auswirkungen von Preissteigerungen beim Brennstoff<sup>7</sup>.  
Hinweis: Die bereits internalisierten Kosten für die Stilllegung der Kernkraftwerke und die Endlagerung radioaktiver Abfälle sind noch mit Unsicherheiten behaftet; es ist aber unwahrscheinlich, dass sich dadurch die Spitzenposition der Kernenergie bei den Produktionskosten verändert. Investitionskosten für neue Kraftwerke könnten höhere Produktionskosten verursachen, allerdings wird die Kernenergie auch dann eine der günstigsten Optionen bleiben.
  - Sehr hohe Sicherheit der Brennstoffversorgung.  
Hinweis: Große Uranvorräte sind weltweit verteilt<sup>8</sup> und damit weniger anfällig für negative geopolitische Entwicklungen; Brennstoffe sind gut lagerbar, zudem könnten zukünftige fortgeschrittene Technologien des Brennstoffkreislaufes diesen Aspekt weiter verbessern.
- ➔ Die Kernenergie weist sehr gute Werte für Umwelt-Indikatoren auf:
  - Sehr geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen und Luftverschmutzungen und damit verbunden ein bedeutsamer Beitrag zur Verhinderung der globalen Erwärmung.  
Hinweis: Bei Anwendung einer Lebenszyklus-Analyse sind die spezifischen

<sup>6</sup> Wesentliche Annahmen: Kernkraftwerke weitgehend amortisiert; Wind- und Sonnenenergie ohne Kosten für Reservekapazitäten

<sup>7</sup> Eine Verdoppelung der Brennstoffkosten ließe die Gesamtproduktionskosten lediglich um 9% steigen[48].

<sup>8</sup> Ca. 30% der Uranreserven befinden sich in Australien, weitere Länder mit großen Uranvorräten sind Kanada und Kasachstan (ca. 15%) sowie Südafrika (ca. 10%).



Emissionen sogar vergleichbar mit denen von Windenergie und sehr viel geringer als die von Sonnenenergie.

- Geringe Risiken durch Normalbetrieb und Unfälle.  
Hinweis: Dies erklärt sich durch die kaum bestehenden nachteiligen Folgen der betrieblichen Emissionen für die öffentliche Gesundheit und eine sehr geringe Häufigkeit von schweren Unfällen.
- ➔ Die Kernenergie weist ungünstige Werte für gesellschaftliche Indikatoren<sup>9</sup> auf:
- Außerordentlich lange notwendige Einschlusszeiten für radioaktive Abfälle.  
Hinweis: Dieser Punkt könnte durch die Errichtung und Nutzung von Endlagern in der öffentlichen Wahrnehmung an Bedeutung verlieren. Ferner könnten zukünftige fortgeschrittene Technologien des Brennstoffkreislaufs (Aktinidenabtrennung und -transmutation) zu einer deutlichen Reduzierung der zu sichernden Einschlusszeiten führen.
- Proliferation als spezifische negative Eigenschaft.  
Hinweis: Die Proliferationsgefahr bei der Nutzung der Kernenergie in Deutschland ist angesichts der getroffenen Sicherungsmaßnahmen im Brennstoffkreislauf und internationaler Überwachungen durch die IAEO und EURATOM sehr klein. Die Bedeutung, die diesem Thema dennoch in der öffentlichen Meinung beigemessen wird, könnte mit zukünftigen fortgeschrittenen Technologien des Brennstoffkreislaufs schwinden.
- Risiko-Aversion gegenüber Stromerzeugungstechnologien für die Kernenergie am stärksten ausgeprägt.  
Hinweis: Einzelereignisse wie Three Mile Island und Tschernobyl haben die öffentliche Wahrnehmung sehr verschlechtert. Das wahrgenommene Risiko und die Akzeptanz scheinen von weiteren Verringerungen der Risikowerte kaum beeinflusst zu werden. Stattdessen könnten sie von Faktoren wie dem Nichtvorhandensein besserer Alternativen, der Erhöhung der Strompreise und einer veränderten Einstellung gegenüber anderen Technologien abhängig sein.
- Vermutete Verletzbarkeit von Kernkraftwerken durch terroristische Angriffe<sup>10</sup>.  
Hinweis: Die deutschen Kernkraftwerke sind nicht nur durch die jeweilige Auslegung gegen terroristische Einwirkungen geschützt, sondern auch durch

<sup>9</sup> Die gesellschaftlichen Indikatoren und ihre Gewichtung spiegeln zu einem Großteil Einstellungen der Bevölkerung wieder (z. B. bei der Risiko-Aversion), die sich unabhängig von technischen Entwicklungen verändern können.

<sup>10</sup> Diese beiden Aspekte sind der gesellschaftlichen Dimension zuzurechnen, allerdings in der ILK-Nachhaltigkeitsbewertung [15] nicht ausreichend oder noch gar nicht berücksichtigt.

zusätzliche Maßnahmen der Betreiber, Fluggesellschaften und des Staates. Viele dieser Maßnahmen werden aber nicht öffentlich kommuniziert und bleiben somit ohne Auswirkung auf die gesellschaftliche Wahrnehmung.

- Voraussichtlich hohes Mobilisierungspotential von Kernkraftgegnern<sup>10</sup>.  
Hinweis: Der Einsatz der Kernenergie ist für einen bestimmten Teil der Bevölkerung nicht akzeptabel. Spezielle Ereignisse (z. B. Nukleartransporte nach Ahaus und Gorleben) haben häufig große und manchmal gewalttätige Demonstrationen hervorgerufen, begleitet von einer entsprechenden Berichterstattung in den Medien.

Über diese Nachhaltigkeitsbewertung hinausgehend ist festzustellen, dass sich die Kernenergie als eine zuverlässige und sichere Form der Stromerzeugung großen Stils erwiesen hat (in Deutschland fast 30% Anteil an der Stromerzeugung, ungeplante Nichtverfügbarkeit < 5% [15], [16]). Aufgrund ihrer Kostenstruktur mit geringen variablen Kosten ist sie insbesondere vorteilhaft im Grundlastbereich; die Kernkraftwerksstandorte können zudem an die Anforderungen eines stabilen Stromnetzes sehr gut angepasst werden (Erzeugung in Verbrauchernähe). Die Kernenergie benötigt Rohstoffe, die gegenwärtig ausreichend verfügbar sind oder nicht anderweitig genutzt werden können.

### 2.3 Aggregation der Ergebnisse

Die Indikatoren müssen zu Einzelwerten aggregiert werden, um benutzerfreundlichere Eingangsgrößen für Gesamtbewertungen und damit einhergehende Entscheidungsprozesse zu liefern. Solche aggregierten Einzelwerte wurden von der ILK [12] über eine Gesamtkostenbetrachtung und - alternativ - über eine Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA) ermittelt. Die Gesamtkosten umfassen die internen Kosten (Produktionskosten) und externe Kosten (bis hin zu den Auswirkungen schwerer Unfälle oder der globalen Erwärmung), lassen aber wichtige gesellschaftliche Kriterien außer Acht. Beim zweiten Ansatz, der MCDA, erfolgt eine lineare Normalisierung aller Indikatoren und eine anschließende Gewichtung der Indikatoren untereinander und der drei Dimensionen (Wirtschaftlichkeit, Umwelt, Gesellschaft) der Nachhaltigkeit. Die resultierende Rangfolge ist gegenüber einer "maßvollen" Veränderung der Werte vergleichsweise stabil. Vorteile der Anwendung von MCDA sind die Berücksichtigung aller Kriterien und - ansatzweise - der unterschiedlichen Interessenslagen der beteiligten Stakeholder.

Bei Betrachtung der spezifischen Ergebnisse für jede der drei Dimensionen anhand der MCDA wird offensichtlich [12], dass keine einzelne Stromerzeugungstechnologie alle Nachhaltigkeitskriterien "ideal" erfüllt. Betrachtet man jedoch das

Gesamtergebnis<sup>11</sup>, so erzielen Wasser- und Windenergie die besten Ergebnisse, während die Kernenergie die dritte Position einnimmt, gemeinsam mit Erdgas (dem besten Wert aller fossilen Stromerzeugungstechnologien).

Anhand der Detailergebnisse zeigt sich, dass die Kernenergie unter den in Deutschland herrschenden Randbedingungen ausgezeichnete wirtschaftliche und ökologische Eigenschaften aufweist (siehe Abschnitt 2.2); allerdings wird auch bestätigt, dass ihre Platzierung innerhalb der gesellschaftlichen Dimension nicht hoch ist.

Die obige Bewertung berücksichtigt nicht, in welchem Umfang die jeweilige Technologie eine zuverlässige Stromversorgung zur Verfügung stellen kann. So wird z. B. das Potential der Wasserenergie in Deutschland bereits weitgehend genutzt.

#### 2.4 Bevorzugter Strommix für 2020

Da keine Stromerzeugungstechnologie verfügbar ist, die bereits alle Nachhaltigkeitskriterien optimal erfüllt und gleichzeitig allein in der Lage wäre, sowohl Grundlast als auch Spitzenlast abzudecken, ist ein vernünftiger Technologiemix für die zukünftige Stromversorgung anzustreben. Dies mag trivial klingen, insbesondere da diese Zielvorgabe auch dem weitgehend akzeptierten Gebot der Diversifikation folgt [3]. Allerdings bedeutet dies auch, dass der "beste" zukünftige Stromversorgungsmix sehr stark von der Betonung einzelner Aspekte abhängt: Ein Mix mit Vorrang für wirtschaftliche Aspekte wird ein anderer sein als einer, der Umweltaspekte in den Vordergrund rückt.

Aus der Vielzahl möglicher Strommix-Szenarien hat die ILK zwei vom VDE [18] betrachtete Szenarien zur Veranschaulichung herangezogen. Vorrangiges Ziel dieser VDE-Studie war die Betrachtung der Auswirkungen des vermehrten Einsatzes von erneuerbaren Energien. Gemäß dieser Studie wird der Anteil der erneuerbaren Energien von gegenwärtig 5% für beide Szenarien bis zum Jahr 2020 auf ca. 25% ansteigen. Das dort verwendete Szenario 1 unterstellt einen fortgesetzten Ausstieg aus der Kernenergie, während Szenario 3 der Vorgabe folgt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen drastisch zu reduzieren; dies führt zu einer weiteren Nutzung der Kernenergie auf heutigem Niveau und einer Reduzierung der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern<sup>12</sup>. Bewertungskriterien waren vorrangig die notwendigen Investitionskosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen des jeweiligen Szenarios.

<sup>11</sup> Allen drei Dimensionen sind gleiche Gewichtungen zugewiesen worden; die Wichtungsfaktoren für die Indikatoren sind nach besten Kenntnissen festgelegt worden; alle können innerhalb bestimmter Grenzen Änderungen unterworfen sein.

<sup>12</sup> Das in [18] betrachtete Szenario 2 sieht eine kostenoptimale Zwischenlösung vor, mit verlangsamttem Ausstieg aus der Kernenergie, wird im Folgenden aber seitens der ILK nicht weiter betrachtet.

Da die VDE-Studie [18] nicht alle Elemente der Nachhaltigkeit berücksichtigt und insbesondere nicht alle Bestandteile der Produktionskosten und nicht die gesellschaftliche Dimension betrachtet, hat die ILK eine umfassendere Bewertung der Nachhaltigkeit dieser Szenarien aus ihrer Sicht vorgenommen. Wie bereits erwähnt, war die Arbeit der ILK [12] auf heutige, individuelle Technologien beschränkt und beinhaltete keine Bewertung eines möglichen Mixes. Allerdings ist eine qualitative Abschätzung der Nachhaltigkeit der genannten Szenarien möglich, wobei für alle Technologien eine evolutionäre Weiterentwicklung unterstellt wird. Revolutionäre technologische Weiterentwicklungen sind nicht erkennbar, insbesondere wenn die langen Konzeptions- und Errichtungszeiträume für großtechnische Anlagen berücksichtigt werden. Unabhängig von technologischen Entwicklungen können sich aber Veränderungen bei der gesellschaftlichen Bewertung von Stromerzeugungstechnologien ergeben; diese sind nicht absehbar, und es wird somit keine Veränderung der ermittelten Daten unterstellt.

Eine Kombination der Nachhaltigkeitsindikatoren für individuelle (heutige) Technologien entsprechend ihren Anteilen an einer Stromerzeugung im Jahr 2020 gemäß [18] führt bei der Anwendung des ILK-Modells zu folgenden vergleichenden Aussagen zu den beiden "extremen" Szenarien 1 und 3:

- Szenario 1 (Ausstieg aus der Kernenergie)  
Der unterstellte "Ersatz" des derzeitigen Anteils der Kernenergie an der Stromerzeugung zu etwa gleichen Teilen durch Erneuerbare und Erdgas (25% bzw. 22%) führt - verglichen mit dem heutigen Stand - zu schlechteren Ergebnissen für die Wirtschaftlichkeit bei gleich bleibenden ökologischen Werten. Die negativen Aspekte der Kernenergie, wie Proliferation, lange Einschusszeiten bei der Endlagerung wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfälle und Risiko-Aversion, würden in diesem Szenario vermieden. Dies würde die gesellschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit, und damit die gesellschaftliche Akzeptanz, verbessern. Die Vorteile der Kernenergie bei den Produktionskosten und den CO<sub>2</sub>-Emissionen können in diesem Szenario nicht realisiert werden, was die Ergebnisse der VDE-Studie [18] tendenziell bestätigen: Der Ausstieg aus der Kernenergienutzung gemäß Szenario 1 führt zu ca. 300 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2020 sowie zu Gesamtinvestitionen von 123 Milliarden € und damit zu jeweils höheren Werten als beim Szenario 3 (s. u.).
- Szenario 3 (Kernenergie als Teil des Strommixes)  
Der Beibehalt der Kernenergie auf dem derzeitigen Niveau und die Reduzierung des Anteils von traditionellen fossilen Brennstoffen zugunsten eines höheren Anteils von Erneuerbaren (und Erdgas) führt - verglichen mit dem heutigen Stand - zu besseren Bewertungen für die Bereiche Umwelt und Gesellschaft,



aber (ebenfalls) schlechteren Ergebnissen für die Wirtschaftlichkeit. Verglichen mit Szenario 1 werden etwas bessere wirtschaftliche und deutlich bessere ökologische Werte erreicht, allerdings nicht so gute Werte für die gesellschaftliche Dimension. Die vorteilhaften und die nachteiligen Aspekte der Kernenergie und der Erneuerbaren kompensieren sich in einigen Bereichen (z. B. Produktionskosten, Risiko-Aversion); in anderen Bereichen dagegen ergänzen sich ihre Vorteile, z. B. Anfälligkeit für Brennstoffpreiserhöhungen und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dies entspricht den Ergebnissen von [18], wonach sich bei einem Weiterbetrieb aller Kernkraftwerke die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf ca. 200 Millionen Tonnen reduzieren und die Gesamtinvestitionen auf 100 Milliarden € belaufen.

Insbesondere aufgrund der deutlichen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen stellt sich auf Basis dieser Bewertung Szenario 3, und damit die weitere Nutzung der Kernenergie bei gleichzeitiger verstärkter Nutzung der Erneuerbaren, als zu bevorzugende Option dar.

Da alle betrachteten Szenarien eine verstärkte Nutzung der Erneuerbaren, insbesondere der Windenergie, beinhalten, wird an dieser Stelle noch ein kurzer Ausblick auf die Auswirkungen eines entsprechend steigenden Anteils im Strommix gegeben<sup>13</sup>:

- Windenergie - und auch Sonnenenergie - besitzt aufgrund ihrer stochastischen Natur nicht die Fähigkeit, die Grundlastversorgung zu gewährleisten. Die gesicherte Kapazität<sup>14</sup> der Windenergie entspricht einem Anteil von etwa 6% der installierten Kapazität, d. h. 10 GW installierte Kapazität entsprechen lediglich 600 MW statistisch gesicherter Kapazität.
- Die notwendige Stabilität des Stromnetzes macht einen Ausbau der Übertragungsnetze erforderlich; die Kosten dafür belaufen sich bis zum Jahr 2015 auf 1,1 Milliarden €.
- Da es geplant ist, die meisten zukünftigen Windenergieparks im Norden Deutschlands auf See zu errichten, sind weitere Ausbauten des Stromnetzes erforderlich, um diese Standorte mit dem nationalen Stromnetz zu verbinden. Die Kosten hierfür betragen bis zum Jahr 2015 bis zu 5 Milliarden €.

<sup>13</sup> Der Ausblick basiert weitgehend auf [19], einer Studie, die von Verbänden und Unternehmen des Energiesektors (einschließlich der Windenergie) und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit finanziert und daher von möglichst vielen Akteuren getragen wurde. Diese Studie unterstellt einen Anstieg der an Land installierten Windenergieleistung von derzeit 14,5 auf 26,2 GW in 2015 und der auf See von derzeit 0 auf 8,4 GW.

<sup>14</sup> Die gesicherte Kapazität bezieht sich auf eine Versorgungssicherheit des Stroms von 99%.

Die beiden letztgenannten Aspekte führen bei einer noch weiter erhöhten Nutzung der Windenergie zu noch größeren Herausforderungen und zu weiteren zusätzlichen Kosten (z. B. Fördermittel).

Zusammengefasst hat die Anwendung des für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Stromerzeugungstechnologien vorgeschlagenen ILK-Modells gezeigt, dass keine Technologie alle Kriterien optimal erfüllt. Die Kernenergie ist eine wertvolle Option zur Stromerzeugung, die unter dem Gebot der Nachhaltigkeit nicht aufgegeben werden sollte. Ihre niedrigen Produktionskosten, die Sicherheit der Stromversorgung und die weitgehende Unabhängigkeit von steigenden Brennstoffpreisen unterstützen eine stabile wirtschaftliche Entwicklung. Zusätzlich hilft sie die Kyoto-Ziele zu erfüllen und sogar noch strengere CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte zu erreichen.

Spezielle Anstrengungen sind zu unternehmen, um die Öffentlichkeit und "Stakeholder" über die Bedeutung der weiteren Nutzung der Kernenergie transparent und unvoreingenommen zu informieren und an Entscheidungen teilhaben zu lassen. Ein solcher Prozess könnte zu einer erhöhten Akzeptanz oder zumindest zu einer tolerierten Nutzung der Kernenergie führen.

Diese Ergebnisse und Empfehlungen sind in Übereinstimmung mit dem "Grünbuch" der EU-Kommission [1].

### 3 Sicherheitsbezogener Rahmen für die weitere Nutzung der Kernenergie

Trotz ihrer Attraktivität aus Sicht eines nachhaltigen Strommixes ist eine weitere Nutzung der Kernenergie nur zu vertreten, wenn bei der Anlagensicherheit und -sicherung ein ausreichend hohes Niveau gewährleistet werden kann. Neben technischen Themenstellungen, z. B. der Alterung von Komponenten, und einem möglichen Verlust an technischer Kompetenz müssen veränderte kontextabhängige Faktoren berücksichtigt werden, z. B. Bedingungen eines liberalisierten Marktes. Letztere erzeugen einen zusätzlichen Kostendruck für Betrieb und Instandhaltung und führen zu Änderungen in den Konzern- und Organisationsstrukturen. Ferner müssen Fortschritte bei der Entsorgungsfrage erreicht werden. Die ILK konzentriert sich nachfolgend auf diese Fragen, die in ihrer wissenschaftlichen Kompetenz liegen; rein politische, juristische und sozioökonomische Themen werden nicht angesprochen.

### 3.1 Sicherheit des Betriebs der Kernkraftwerke

#### 3.1.1 Überprüfung und Erhalt der Sicherheit

Die Betreiber sind für die Sicherheit ihrer Anlagen verantwortlich. Die Aufsichtsbehörde vergewissert sich ihrerseits, dass die Betreiber ihrer hohen Verantwortung gerecht werden. Einige der Methoden und Werkzeuge, die für die ständige Bewertung der Sicherheit eines Kernkraftwerks angewandt werden, sind im Folgenden dargestellt:

##### *Periodische Sicherheitsüberprüfung*

Neben der kontinuierlichen behördlichen Aufsicht, ist die Periodische Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) [21], [22] ein wichtiges Mittel zur Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus. Sie wird für jede Anlage im Abstand von 10 Jahren<sup>15</sup> durchgeführt und stellt jeweils eine Untersuchung ihres aktuellen Sicherheits- und Sicherheitsstatus dar.

Dabei werden die bestehenden Sicherheitsvorkehrungen sowohl deterministisch (im Hinblick auf die zu erreichenden Schutzziele) als auch probabilistisch (Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) zur Bestimmung der Häufigkeit von Gefährdungszuständen) bewertet. Die Kombination beider Ansätze erlaubt die geforderte Bewertung des bestehenden Sicherheitszustands und kann zusätzlich aufzeigen, in welchen Bereichen Verbesserungsmaßnahmen zweckmäßig sind.

Für alle deutschen Kernkraftwerke wurde eine erste PSÜ bereits durchgeführt - meistens auf freiwilliger Basis - und weitere Sicherheitsüberprüfungen sind im Gange oder folgen in den nächsten Jahren [23]. Die entsprechenden PSÜ-Leitfäden [21] werden derzeit überarbeitet und werden voraussichtlich die Bewertung des Stillstandsbetriebs, der Notfallschutzmaßnahmen und von externen Ereignissen einschließen, evtl. auch die Durchführung von Level 2 PSAs.

##### *Sicherheitsmanagement und Sicherheitskultur*

Neben der technischen Ausrüstung sind organisatorische Maßnahmen für eine sichere Betriebsführung und die Sicherheitskultur von großer Bedeutung für den Erhalt eines hohen Sicherheitsniveaus. Sie unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung und haben in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen.

<sup>15</sup> Hinweis: diese Intervalle entsprechen nicht einem 10, 20 oder 30-jährigem Anlagenbetrieb. Die genauen Termine sind anlagen-spezifisch im Atomgesetz [23] festgelegt.

Das Sicherheitsmanagementsystem hat gemäß den aktuellen IAEO und INSAG Standards und Richtlinien ([24], [25], [26] und [27]) generell folgende Ziele:

- Verbesserung des Sicherheitsverhaltens in der Organisation durch Planung, Steuerung und Überwachung sicherheitsrelevanter Tätigkeiten im bestimmungsgemäßen Betrieb, bei Störfällen und bei Unfällen.
- Förderung und Stärkung einer ausgeprägten Sicherheitskultur durch die Ausbildung und Unterstützung des sicherheitsorientierten Verhaltens von Einzelpersonen und Teams, damit diese ihre Aufgaben sicherheitsgerichtet ausführen können.

Ein gutes Sicherheitsmanagement und eine gute Sicherheitskultur kann man z. B. an eindeutigen Sicherheitsgrundsätzen, die die Organisation zum Anstreben einer hohen Sicherheit verpflichten, erkennen. Vorgaben an ausreichende Personalbestände und Fachkenntnisse, effektive Arbeitsplanung und -steuerung sowie eine vertiefte Analyse der Ursachen von Ereignissen sollten ebenfalls vorgesehen sein. Diese Ursachenanalyse beinhaltet auch organisatorische Aspekte und menschliches Verhalten und führt zu geeigneten Verbesserungsmaßnahmen. Weitere Komponenten eines guten Sicherheitsmanagementsystems sind ein Selbstbewertungssystem, das organisatorische und Personalthemen betrachtet sowie Audit- und Überprüfungssysteme, die Rückmeldungen über die realisierte Sicherheit liefern.

Die deutschen Betreiber haben bereits Sicherheitsmanagementsysteme und Systeme zur Selbstbewertung der Sicherheitskultur eingeführt, die von den Aufsichtsbehörden vor kurzem bewertet wurden oder noch in der Bewertungsphase sind (siehe auch [28]).

##### *Alterungsmanagement*

Die Frage, wie lange Kernkraftwerke unter Einhaltung eines hohen Sicherheitsstandards sicher betrieben werden können, haben Fachleuten in den letzten Jahren intensiv diskutiert ([29], [30]). Aus Betriebserfahrungen und Forschungsergebnissen konnten keine auf die Sicherheitseinrichtungen der Anlage einwirkenden Mechanismen identifiziert werden, die eine generelle Beschränkung der Betriebszeit erforderlich gemacht hätten oder machen.

Eine wirksame Kontrolle von alterungsbedingten Schädigungen wird durch ein systematisches Alterungsmanagement erreicht. Dieses basiert auf den Erkenntnissen zur Alterung von Strukturen, Systemen und Komponenten und umfasst [22]:

- den Betrieb innerhalb der Betriebsvorgaben mit dem Ziel einer Minimierung der Schädigungsrate;
- die Prüfung und Überwachung entsprechend den zutreffenden Anforderungen mit dem Ziel einer zeitnahen Entdeckung und Beschreibung jedweder Schädigung;
- die Bewertung der beobachteten Schädigungen in Übereinstimmung mit den entsprechenden Richtlinien zur Beurteilung der Integrität und der Funktionseigenschaften;
- die Instandhaltung (Reparatur oder Austausch) zur Verhinderung oder Reduzierung nicht-akzeptabler Schädigungen.

Alterungsphänomene werden in deutschen Anlagen auf verschiedene Arten erfasst und behandelt. Alle zugehörigen Tätigkeiten, wie z. B. die Dokumentation und Nutzung von Erfahrungen aus der Instandhaltung und den wiederkehrenden Prüfungen, sind faktisch Teil eines Alterungsmanagementsystems. Allerdings werden sie oft ereignisbezogen durchgeführt und sind nicht durchgängig standardisiert und umfassend. Dies hat zu der Empfehlung geführt, ein systematisches und umfassendes Alterungsmanagementsystem in deutschen Anlagen einzurichten [30].

#### *Nachrüstmaßnahmen*

Die Auslegungsbedingungen für die Sicherheit und den sicheren Betrieb einer Anlage folgen dem Konzept in der Tiefe gestaffelter Barrieren ("defense-in-depth"). Als übergeordnetes Ziel sind durch die Auslegung und die Betriebsweise Störfälle des Kernkraftwerks soweit wie möglich zu vermeiden. In dem unwahrscheinlichen Fall eines Störfalls wird die Anlage durch technische Schutzmaßnahmen und betriebliche Systeme zuverlässig kontrolliert, um die Brennelementintegrität auch in derartigen Situationen zu erhalten.

Diese Maßnahmen und Vorgehensweisen waren notwendige Bedingung für die Genehmigung. Obwohl die ursprüngliche Auslegung und die Betriebsweise der Anlagen als sicher genug galten, ist ihre Sicherheit im Laufe der Zeit kontinuierlich verbessert worden. Dies ist ein Ergebnis der Nutzung von Betriebserfahrungen, probabilistischen Sicherheitsanalysen und der Weiterentwicklung des allgemeinen Standes von Wissenschaft und Technik. Die bedeutenden Fortschritte in der Reaktorsicherheitstechnologie führten auch zu einer Steigerung der Genehmigungsanforderungen - und auch der Vorgaben der Betreiber [4]<sup>16</sup> - an jeweils neue

<sup>16</sup> Ein Dokument mit Betreiber-Anforderungen ("European utilities requirement" (EUR)) ist von einer Gruppe bedeutender Europäischer Stromerzeuger, zu denen auch VGB Powertech, die Organisation der deutschen Stromerzeuger gehört, erarbeitet worden.

Anlagen, und einer entsprechenden Verbesserung ihrer Sicherheitsvorrichtungen.

Die bereits in Betrieb befindlichen Anlagen konnten zu einem großen Teil mit diesen Entwicklungen schritthalten, in dem von den Betreibern in den letzten Jahrzehnten über die ursprüngliche Auslegung der Sicherheitssysteme hinaus zusätzliche Maßnahmen ergriffen wurden, um das Risiko weiter zu reduzieren [31]. Ein prominentes Beispiel dafür ist die Anforderung, dass die Auswirkungen eines Kernschmelzunfalls weitgehend auf das Innere der Anlage beschränkt bleiben müssen. Auch wenn diese Anforderung mit den Gebäudestrukturen bestehender Anlagen nicht vollständig erfüllt werden kann, wurde das Risiko eines solchen postulierten Unfalls aber durch interne Notfallschutzmaßnahmen entscheidend reduziert: Vorkehrungen wurden getroffen, um ein Kernschmelzen selbst bei einem Ausfall des Sicherheitssystems zu verhindern, und Maßnahmen ergriffen, um ein Versagen des Sicherheitsbehälters mit großen frühzeitigen Freisetzungen zu vermeiden. Dazu zählen die primär- und sekundärseitige Druckentlastung und Bepfeisung ("bleed-and-feed"), der Abbau des bei Kernschmelzen auftretenden Wasserstoffs hin zu ungefährlichen Konzentrationen und die gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters. Derartige Maßnahmen wurden in der Vergangenheit durch die RSK vorgeschlagen und von den Betreibern umgesetzt, ohne dass eine behördliche Anforderung vorlag.

Jüngste Beispiele für Nachrüstmaßnahmen beinhalten Maßnahmen zur Verhinderung von Verstopfungen bei Sumpfansaugsieben und ein verbessertes Qualitätsmanagement für Brennelemente.

Zusammengefasst zeigt die bisherige Erfahrung, dass die bestehenden Anlagen über die Bewahrung des Status Quo hinaus in der Lage waren, bedeutende Verbesserungen der Sicherheit zu erreichen: Die Kernschmelzhäufigkeit und die Wahrscheinlichkeit einer großen Freisetzung sind für deutsche Kernkraftwerke in den vergangenen Jahrzehnten nachweislich deutlich reduziert worden.

#### *Internationale Zusammenarbeit*

Die ILK hat die Bedeutung internationaler Zusammenarbeit von Aufsichtsbehörden und Forschungseinrichtungen bereits in separaten Dokumenten behandelt ([32], [33], [34]).

Die deutschen Betreiber beteiligen sich am internationalen Erfahrungsaustausch insbesondere über Programme, die von der internationalen Betreiberorganisation WANO aufgelegt werden. Diese Programme bieten den Teilnehmern die Möglichkeit, aus allseits gesammelten Erfahrungen zu lernen, um die Sicherheit und Zu-

verlässigkeit der eigenen Anlage weiter zu verbessern. Zum Beispiel haben deutsche Kernkraftwerke in den vergangenen Jahren am Erfahrungsaustausch zu den Themen Sicherheitskultur, menschliches Verhalten, PSA-Anwendungen und Ausbildung des Instandhaltungspersonals teilgenommen.

### *Internationaler Vergleich von Sicherheitsindikatoren und Betriebserfahrungen*

Das Streben der kerntechnischen Industrie nach Verbesserung der Sicherheit ihrer Anlagen wird durch die IAEO-Überprüfung der Betriebssicherheit (OSART) bestätigt. Eine solche Überprüfung wurde z. B. im Jahr 2004 in Philippsburg 2 durchgeführt; eine generelle Verbesserung wurde in den Bereichen Sicherheitsmanagement, Arbeitsschutz und Anlagenzustand attestiert. International bleibt die Zahl bedeutsamer (meldepflichtiger) Ereignisse gering, und es wird ein zusätzlicher Schwerpunkt auf eine vertiefte Untersuchung von Betriebsereignissen gelegt, um Erkenntnisse zur besseren Unterstützung des menschlichen Verhaltens zu erhalten.

Internationale Überprüfungen erfolgten in deutschen Kernkraftwerken außerdem durch die WANO (z. B. "peer reviews") in GKN im Jahr 2001 und ISAR 1 im Jahr 2003; Biblis folgt voraussichtlich am Ende des Jahres 2005.

Diese Überprüfungen stellen eine unabhängige Bewertung der Wirksamkeit des Sicherheitsmanagementsystems und seiner Umsetzung im Vergleich zu international bewährten Vorgehensweisen dar. Als Folge einer derartigen Überprüfung werden geeignete Verbesserungsmaßnahmen identifiziert und umgesetzt sowie Zielvorgaben für Verbesserungen festgelegt als Teil eines kontinuierlichen Prozesses.

Die Leistung aller Kernkraftwerke weltweit hat sich nach den von der WANO ermittelten Indikatoren ("performance indicators") während des letzten Jahrzehnts ständig verbessert.

### *Kompetenzvermittlung und -erhalt*

Die IAEO [35] hat die Frage des Kompetenzerhaltes als eines der Probleme identifiziert, das die Hersteller-, Betreiber-, Aufsichts- und technischen Gutachterorganisationen betrifft. Dies ist nicht beschränkt auf Staaten, in denen der Einsatz der Kernenergie stagniert oder zurückgefahren wird, sondern ist eine Herausforderung für die ganze kerntechnische Gemeinschaft. Außerdem müssen auch die Wissenschaft und Universitäten zukünftige Experten auf diesem Feld für sich gewinnen. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Universitäten inzwischen die Unterstützung für kerntechnische Studiengänge reduziert oder gestrichen haben.

Für alle Organisationen, die im kerntechnischen Bereich tätig sind, sowohl die Betreiber selbst als auch Subunternehmer, wird bei einer alternden Belegschaft die Notwendigkeit zur Auffrischung der Fähigkeiten des Personals immer größer. Systematische Programme müssen entwickelt und umgesetzt werden, die die zu erwartenden Wissensverluste, insbesondere durch Ausscheiden in den Ruhestand, ausgleichen. Dazu sind

- erhebliche vorausschauende Planungen erforderlich, um mittel- und langfristige Vorhersagen für den notwendigen Personalstand der verschiedenen Berufe treffen zu können, und
- kreative Methoden und Techniken in der Lehre, in der Ausbildung und bei der Anwendung von Prozessen des Qualitätsmanagements notwendig, um sicherzustellen, dass die Kenntnisse, Fertigkeiten und Fähigkeiten von der heutigen Generation auf die zukünftige Belegschaft übertragen werden.

Hinsichtlich Ausbildung und Forschung ist in Deutschland seit einigen Jahren ein stetiger Rückgang festzustellen. Wengleich Firmen aktiv bei der Auslegung eines neuen Reaktortyps (z. B. EPR) beteiligt gewesen sind, so ist doch der Auftrag für das jüngste deutsche Kernkraftwerk bereits vor mehr als 20 Jahren erteilt worden. Der im Atomgesetz festgelegte Ausstieg aus der Kernenergie hat den Trend zu Reduzierungen bei den Forschungsmitteln und den universitären Ausbildungsprogrammen noch weiter beschleunigt.

Die ILK [32] hält es für erforderlich, das Angebot gezielt den derzeitigen bzw. sich abzeichnenden Erfordernissen anzupassen, z. B. durch folgende Maßnahmen und Initiativen:

- Aufbau von regionalen und überregionalen Kompetenzzentren unter dem Dach des nationalen Kompetenzverbundes<sup>17</sup> in der Kerntechnik;
- Förderprogramme zur Forschung an den Hochschulen mit einer verstärkten Zusammenarbeit zwischen den Hochschulen und Forschungszentren, einschließlich externer Finanzierung von Lehrstühlen und Unterstützung von Studenten;
- Förderung der universitären Infrastrukturen für die kerntechnische Ausbildung, einschließlich der Bildung von Hochschulnetzwerken und der thematischen Diversifizierung der kerntechnischen Ausbildung.

<sup>17</sup> Forschungszentren Jülich (FZJ), Karlsruhe (FZK) und Rossendorf (FZR), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (MPA) mit ihren jeweiligen Partner-Hochschulen sowie Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS).

In letzter Zeit hat es aber auch positive Entwicklungen gegeben: Die TU München hat einen neuen Lehrstuhl für Kerntechnik installiert und bietet in Verbindung mit dem Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) und der École Centrale in Paris einen Master-Studiengang für Kerntechnik an. Die Universität Stuttgart strebt mit Unterstützung des Forschungszentrums in Karlsruhe eine Wiederbesetzung des Lehrstuhls für Kerntechnik an und an der TU Dresden ist ein neuer Ausbildungskernreaktor in Betrieb genommen worden.

Zusammenfassend wird über eine Vielzahl international anerkannter Maßnahmen eine ständige Prüfung und Gewährleistung der Sicherheit erzielt. Die kerntechnische Ausbildung und Forschung sowie die Beteiligung deutscher Einrichtungen an internationalen Forschungsinitiativen muss gefördert werden, so dass auch künftig in Deutschland neue sicherheitstechnische Erkenntnisse umgesetzt und innovative Anlagenkonzepte entwickelt werden können.

### 3.1.2 Aktueller Sicherheitsstatus

In den mehr als 35 Jahren der Nutzung der Kernenergie, die Ende 2004 in Deutschland einer Betriebserfahrung von etwa 650 Reaktorjahren entspricht, sind keine Auswirkungen durch radioaktive Strahlung auf die öffentliche Gesundheit und die Umgebung festzustellen. Es gab keine radioaktiven Freisetzungen oberhalb der genehmigten Jahreswerte für den Normalbetrieb der Kernkraftwerke. Die deutsche Sicherheitsphilosophie, die auf konservativen Sicherheitsprinzipien beruht und einen Kernschaden extrem unwahrscheinlich macht, hat sich bewährt. Diese insgesamt positive Sicherheitsbilanz der deutschen Kernkraftwerke ist vergleichbar mit den Sicherheitsbilanzen der meisten Staaten mit Kernkraftwerken westlicher Bauart und Betriebsweise. Es hat bei diesen kommerziellen Kernkraftwerken bisher nur einen Unfall mit Kernschaden (Three Mile Island) gegeben, und selbst in diesem Fall, der mehr als 25 Jahre zurückliegt, wurden keine gravierenden Mengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung freigesetzt.

Während der vergangenen 10 Jahre ist die Häufigkeit von meldepflichtigen Ereignissen und Störungen in deutschen Anlagen nahezu konstant geblieben. Gleiches gilt für die Anzahl ungeplanter Schnellabschaltungen, einem weiteren wichtigen Indikator für die Qualität des Anlagenbetriebs. Wird die Entwicklung des Risikos für die Bevölkerung durch deutsche Kernkraftwerke mittels repräsentativer Ersatzgrößen, z. B. die Häufigkeit für Kernschmelzen oder für große frühzeitige Freisetzungen radioaktiver Stoffe, bewertet, kann eine Verminderung des Risikos über die Zeit aufgezeigt werden.

Die Bundesregierung hat kürzlich verlauten lassen [16]: "Als Ergebnis der durchgeführten Sicherheitsbewertungen und der daraus resultierenden Nachrüstungen und sicherheitstechnischen Verbesserungen ist festzuhalten, dass der genehmigte Sicherheitsstatus der Anlagen nicht nur erhalten sondern auch neuere sicherheitstechnische Erkenntnisse während des Betriebs der Anlagen angemessen berücksichtigt wurden. Damit konnte die Sicherheit der Kernkraftwerke dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik weitgehend und soweit im Rahmen der Anlagenkonzeption möglich nachgeführt werden."

Abschließend ist also festzustellen, dass die bestehenden Überprüfungsmaßnahmen und die Umsetzung geeigneter Nachrüstmaßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit insgesamt zu einer ausgezeichneten Sicherheitsbilanz der deutschen Kernkraftwerke geführt haben, die sich in einer deutlichen Verringerung des verbleibenden Risikos von Unfällen mit gravierenden Freisetzungen widerspiegelt. Aufgrund des sehr hohen Maßes an Sicherheit sollten die derzeit festgelegten Begrenzungen der Stromerzeugungskontingente aufgehoben werden. Die ILK hält es jedoch für zweckmäßig, spätestens für Betriebszeiten jenseits von 40 Betriebsjahren in 10-Jahres-Abständen die zukünftige ausreichende Sicherheit durch eine vorhergehende besondere Sicherheitsüberprüfung sicherzustellen (siehe [17]).

### 3.1.3 Zukünftige Verbesserungen der Anlagensicherheit

Im Zuge der in Abschnitt 3.1.1 dargestellten Nachrüstungen ist das ursprüngliche Sicherheitskonzept erweitert worden und enthält zu einem großen Teil bereits Elemente der Sicherheitsebene 4 des gestaffelten Barrierenkonzepts, d. h. Maßnahmen zur Beherrschung hypothetischer auslegungsüberschreitender Ereignisse und Begrenzung ihrer Folgen. Die Forschung der vergangenen Jahre zu Wahrscheinlichkeiten und Auswirkungen von verschiedenen auslegungsüberschreitenden Szenarien, die auch im Rahmen der EPR-Auslegung durchgeführt wurde, hat als Ergebnis neue Erkenntnisse über die oben genannte Sicherheitsebene 4 und auch über die Sicherheitsebene 5 geliefert, die nachträglich eingeführt wurde und Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen von auslegungsüberschreitenden Ereignissen mit erheblicher Freisetzung radioaktiver Stoffe vorsieht (siehe auch [17]).

Diese Vorgehensweise sollte auch bei einer weiteren Nutzung der bestehenden deutschen Kernkraftwerke fortgesetzt werden, auch wenn diese Anlagen ohne diese Maßnahmen als ausreichend sicher anzusehen sind und alle Anforderungen des Atomgesetzes erfüllen. Da es sich um Ereignisse handelt, die jenseits der genehmigten Auslegung liegen, sollten Maßnahmen nur vorgeschlagen werden, wenn der sicherheitstechnische Nutzen in einem angemessenen Verhältnis zum erforderlichen Aufwand steht.



Zusammenfassend sind Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Anlagensicherheit, insbesondere zur Minimierung der Risiken infolge angenommener schwerer Unfälle, auch weiterhin zu verfolgen - möglichst im Einvernehmen zwischen Aufsichtsbehörde und Betreiber und unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen.

### 3.2 Maßnahmen gegen terroristische Angriffe

Die deutschen Kernkraftwerke sind gegen terroristische Angriffe und Flugzeugabstürze geschützt. Der Umfang des Schutzes hängt von der Auslegung der jeweiligen Anlage ab.

Zu den Bestandteilen eines solchen Schutzes gehören eine genaue Zugangskontrolle und Vorsorgemaßnahmen, um die Möglichkeit eines unerlaubten Zugangs zum Gelände des Kernkraftwerks, auch mittels Fahrzeugen, für Personen und Ausrüstung zu erschweren. Eine hoch entwickelte Überwachung des Kernkraftwerksgeländes macht ein unbemerktes Eindringen sehr unwahrscheinlich. Gebäudestrukturen wirken zudem als Barrieren gegen Angriffe. Die physikalische Trennung und der spezielle Schutz von wichtigen redundanten Systemen zum Integritätserhalt der Brennelemente, z. B. Wärmeabfuhrsysteme, verringern die Möglichkeit einer Zerstörung des Reaktorkerns durch einen terroristischen Angriff.

Von verschiedenen Seiten sind Maßnahmen ergriffen worden, um die Anlage vor bewusst herbeigeführten Flugzeugabstürzen zu schützen:

- Maßnahmen der Bundesregierung, der Flugzeugindustrie und der Fluglinien, die darauf abzielen eine Entführung von Flugzeugen zu verhindern;
- Die Reaktorgebäude sind in einem unterschiedlichen Ausmaß gegen den Absturz eines Militärflugzeugs ausgelegt. Eine für eine Konvoi-Anlage durchgeführte Berechnung hat ergeben, dass zumindest diese Gebäudestrukturen auch dem Aufprall eines großen Passagierflugzeugs widerstehen würden.
- Die Betreiber beabsichtigen ein System zur Vernebelung des Kraftwerksgeländes zu installieren, um die Wahrscheinlichkeit, dass ein Flugzeug das Reaktorgebäude treffen kann, zu verringern.

Als Ergebnis ihrer Beratungen hat die ILK auch die Entwicklung eines Gesamtkonzeptes gegen terroristische Angriffe empfohlen, das neben Kernkraftwerken auch die möglichen Bedrohungen anderer technischer Anlagen und Infrastrukturen berücksichtigt. Nur ein umfassendes Maßnahmenpaket, das für alle möglichen terroristischen Ziele gilt kann der Öffentlichkeit einen wirksamen Schutz bieten.

Zusammenfassend sind die deutschen Kernkraftwerke gegen terroristische Einwirkungen durch die bestehende Auslegung und zusätzlich getroffene Maßnahmen geschützt, wodurch die Attraktivität der Kernkraftwerke als Zielobjekt für terroristische Angriffe gemindert ist. Weitere Maßnahmen sollten auf staatlicher Ebene getroffen werden, und zwar aufbauend auf einer umfassenden Bewertung der Verletzbarkeit und des Risikos aller Anlagen und Tätigkeiten, die ein potentielles Ziel für terroristische Angriffe darstellen könnten.

### 3.3 Sicherungsmaßnahmen gegen Proliferation

Deutschland unterliegt umfassenden und tiefgreifenden Inspektionen durch die IAEA. Dies gilt für alle kerntechnischen Anlagen, einschließlich der Lagerbecken für neue und bestrahlte Brennelemente und der Anlagen zur Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente. Umfassende Inspektionen aller kerntechnischen Einrichtungen werden zusätzlich (separat) durch EURATOM durchgeführt.

Unabhängig von den geringen Missbrauchsmöglichkeiten spaltbaren Materials machen die Überwachungen durch die beiden internationalen Organisationen IAEA und EURATOM und die aufwendigen Kontrollen der Betreiber einen nichtbefugten Umgang mit spaltbarem Material extrem unwahrscheinlich.

Der unentdeckte Diebstahl von spaltbarem Material aus deutschen Kernkraftwerken und Anlagen zur Herstellung von Brennelementen mit der daraus folgenden Möglichkeit der Herstellung einer Atomwaffe ist daher nahezu unmöglich. Eine Konstruktion einer Atombombe mit gering angereichertem Uran, das für den Betrieb kommerzieller Kraftwerke eingesetzt wird, ist zudem physikalisch nicht möglich.

Allerdings besteht prinzipiell die Möglichkeit durch Anhäufung von einigen Pu-Isotopen, die während des Betriebs durch die Bestrahlung von U-238 entstehen, zu waffentauglichem Material zu gelangen. Die Separierung des Plutoniums vom bestrahlten Brennstoff erfordert eine Wiederaufarbeitung, d. h. eine Technologie, die in Deutschland nicht mehr eingesetzt wird. Plutonium, das aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken in La Hague, Frankreich oder Sellafield, Großbritannien, extrahiert wird, wird entweder an diesen Stellen gelagert und von der IAEA und EURATOM überwacht oder wird zusammen mit Uran zu MOX-Brennelementen verarbeitet, die in deutschen Kernkraftwerken eingesetzt werden<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> Relevante Mengen an Pu gibt es in Deutschland nur noch als Bestandteil hochaktiven flüssigen Abfalls (HAWC) in der (früheren) Wiederaufarbeitungsanlage (WAK) Karlsruhe. Der HAWC soll in einer Verglasungseinrichtung verfestigt werden, die demnächst in Betrieb geht; es werden ca. 130 endlagerfähige Glasblöcke in Edelstahlbehältern erzeugt.

Abschließend ist festzustellen, dass die Proliferationsgefahr bei der Nutzung der Kernenergie in Deutschland angesichts der getroffenen Sicherungsmaßnahmen, der Art des Brennstoffkreislaufs und internationaler Überwachungen sehr klein ist.

### 3.4 Entsorgungsaspekte

Die internationalen Entwicklungen der letzten Jahre auf dem Gebiet der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und/oder abgebrannter Brennelemente zeigen, dass bedeutende Fortschritte erzielt werden konnten. Im Folgenden sollen nur einige Beispiele genannt werden:

- In Finnland trafen Regierung und Parlament im Jahr 2000 eine konzeptionelle Entscheidung für zwei mögliche Endlagerstandorte. Am abschließend ausgewählten Standort in Olkiluoto ist die Errichtung eines Untertagelabors im Gange und der erste Abfall soll voraussichtlich 2020 in das Endlager eingelagert werden können.
- Nach einem ausgedehnten Auswahlverfahren und umfangreichen Machbarkeitsstudien in acht Gemeinden werden in Schweden derzeit zwei Standorte untersucht. Der Beginn der Einlagerung in das Endlager ist für 2017 geplant.
- Der vom amerikanischen Kongress ausgewählte Standort Yucca Mountain wurde umfangreich untersucht. Das US Department of Energy (DOE) beabsichtigt in diesem Jahr den Genehmigungsantrag für die Errichtung des Endlagers bei der US Nuclear Regulatory Commission (NRC) einzureichen. Außerdem betreibt das DOE seit 1999 das Endlager WIPP für nicht wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle aus der Kernwaffenproduktion.
- In Frankreich wurde 1991 ein spezielles Gesetz verabschiedet, in dem drei Forschungsschwerpunkte (Abtrennung und Transmutation, reversible oder irreversible Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, Abfallkonditionierung und langfristige Zwischenlagerung) festgelegt wurden. Am Standort Bure werden derzeit zwei Schächte abgeteuft und erste untertägige Experimente wurden eingerichtet. Auf der Grundlage der Ergebnisse werden die französische Regierung und das Parlament 2006 das Konzept für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle festlegen.
- Gestützt auf die sehr guten Resultate einer Tiefbohrung in Opalinuston reichte die schweizerische Nagra 2002 einen Entsorgungsnachweis ein, dessen Überprüfung von der zuständigen Behörde (HSK) in 2005 abgeschlossen wurde. Darauf wurde eine aus kantonalen Politikern besetzte Kommission beauf-

tragt, die Standortfrage zu klären. Eine Entscheidung der Schweizer Regierung wird im Jahr 2006 erwartet.

Aufgrund der wissenschaftlichen Ergebnisse der letzten Jahrzehnte ist die internationale wissenschaftliche und technische Gemeinschaft davon überzeugt, dass die sichere Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen in tiefen geologischen Formationen möglich ist und dass zufriedenstellende Lösungen für die Langzeitsicherheit realisiert werden können.

Aufgrund einer Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen [36] bauen alle deutschen Kernkraftwerke Zwischenlager für ihre abgebrannten Brennelemente am Standort. Die genehmigte Betriebsdauer dieser Zwischenlager ist auf vierzig Jahre begrenzt. Alle entsprechenden Genehmigungsverfahren wurden erfolgreich durchgeführt, und der Bau schreitet überall voran. Folglich werden die zwei bestehenden zentralen Zwischenlager in Ahaus und in Gorleben hauptsächlich für die Zwischenlagerung der Brennelemente des THTR bzw. der verglasten hochradioaktiven Abfälle genutzt, die aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente deutscher LWR stammen. Ein politischer Grund für den Bau von Standortzwischenlagern war die Vermeidung von Brennelementtransporten durch Deutschland, die oft mit großen und manchmal gewalttätigen Demonstrationen einhergingen.

Die o. g. Vereinbarung [36] führte ein Moratorium für die untertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben ein. Dieses Moratorium trat am 1. Oktober 2000 in Kraft, und es soll mindestens drei Jahre und höchstens 10 Jahre dauern. Die ILK hat sich in verschiedenen Stellungnahmen bereits zu dem generellen Thema eines Endlagers in Gorleben geäußert [37], [38], [39].

Die übertägigen Standortuntersuchungen in Gorleben sind abgeschlossen. Nach dem Abteufen von zwei Schächten wurde der erste mögliche Einlagerungsbereich erfolgreich erkundet. Bis zum Inkrafttreten des Moratoriums wurden keine Ergebnisse gefunden, die die Eignung des Salzstocks als Endlager in Frage stellen. Bis jetzt wurden ungefähr 1,3 Milliarden € in das Endlagerprojekt Gorleben investiert.

Das ehemalige Eisenerzbergwerk Konrad ist als tiefes geologisches Endlager für nicht wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vorgesehen. Der Planfeststellungsbeschluss für das Endlager Konrad wurde von der zuständigen Niedersächsischen Genehmigungsbehörde im Mai 2002 erteilt. Wegen vier anhängiger Klagen kann der Bau aber erst nach den entsprechenden Gerichtsentscheidungen beginnen. Die bisherigen Investitionen in das Endlagerprojekt Konrad belaufen sich auf ca. 800 Millionen €.

Die bisherige Bundesregierung beabsichtigte, ein vollständig neues Standortauswahlverfahren für ein einziges Endlager in Deutschland zu starten. Zu diesem Zweck wurde der „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEnd)“ eingerichtet. Er erarbeitete zwischen 1999 und 2002 einen entsprechenden Vorschlag [40], der aber bis heute noch nicht umgesetzt worden ist (siehe [41] für eine detaillierte Stellungnahme der ILK zu diesem Vorschlag). Die ILK bemerkt, dass kein anderer Staat sich für ein einziges Endlager für alle Abfallarten entschieden hat und dass es gute technische Gründe gibt, die verschiedenen Abfallarten getrennt endzulagern.

Die ILK hält Fortschritte bei der Lösung der Entsorgungsfrage für kurzfristig erzielbar. Um den gegenwärtigen Stillstand in Deutschland zu überwinden, empfiehlt sie folgende dringliche Tätigkeiten [37]:

- Für wärmeentwickelnde und nicht wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind getrennte Endlager zu planen (siehe auch [38], [41]).
- Es sind alle notwendigen Schritte vorzubereiten, damit im Falle einer positiven Gerichtsentscheidung die Errichtung des Endlagers Konrad für nicht wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle begonnen werden kann (siehe auch [38]).
- Das Moratorium ist zu beenden und die untertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben so schnell wie möglich wieder aufzunehmen, um eine abschließende Beurteilung seiner Eignung als Endlager zu ermöglichen (siehe auch [38], [39])<sup>19</sup>.
- Eine Langzeitsicherheitsanalyse ("Total Systems Performance Assessment") eines Endlagerstandorts Gorleben ist umgehend anzufertigen, um weitere Erkenntnisse und Vorgaben für die Fortsetzung der zu einem sicheren Endlager führenden Arbeiten zu erhalten (siehe auch [39]).
- Die Errichtung eines Untertagelabors im Salzstock Gorleben ist zu prüfen<sup>20</sup>.
- Ein gesellschaftliches Programm, das auf die Akzeptanz der Endlagerstandorte durch die lokale Bevölkerung gerichtet ist, ist einzurichten. Dafür sollten einige Empfehlungen des AkEnd, wie die Einbindung der Betroffenen ("Stakeholder") vor Ort in den Entscheidungsprozess, genutzt werden.
- Die Rollen und Verantwortlichkeiten des Betreibers einerseits (Planung, Errichtung

<sup>19</sup> Nationale und internationale Bewertungen einer Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen am Standort Gorleben haben dessen Eignung bislang nicht in Frage gestellt.

<sup>20</sup> Eine derartige Anlage ist seit der Schließung des Forschungsbergwerks Asse im Jahr 1995 in Deutschland nicht mehr verfügbar.

und Betrieb des Endlagers) und der Behörde andererseits (Genehmigung und Aufsicht) sind zu überprüfen und genau zu definieren (siehe auch [41]).

### 3.5 Genehmigung und Aufsicht

Das Übereinkommen über nukleare Sicherheit [5] fordert, dass jedes Land einen aufsichtlichen Rahmen schafft, um die Sicherheit kerntechnischer Anlagen zu regeln. Dieser Rahmen sollte Sicherheitsvorschriften und -regelungen, ein Genehmigungssystem sowie behördliche Prüfungen und Beurteilungen enthalten und sollte auf wissenschaftlich-technischen und politisch neutralen Kriterien basieren. Dazu soll die Aufsichtsbehörde unabhängig sein von anderen Organisationen, die sich mit der Förderung der Kernenergie oder ihrem Ausstieg beschäftigen.

Die ILK hat sich vor kurzem detailliert mit dem kerntechnischen Regelwerk in Deutschland beschäftigt [42], und eine Überarbeitung unter Berücksichtigung von Empfehlungen gefordert. Zu diesen Empfehlungen zählen eine flachere Hierarchie in der Gliederung des Regelwerks, die Trennung von faktisch bindenden Anforderungen und nichtbindenden Empfehlungen, eine geringere Präskriptivität, eine internationale Ausrichtung sowie eine regelmäßige Aktualisierung. Das Regelwerk sollte ferner einem "Peer-review" unter internationaler Beteiligung unterzogen werden.

Im Unterschied zu fast allen anderen Staaten, die Kernkraftwerke betreiben, ist die Aufsichtssituation in Deutschland gekennzeichnet durch Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden sowohl auf der Ebene der einzelnen Länderministerien als auch beim Bundesministerium. Genehmigungen und die aufsichtlichen Prüfungen, Beurteilungen und Entscheidungen liegen beim jeweiligen Länderministerium in Bundesauftragsverwaltung, können allerdings vom Bundesministerium angewiesen werden. Dem Bundesministerium obliegt insbesondere die Pflege der internationalen Zusammenarbeit und die Vertretung in internationalen Gremien (z. B. IAEA, OECD, NEA).

In der Vergangenheit sind eine Reihe von Problemen im Bereich der Genehmigung und Aufsicht kerntechnischer Anlagen aufgetreten:

- Verwaltungsvorgänge, deren einzige Ziele der Schutz der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit sein sollten, wurden in der politischen Diskussion instrumentalisiert ("ausstiegsorientierter Vollzug"). Dies wurde besonders deutlich bei unterschiedlichen Positionen der Bundesregierung und der einzelnen Länder zur Kernenergie. Die ILK schließt nicht aus, dass dies nachteilige Auswirkungen auf die Sicherheit haben könnte.

- Deutschland verwendet vergleichsweise viele Ressourcen für die Aufsicht kerntechnischer Anlagen. Dies führt zu einer detaillierteren und umfassenderen Kontrolle der Betreiberaktivitäten als in den meisten anderen Ländern. Die ILK ist besorgt, dass dies ein Grund für eine zu präskriptive Form der Aufsicht ist, die die Verantwortlichkeit der Betreiber und die Entwicklung der Sicherheitskultur de facto mindern könnte.
- Die Länder beteiligen sich auf sehr indirektem Wege am internationalen Erfahrungsaustausch. Die Länderbehörden befinden sich dadurch in einer technisch-wissenschaftlichen Isolation, die für die nukleare Sicherheit nicht förderlich ist.

Die ILK verweist daher erneut auf ihre früheren Empfehlungen zur Verbesserung der internationalen technisch-wissenschaftlichen Kontakte [33] und zur Durchführung einer IRRT-Mission für die deutschen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden [34].

Generell kann eine aktive Beteiligung am internationalen Erfahrungsaustausch und an transnationalen Projekten auch dazu geeignet sein, die Lehren aus Ereignissen in vergleichbaren Anlagen schneller und fundierter zu ziehen und bereits frühzeitig flexibel auf neue Entwicklungen und Herausforderungen reagieren zu können. Derartige Entwicklungen beinhalten z. B. die Liberalisierung der Strommärkte und ihre Auswirkungen auf die Optimierung der Betriebsführung, des Sicherheitsmanagements und der Sicherheitskultur. Ferner wandelt sich international das Prinzip der Aufsicht von einer Normeinhaltungs-Orientierung zu einer risikoinformierten Ergebnis- und Verfahrenorientierung. Die Fähigkeit der Behörden zur adaptiven Anpassung an neue Herausforderungen ist daher unerlässlich.

Zusammenfassend sollte das Aufsichtssystem einem "Peer-review" mit Beteiligung internationaler Experten unterzogen werden. Ein solcher Abgleich mit aktuellen internationalen Erfahrungen und Vorgehensweisen, z. B. hinsichtlich Unabhängigkeit der Aufsichtsbehörde und einer Anwendung risikoinformierter und ergebnisorientierter Aufsicht, sollte zur Optimierung des derzeitigen Systems benutzt werden.

#### 4 Weiterentwicklung kerntechnischer Systeme

Auch wenn derzeitige Kernkraftwerke als sicher und wettbewerbsfähig gelten können, wurden internationale Initiativen gestartet (GIF<sup>21</sup> [43], INPRO<sup>22</sup> [44]), um eine neue Generation von Kernkraftwerken und zugehörigen Brennstoffkreisläufen zu entwickeln; die Kernspaltung wird als unverzichtbar für die zukünftige Energieversorgung angesehen. Die Ziele des GIF sind die Förderung der

- Nachhaltigkeit (bezogen auf den Brennstoffkreislauf),
- Wirtschaftlichkeit,
- Sicherheit und Zuverlässigkeit,
- Proliferationsresistenz und physischen Robustheit.

Diese neuen kerntechnischen Systeme sollen über internationale Projekte entwickelt werden, die Ziele und Bedürfnisse zukünftiger, moderner Gesellschaften erfüllen und bis zum Jahr 2030 einsetzbar sein.

Zu den Vorteilen einer solchen innovativen Nutzung der Kernenergie gehören verringerte Aktivitätsinventare und Volumen von radioaktiven Abfällen bzw. geologisch endzulagernder Stoffe, die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen sowie die Abtrennung und Transmutation extrem langlebiger Aktiniden. Weitergehende Anwendungen der Kerntechnik werden angestrebt, wie die Produktion von Wasserstoff und die Entsalzung von Seewasser.

Diese in Entwicklung befindliche neue Generation kerntechnischer Systeme hat ferner eine Kostenreduzierung zum Ziel und zwar durch effizientere Brennstoffkreisläufe, durch Vereinfachung der Anlagenauslegung und bessere Anpassungsmöglichkeiten an die jeweils erforderliche Anlagengröße. Die Reduzierung oder der Ausschluss der Notwendigkeit vorbereiteter Notfallmaßnahmen sind neben dem Schutz der Investition weitere Ziele, die man durch die Vereinfachung von Systemen, inhärente Sicherheitseigenschaften und innovatives Design erreichen will.

Um die angestrebte Konzeptzertifizierung sicherzustellen, sollten alle zu entwickelnden Systeme einem Sicherheitsansatz genügen, der deterministische und probabilistische Regeln beinhaltet, die von Risikoanalysen und gestaffelten Schutz-

<sup>21</sup> Das Internationale Generation IV Forum (GIF) umfasst 10 Mitgliedsstaaten (Argentinien, Brasilien, Frankreich, Großbritannien, Japan, Kanada, Südafrika, Südkorea, Schweiz und USA) und Euratom, während OECD-NEA und IAEA als ständige Beobachter beteiligt sind.

<sup>22</sup> International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles der IAEA

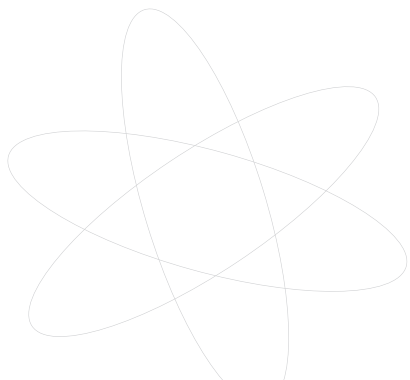
vorkehrungen ("defense-in-depth") abgeleitet sind. Die innovativen Systeme sollten die neuesten Technologien ("beste Praxis") nutzen, ebenso Kenntnisse über interne und externe Ereignisse sowie menschliches Verhalten und Sicherheitskultur. Der Sicherheitsansatz sollte sich auf alle Tätigkeiten und Einrichtungen des kompletten Brennstoffkreislaufs erstrecken und konsistent sein, um eine tatsächliche Verringerung des Risikos glaubhaft darlegen zu können.

Ein weiteres Ziel ist ein verbesserter Schutz gegen Proliferation durch den weitreichenden Einsatz interner physikalischer Barrieren und externer Sicherheitsmaßnahmen. Der Schutz gegen Terrorismus soll durch eine verstärkte Robustheit der neuen Systeme erreicht werden.

Mit der Arbeit an internationalen Forschungs- und Entwicklungsprojekten ist bereits begonnen worden. Nach der Vorauswahl von sechs innovativen Systemen (gasgekühlter schneller Reaktor, bleigekühlter schneller Reaktor, Salzschnmelze-Reaktor, natriumgekühlter schneller Reaktor, LWR mit überkritischen Dampfzuständen und Höchsttemperatur-HTR) [45], wurden gravierende Technologielücken ("show-stoppers") definiert, die die Konzeptentwicklung gefährden könnten und die den Schwerpunkt der gegenwärtigen Arbeiten bilden, an denen sich Unternehmen maßgeblich beteiligen. Der jährliche Forschungsmittelaufwand liegt in der Größenordnung von 250 Millionen US \$.

Das internationale Projekt INPRO liefert eine Methodik zur Bewertung innovativer kerntechnischer Energiesysteme, die unter der Federführung der IAEA entwickelt und veröffentlicht worden ist [46], [47].

Zusammenfassend ist es für Deutschland äußerst wichtig, an diesen Projekten aktiv teilzunehmen und die eigenen Erfahrungen und Kenntnisse in die internationale Gemeinschaft kerntechnischer Experten einzubringen und im Gegenzug daraus Nutzen zu ziehen. Dieses Vorgehen würde die Möglichkeit bieten, jüngere Generationen für diese Technik und die damit verbundenen Forschungs- und Entwicklungsprogramme zu gewinnen und so dem Erhalt der Fachkompetenz dienen.



## 5 Literatur

- [1] Europäische Kommission: *"Grünbuch: Hin zu einer Europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit"*, Brüssel, 2000
- [2] Europäische Kommission: *"Report on the Green Paper on Energy: Four years of European Initiatives"*, Brüssel, Juni 2005
- [3] Graf von Schwerin, A.: *"Welchen Energiemix brauchen Industrie und Wirtschaft? - Aspekte aus Sicht des EWSA"*, atw 50 (6), pp. 366 - 370, Juni 2005
- [4] Berbey, P. und Rousselot, O.: *"European Utilities Requirements: common rules to design next LWR plants in an open electricity market"*, IAEA Conference on fifty years of nuclear power – the next fifty years, Obninsk, Juni 2004
- [5] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"Übereinkommen über nukleare Sicherheit"*, Wien, 1994
- [6] WENRA (Western European Nuclear Regulators Association): *"Pilotstudie zur Harmonisierung der Reaktorsicherheit in den WENRA-Ländern"*, Kurzfassung, März 2003
- [7] VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft): *"VDEW Stromzahlen 2005"*, Frankfurt, Juni 2005
- [8] Europäische Kommission: *"European Energy and Transport Trends to 2030"*, Brüssel, 2003
- [9] Jäger, G.: *"Auswirkungen der EU-Erweiterung auf Angebot und Bedarf im Strommarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kernenergie"*, atw 49 (11), pp. 680 - 685, November 2004
- [10] Deutscher Bundestag: *"Schlussbericht der Enquete-Kommission zur Nachhaltigen Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung"*, Berlin, Juni 2002
- [11] World Commission on Environment and Development: *"Our Common Future"* (also known as Brundtland Report), New York, 1987
- [12] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie und anderer Technologien zur Stromerzeugung"*, ILK-16, Augsburg, Januar 2004
- [13] Hirschberg, S., Dones, R., Heck, T., Burgherr, P. und Schenler, W.: *"Sustainability of Electricity Supply Technologies under German Conditions: A Comparative Evaluation"*, PSI Report, Würenlingen und Villigen, November 2003



- [14] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Bericht: Zusammenfassung des Internationalen ILK-Workshops "Nachhaltigkeit"*, ILK-21, Augsburg, Mai 2005
- [15] VGB Fachausschuss Kernkraftwerksbetrieb: *"Betriebserfahrungen mit Kernkraftwerken 2004"*, VGB PowerTech, Mai 2005
- [16] Regierung der Bundesrepublik Deutschland: *"Übereinkommen über nukleare Sicherheit: Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die Dritte Überprüfungstagung im April 2005"*, Bonn, September 2004
- [17] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zur Festlegung von Betriebszeiten für Kernkraftwerke in Deutschland"*, ILK-23, Augsburg, September 2005
- [18] VDE-ETG (Energietechnische Gesellschaft): *"Elektrische Energieversorgung 2020 - Perspektiven und Handlungsbedarf"*, VDE-Studie, Frankfurt, 2005
- [19] DENA (Deutsche Energie-Agentur): *"Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020"*, Berlin, März 2005
- [20] Europäischer Wirtschafts- und Sozialausschuss: *"Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses zum Thema "Die Bedeutung der Kernenergie für die Stromerzeugung"*, Brüssel, Februar 2004
- [21] BMU (Bundesumweltministerium): *"Leitfäden zur Durchführung der Periodischen Sicherheitsüberprüfungen (PSÜ) für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland: Grundlagen zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung, Leitfaden Sicherheitsstatusanalyse, Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse"*, Bekanntmachung vom 18. August 1997 (BAZ. 1997, Nr. 232a); *"Leitfaden Deterministische Sicherheitsanalyse"*, Bekanntmachung vom 25. Juni 1998 (BAZ. 1998, Nr. 153) (Hinweis: alle diese Dokumente sind derzeit in Überarbeitung)
- [22] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants"*, Safety Standards Series No. NS-G-2.10, Wien, 2003
- [23] BMU (Bundesumweltministerium): *"Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG)"* vom 23. Dezember, 1959 (Bundesgesetzblatt, Teil I, Seite 814), neugefasst durch Bekanntmachung vom 15.7.1985 (BGBl I 1565), zuletzt geändert durch Art. 1 G vom 12.8.2005 (BGBl I 2365)
- [24] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"The Operating Organization for Nuclear Power Plants Safety Guide"*, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.4, Wien, 2002

- [25] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"Developing Safety Culture in Nuclear Activities: Practical Suggestions to assist Progress"*, IAEA Safety Report Series No 11, Wien, 1998
- [26] INSAG (International Nuclear Safety Advisory Group): *"Management of Operational Safety in Nuclear Power Plants"*, INSAG Series No 13, Wien, 1999
- [27] INSAG (International Nuclear Safety Advisory Group): *"Key practical issues in strengthening safety culture"*, INSAG Series No 15, Wien, 2002
- [28] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zum Umgang der Aufsichtsbehörde mit den von den Betreibern durchgeführten Selbstbewertungen der Sicherheitskultur"*, ILK-19, Augsburg, Januar 2005
- [29] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"Implementation and Review of a Nuclear Power Plant Ageing Management Programme"*, IAEA Safety Report Series No 15, Wien, 1999
- [30] RSK (Reaktorsicherheitskommission): *"RSK-Empfehlung: Beherrschung von Alterungsprozessen in Kernkraftwerken"*, RSK, Bonn, Juli 2004
- [31] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zur Sicherheit der Kernenergienutzung in Deutschland"*, ILK-3, Augsburg, Juli 2000
- [32] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zum Kompetenzerhalt auf dem Gebiet der Kerntechnik in Deutschland"*, ILK-17, Augsburg, März 2004
- [33] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Empfehlung zur Förderung der internationalen technisch-wissenschaftlichen Kontakte der deutschen Länderbehörden für nukleare Sicherheit"*, ILK-5, Augsburg, Oktober 2001
- [34] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zur Durchführung von internationalen Überprüfungen im Bereich der nuklearen Sicherheit in Deutschland"*, ILK-11, Augsburg, September 2002
- [35] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"Nuclear Safety Review for the Year 2003"*, Wien, Juli 2004
- [36] *"Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000"*, Bonn, Juni 2000
- [37] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Empfehlung zur Revitalisierung der Endlagerprojekte Gorleben und Konrad"*, Beschlussfassung geplant für Ende 2005
- [38] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen"*, ILK-2, Augsburg, Juli 2000

- [39] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zur möglichen Eignung des Standortes Gorleben als geologisches Endlager für radioaktive Abfälle"*, ILK-8, Augsburg, Januar 2002
- [40] AkEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte): *"Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd"*, Köln, Dezember 2002
- [41] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Stellungnahme zu den Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlager (AkEnd)"*, ILK-14, Augsburg, September 2003
- [42] ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik): *"ILK-Empfehlungen zu Anforderungen an ein zeitgemäßes Allgemeines Kerntechnisches Regelwerk in Deutschland"*, ILK-22, Augsburg, Juli 2005
- [43] U.S. DOE (Department of Energy): *"Generation IV Program Fact Sheet"*, Washington, February 2005
- [44] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) Brochure"*, Wien, September 2004
- [45] U.S. DOE-NERAC (Nuclear Energy Research Advisory Committee) and GIF (Generation IV International Forum): *"A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems"*, GIF-002-00, Washington, Dezember 2002
- [46] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"Guidance for the evaluation of innovative nuclear reactors and fuel cycles (Report on Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO))"*, IAEA-TECDOC 1362, Wien, Juni 2003
- [47] IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation): *"Methodology for the assessment of innovative nuclear reactors and fuel cycles (Report on Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO))"*, IAEA-TECDOC 1434, Wien, Dezember 2004
- [48] Hilden, W.: *"Kernenergie im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung für Europa"*, Vortrag Energieforum 2005, Berlin, 2005

## 6 Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
DENA	Deutsche Energie-Agentur GmbH
DOE	United States Department of Energy
EPR	European Pressure Water Reactor
EU	Europäische Union
EURATOM	Treaty establishing the European Atomic Energy Community
GIF	Generation IV International Forum
GW	Giga-Watt (10 <sup>9</sup> Watt)
GWe	Giga-Watt elektrisch
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (Schweiz)
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
ILK	Internationale Länderkommission Kerntechnik
INPRO	International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (IAEO)
INSAG	International Nuclear Safety Advisory Group
LWR	Leichtwasserreaktor
MCDA	Multikriterielle Entscheidungs-Analyse
MOX	Mischoxid
MW	Mega-Watt (10 <sup>6</sup> Watt)
NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OSART	Operational Safety Review Team (IAEO)
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PSÜ	Periodische Sicherheitsüberprüfung
Pu	Plutonium
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
THTR	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor
TWh	Terawatt-Stunden (10 <sup>12</sup> Watt-Stunden)
UNO	Vereinte Nationen
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
WANO	World Association of Nuclear Operators
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)

## Anhang 1: Nachhaltigkeitsindikatoren für Stromerzeugungstechnologien [12]

### Wirtschaftliche Indikatoren\*

Auswirkungsbereich	Indikator	Einheit	Braunkohle	Steinkohle	Öl	Erdgas	Kernenergie	Wasser	Wind	Sonne (PV)
Finanzielle Anforderungen	Produktionskosten	€ cent/kWh	3,3	3,0	3,1	3,6	2,1	7	9	60
	Anfälligkeit für Preiserhöhung des Rohstoffs	Faktor	1,6	1,5	1,8	1,8	1,3	1,0	1,03	1,1
Ressourcen	Verfügbarkeit (Lastfaktor)	%	80	80	80	80	80	40	20	9
	Geopolitische Faktoren	Relative Skala	100	80	20	40	80	100	100	100
	Langzeit-Nachhaltigkeit: Energetisch	Jahre	400	2 000	100	100	500	∞	∞	∞
	Langzeit-Nachhaltigkeit: Nicht-energetisch	kg (Cu) /GWh	13	11	12	4	5	1	510	230
	Lastfolge-Verhalten	Relative Skala	20	50	100	100	10	30	0	0

### Umwelt-Indikatoren\*

Auswirkungsbereich	Indikator	Einheit	Braunkohle	Steinkohle	Öl	Erdgas	Kernenergie	Wasser	Wind	Sonne (PV)
Globale Erwärmung	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	Tonnen/GWh	1 220	1 080	884	531	10	4	14	86
Regionale Umwelteinflüsse	Veränderung ungeschützter Öko-Systeme	km <sup>2</sup> /GWh	0,032	0,039	0,061	0,016	0,0017	0,0009	0,0029	0,011
Schadstoff-unabhängige Auswirkungen	Landverbrauch	m <sup>2</sup> /GWh	52	198	335	47	7	92	29	65
Schwere Unfälle	Kollektives Risiko	Todesfälle /GWh	5,7E-7	2,1E-5	4,5E-5	1,0E-5	2,3E-6	3,4E-7	1,1E-8	1,1E-7
Gesamtabfall	Gewicht	Tonnen/GWh	84	180	11	2	15	24	93	66

### Gesellschaftliche Indikatoren\*

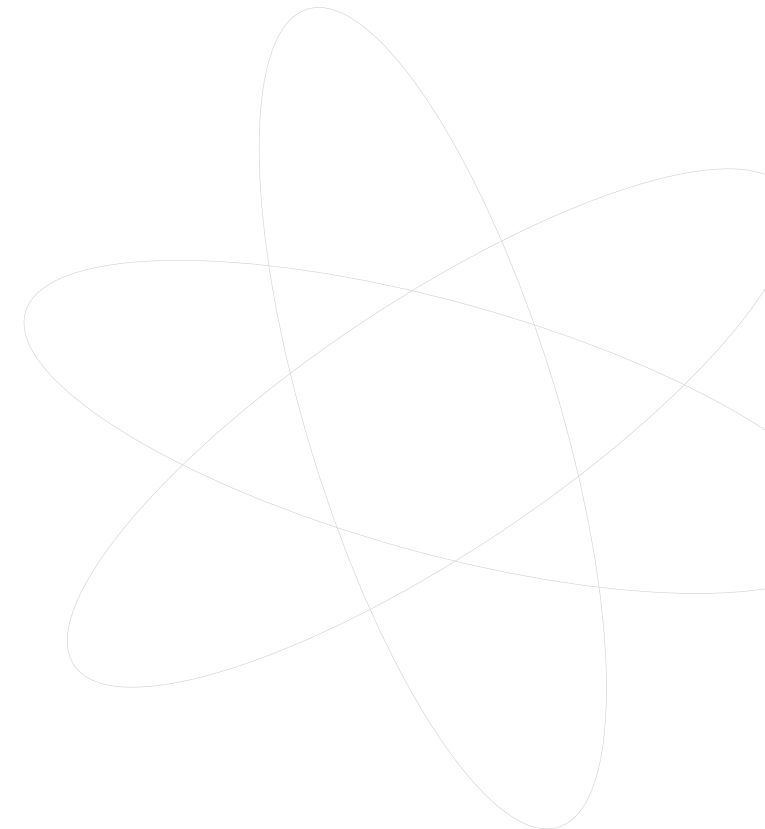
Auswirkungsbereich	Indikator	Einheit	Braunkohle	Steinkohle	Öl	Erdgas	Kernenergie	Wasser	Wind	Sonne (PV)
Beschäftigung	Technologiespezifische Arbeitsmöglichkeiten	Personen-Jahre/GWh	0,21	0,86	0,47	0,65	0,16	1,2	0,36	6,6
Proliferation	Potential	Relative Skala	0	0	0	0	100	0	0	0
Auswirkungen auf die Gesundheit (Normalbetrieb)	Sterblichkeit (reduzierte Lebenserwartung)	Jahre verlorenen Lebens/GWh	0,061	0,068	0,12	0,023	0,005	0,011	0,007	0,020
Lokale Störungen	Lärm, visuelle Effekte	Relative Skala	10	8	6	2	4	5	7	0
Einschluss des kritischen Abfalls	„Notwendige“ Einschlusszeit	Tausend Jahre	50	50	0,1	0,01	1 000	0,01	1	50
Risiko-Aversion	Maximale Konsequenzen eines potentiellen Unfalls	Todesfälle/ glaubhaftem Unfall	10	500	4 500	100	50 000	2 000	5	100

\* Für alle Technologien und alle Indikatoren war es nur möglich, als quantitative Werte Punktwerte zu bestimmen; obwohl es wünschenswert wäre, erlaubt der Stand der Technik keine generelle Ergänzung durch Streubreiten, dafür wäre ein erheblicher Forschungsaufwand erforderlich.

1. **Prof. Dr. George Apostolakis, USA**  
Professor für Kerntechnik und Technicsysteme am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA
2. **Prof. Dr. phil., Dr.-Ing. E.h. Adolf Birkhofer, Deutschland**  
Geschäftsführer der ISaR Institute for Safety and Reliability GmbH  
Lehrstuhl für Reaktordynamik und Reaktorsicherheit der Technischen Universität München
3. **Annick Carnino, Frankreich**  
Ehem. Direktorin des Bereichs Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen bei der IAEA
4. **Jean-Claude Chevallon, Frankreich**  
Ehem. Vizepräsident „Kerntechnische Stromerzeugung“ bei EDF, Frankreich
5. **Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Dieter Fischer, Deutschland**  
Inhaber des Lehrstuhls für Nachrichtentechnik der Ruhr-Universität Bochum
6. **Bo Gustafsson, Schweden**  
Vorstandsvorsitzender der SKB International Consultants AB, Schweden
7. **Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker, Deutschland**  
Professor für Psychologie an der Technischen Universität München  
Ehem. Professor für Allgemeine Psychologie an der Technischen Universität Dresden
8. **Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kröger, Schweiz**  
Inhaber des Lehrstuhls für Sicherheitstechnik und Leiter des Laboratoriums für Sicherheitsanalytik an der ETH Zürich
9. **Dr.-Ing. Erwin Lindauer, Deutschland** (stellvertretender Vorsitzender der ILK)  
Ehem. Geschäftsführer der GfS Gesellschaft für Simulatorschulung mbH  
Ehem. Geschäftsführer der KSG Kraftwerks-Simulator-Gesellschaft mbH
10. **Dr. Serge Prêtre, Schweiz** (Vorsitzender der ILK)  
Direktor (a.D.) der schweizerischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen)

11. **Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos, Deutschland**  
Inhaber des Lehrstuhls für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre der Universität Stuttgart  
Direktor der Staatlichen Materialprüfungsanstalt, Universität Stuttgart
12. **Antero Tamminen, Finnland**  
Ehem. langjähriger Technischer Direktor des KKW Loviisa, Finnland
13. **Prof. Dr. Frank-Peter Weiß, Deutschland**  
Professor für Anlagensicherheit an der TU Dresden  
Direktor des Instituts für Sicherheitsforschung im Forschungszentrum Rossendorf e.V., Dresden

(Liste in alphabetischer Reihenfolge)



- ILK-01** ILK-Stellungnahme zur Beförderung von abgebrannten Brennelementen und verglasten hochradioaktiven Abfällen (Juli 2000)
- ILK-02** ILK-Stellungnahme zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen (Juli 2000)
- ILK-03** ILK-Stellungnahme zur Sicherheit der Kernenergienutzung in Deutschland (Juli 2000)
- ILK-04** ILK-Empfehlungen zur Nutzung von Probabilistischen Sicherheitsanalysen im atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren (Mai 2001)
- ILK-05** ILK-Empfehlung zur Förderung der internationalen technisch-wissenschaftlichen Kontakte der deutschen Länderbehörden für nukleare Sicherheit (Oktober 2001)
- ILK-06** ILK-Stellungnahme zum Entwurf vom 5. Juli 2001 der Atomgesetzänderung (Oktober 2001)
- ILK-07** ILK-Stellungnahme zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente (November 2001)
- ILK-08** ILK-Stellungnahme zur möglichen Eignung des Standortes Gorleben als geologisches Endlager für radioaktive Abfälle (Januar 2002)
- ILK-09** ILK-Stellungnahme zu übergeordneten Schlussfolgerungen aus den Ereignissen in KKP 2 in Zusammenhang mit der Revision 2001 (Mai 2002)
- ILK-10** ILK-Stellungnahme zum Umgang mit dem Fragenkatalog der GRS zur „Praxis des Sicherheitsmanagements in den Kernkraftwerken in Deutschland“ (Juli 2002)
- ILK-11** ILK-Empfehlung zur Durchführung von internationalen Überprüfungen im Bereich der nuklearen Sicherheit in Deutschland (September 2002)
- ILK-12** Interner ILK-Bericht zum gezielten Absturz von Passagierflugzeugen auf Kernkraftwerke (März 2003)
- ILK-13** ILK-Stellungnahme zu den EU-Richtlinienvorschlägen zur kerntechnischen Sicherheit und zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Mai 2003)
- ILK-14** ILK-Stellungnahme zu den Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) (September 2003)
- ILK-15** ILK-Empfehlung zur Vermeidung von gemeinsam verursachten Ausfällen bei digitalen Schutzsystemen (September 2003)

- ILK-16** ILK-Stellungnahme zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie und anderer Technologien zur Stromerzeugung (Januar 2004)
- ILK-17** ILK-Stellungnahme zum Kompetenzerhalt auf dem Gebiet der Kerntechnik in Deutschland (März 2004)
- ILK-18** ILK-Bericht: Zusammenfassung des 2. Internationalen ILK-Symposiums „Harmonisierung von nuklearen Sicherheitsanforderungen – Eine Chance für mehr Transparenz und Effektivität?“ (Mai 2004)
- ILK-19** ILK-Stellungnahme zum Umgang der Aufsichtsbehörde mit den von den Betreibern durchgeführten Selbstbewertungen der Sicherheitskultur (Januar 2005)
- ILK-20** ILK-Stellungnahme zu Anforderungen bei Betriebstransienten mit unterstelltem Ausfall der Schnellabschaltung (ATWS) (März 2005)
- ILK-21** ILK-Bericht: Zusammenfassung des Internationalen ILK-Workshops "Nachhaltigkeit" (Mai 2005)
- ILK-22** ILK-Empfehlungen zu Anforderungen an ein zeitgemäßes Allgemeines Kerntechnisches Regelwerk in Deutschland (Juli 2005)
- ILK-23** ILK-Stellungnahme zur Festlegung von Betriebszeiten für Kernkraftwerke in Deutschland (September 2005)
- ILK-24** ILK-Stellungnahme zur Nutzung der Kernenergie in Deutschland (November 2005)
  - CD mit Vorträgen des ILK-Symposiums „Chancen und Risiken der Kernenergie“ im April 2001
  - Tagungsband mit Vorträgen des 2. ILK-Symposiums „Harmonisierung von nuklearen Sicherheitsanforderungen – Eine Chance für mehr Transparenz und Effektivität?“ im Oktober 2003

Bitte besuchen Sie unsere Homepage <http://www.ilc-online.org>, um den neuesten Stand unserer Veröffentlichungen zu erfahren und die dort angegebenen Empfehlungen und Stellungnahmen herunterzuladen oder kostenfrei zu bestellen.

Für weiterführende Informationen zu den momentan von der ILK bearbeiteten Themen möchten wir Sie auf die Seiten „Beratungsplan“ und „Aktuelles“ unserer Homepage verweisen.