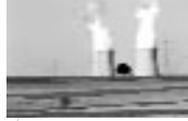


ilk

INTERNATIONALE
LÄNDERKOMMISSION
KERntechnik

Baden-Württemberg · Bayern · Hessen



ILK-Stellungnahme

zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie
und anderer Technologien zur Stromerzeugung

For the english version, please flip this booklet over!

Januar 2004
Nr.: ILK-16 D

Vorwort

Die Internationale Länderkommission Kerntechnik - ILK - der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Hessen wurde im Oktober 1999 gegründet und besteht derzeit aus 12 Wissenschaftlern und Experten aus Deutschland, 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, den hohen international anerkannten Sicherheitsstandard der süddeutschen Kernkraftwerke zu erhalten und weiter zu entwickeln.

In den vergangenen Jahren ist die Frage einer nachhaltigen Energieversorgung für die Zukunft wiederholt und unter sehr unterschiedlichen Randbedingungen diskutiert worden. Zu nennen sind hier z. B. die Fragen der globalen Erwärmung oder begrenzter Rohstoffvorräte. Die ILK misst diesen Themenstellungen große Bedeutung bei und hat sich daher, unterstützt durch eine externe Untersuchung, intensiv mit der Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie und anderer Technologien zur Stromerzeugung beschäftigt. Die vorliegende Stellungnahme wurde auf der 27. ILK-Sitzung am 23. Januar 2004 in München verabschiedet. Nach Ansicht der ILK muss die Bewertung der Nachhaltigkeit transparent erfolgen, und sollte neben den ökonomischen und ökologischen auch gesellschaftliche Aspekte berücksichtigen. In dieser Stellungnahme wird ein Beispiel für eine Untersuchungsmethodik vorgestellt. Darauf aufbauend wird eine Debatte zur Nachhaltigkeit verschiedener Energieversorgungstechnologien, unter Einbeziehung aller betroffenen Gruppen vorgeschlagen. Diese Stellungnahme richtet sich daher nicht nur an die Behörden, sondern auch an die Politik und die Öffentlichkeit.

Der Vorsitzende



Dr. Serge Prêtre

Vorwort	2
1 Einleitung	4
2 Das Konzept der Nachhaltigkeit und seine Operationalisierung	5
3 Umsetzung - Referenzsatz von Indikatoren	10
3.1 Methodik zur Bewertung und Zusammenfassung von Indikatoren	10
3.2 Referenztechnologien	12
3.3 Datenanpassung an die deutsche Situation	12
4 Aggregation	15
4.1 Aggregation anhand der Gesamtkosten	15
4.2 Aggregation anhand der Multi-kriteriellen Entscheidungsanalyse	17
5 Schlussfolgerungen	21
5.1 Die Rolle der Nachhaltigkeit und die Bewertungsmethode	21
5.2 Eigenschaften bestimmter Optionen	21
5.3 Gesamtbewertung der Nachhaltigkeit	22
5.4 Weitere Schritte	23
Literatur	25
Mitglieder der ILK	27
ILK-Veröffentlichungen	29

ILK - Geschäftsstelle beim Bayerischen Landesamt für Umweltschutz

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
<http://www.ilk-online.org>

1 Einleitung

Der Bereich der Stromversorgung ist von zentraler Bedeutung für das wirtschaftliche Wachstum und die gesellschaftliche Entwicklung. Während sich aus der Stromnutzung zahlreiche gesellschaftliche und wirtschaftliche Vorteile ergeben, kann je nach Art die Stromerzeugung mit Auswirkungen verbunden sein, die mit dem Konzept der Nachhaltigkeit nicht vollständig in Einklang gebracht werden können. Bei Entscheidungen über die heutige und künftige Energieversorgung gewinnen aber Aspekte der Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung. Bewertungen der Nachhaltigkeit bestimmter Optionen zur Stromversorgung werden allerdings oft spontan vorgenommen, und können zudem leicht von Vorurteilen beeinflusst werden und willkürlich sein. Insbesondere die Kernenergie wird durch die deutsche Bundesregierung als nicht-nachhaltige Option für die Zukunft ausgeschlossen und dabei getrennt von anderen Energieoptionen fundamental kritisch betrachtet. Die ILK ist der Meinung, dass alle relevanten Optionen, einschließlich der Kernenergie, mittels einer systematischen und umfassenden Betrachtungsweise methodisch vergleichbar bewertet werden müssen. Daher hält es die ILK für wichtig, dieses Thema detaillierter als bisher zu untersuchen, und stellt ihre Ansichten in der vorliegenden Stellungnahme vor.

Diese ILK-Stellungnahme zur Nachhaltigkeit berücksichtigt die einschlägigen nationalen und internationalen Entwicklungen und gründet darauf. Ergänzend dazu hat das Paul-Scherrer-Institut (PSI) eine im Umfang begrenzte Vergleichsstudie zur Nachhaltigkeit der verschiedenen Technologien zur Stromerzeugung durchgeführt, unter Maßgabe deutscher Rahmenbedingungen [1]. Diese Studie sollte die Anwendbarkeit eines systematischen Ansatzes zur Bewertung der Nachhaltigkeit nachweisen und zu vergleichsweise konsistenten Ergebnissen führen, aus denen robuste Schlussfolgerungen abgeleitet werden können.

2 Das Konzept der Nachhaltigkeit und seine Operationalisierung

Das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung ist mit der Veröffentlichung des Berichts „Unsere Gemeinsame Zukunft“ der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (die sogenannte Brundtland-Kommission) im Jahr 1987 erstmalig aufgetaucht, bzw. wurde wieder belebt. Dieser Bericht definiert eine nachhaltige Entwicklung als Fähigkeit, „die Bedürfnisse der Gegenwart zu befriedigen, ohne gleichzeitig die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zur Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse einzuschränken“ [2]. *Im allgemeinen Sinne beinhaltet eine nachhaltige Entwicklung das Ziel einer Ausgewogenheit innerhalb und zwischen Ländern und Generationen, unter Einbindung von wirtschaftlichem Wachstum, Umweltschutz und gesellschaftlichem Wohlergehen.* Die eigentliche Herausforderung an eine nachhaltige Entwicklung ist es, diese drei Dimensionen in ausgewogener Weise, unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen und notwendiger Kompromisse, zu berücksichtigen.

Seither sind eine Vielzahl von Definitionen einer nachhaltigen Entwicklung vorgeschlagen worden, mit unterschiedlicher Betonung der wesentlichen Elemente von Nachhaltigkeit¹. Die ILK unterstützt die grundlegenden Ansätze, die über die Definition des Berichts der Brundtland-Kommission zum Ausdruck gebracht werden. Diese Definition unterliegt aber zahlreichen Interpretationen, die wiederum für eine Implementierung und praktische Anwendung des Konzeptes wesentlich sind. So gibt es auf der konzeptionellen Ebene eine sehr deutliche Unterscheidung zwischen jenen, die eine „strenge“ Nachhaltigkeit befürworten, und denen, die eine „weiche“ Nachhaltigkeit verfechten. Die Unterschiede zwischen diesen Konzeptansätzen resultieren aus abweichenden Annahmen zur Ersetzbarkeit von natürlichen und durch Menschen geschaffenen Ressourcen („Kapital“), zum Schadensausgleich und zur Diskontierung zukünftiger Ereignisse. Eine „weiche“ Nachhaltigkeit fordert, dass die jetzigen Generationen die Verpflichtung haben, zukünftigen Generationen einen Kapitalbestand zu hinterlassen, der ungeschmälert ist; aber gleichzeitig ist es zulässig, dass das von der Menschheit geschaffene Kapital das natürliche ersetzen darf.

¹ Diese ILK-Stellungnahme konzentriert sich auf den Grad der Nachhaltigkeit von spezifischen Energieträgern und derzeitigen -technologien, d. h. der Umfang der Bewertung ist thematisch eingeschränkter als bei einer allgemeinen Betrachtung einer nachhaltigen Entwicklung.

Die ILK unterstützt die Ansicht, dass

- der Verbrauch erneuerbarer Ressourcen ihre Regenerationsrate nicht überschreiten darf;
- nicht-erneuerbare Energieträger und Rohstoffe höchstens in dem Umfang verbraucht werden sollten, der einer physikalisch und funktional gleichwertigen Substitution durch wirtschaftlich nutzbare erneuerbare Rohstoffe, einer verbesserten Effizienz beim Verbrauch verfügbarer Rohstoffe oder der Entdeckung neuer Reserven entspricht;
- die Verschmutzung und Abfallbelastung der Umwelt das Aufnahmevermögen der natürlichen Umwelt nicht überschreiten darf;
- Technologien, die ein Risiko beinhalten, nur dann eingesetzt werden sollten, wenn sie einen ausreichenden Nutzen für die Gesellschaft erzielen; Risiken für die menschliche Gesundheit sollten möglichst niedrig gehalten werden.

Somit folgt die ILK im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch dem Konzept einer „weichen“ Nachhaltigkeit. Diese Position ist realistisch und berücksichtigt, dass die (durch Menschen bewirkte) „Entwicklungs-Komponente“ einen unerlässlichen Bestandteil des Gesamtkonzeptes darstellt.

Die diskutierten Elemente einer nachhaltigen Entwicklung stellen eine wesentliche Grundlage dar, allerdings lassen die Definitionen und Prinzipien noch keine zielgerichtete Operationalisierung des Nachhaltigkeitskonzeptes zu, vor allem, wenn es darum geht, die unterschiedlichen Merkmale verschiedener Energietechnologien herauszuarbeiten. Unabhängig vom jeweils verfolgten Nachhaltigkeitskonzept besteht ein allgemeines Einverständnis darüber, dass die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung innerhalb des Stromsektors die Integration wirtschaftlicher, ökologischer und gesellschaftlicher Dimensionen im Entscheidungsprozess erfordert. Nach Meinung der ILK kann (und sollte) die Bewertung von Alternativen anhand eines explizit benannten Satzes von Kriterien und Indikatoren erfolgen, die diese drei Dimensionen abdecken; dieser sollte für spezifische Anwendungen, hier für Stromversorgungssysteme, vereinbart werden.

Von nationalen und internationalen Organisationen sind bereits zahlreiche Vorschläge für Kriterien und Indikatoren, die eine nachhaltige Entwicklung beschreiben, unterbreitet worden. Unter anderem gibt es Vorschläge der Vereinten Nationen (UN), speziell der Kommission für nachhaltige Entwicklung [3], der OECD [4, 5], der IAEA [6], der deutschen Enquete-Kommission [7] und des PSI [8, 9]. Diese

Initiativen sind getrieben von der weltweiten Sorge um „den Planeten Erde“ und durch Forderungen von Entscheidungsträgern, die für die Förderung und Sicherstellung einer nachhaltigen Entwicklung, vor allem auf nationaler Ebene, verantwortlich sind. Gleichzeitig gibt es nur wenige Ansätze für eine konsequente Umsetzung der vorgeschlagenen Kriterien- und Indikatorensätze.

Der aktuelle Kenntnisstand lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Indikatoren sind unterschiedlich breit angelegt; sie haben unterschiedliche Schwerpunkte: nachhaltige Entwicklung generell; nachhaltige Entwicklung des Energiesektors; nachhaltige Entwicklung spezieller Energieträger.
2. Die von internationalen Organisationen entwickelten Indikatorensätze sind nicht ausreichend, um die Nachhaltigkeitsmerkmale der wesentlichen Energieträger, mit angemessener Unterscheidung von Technologien, vergleichen zu können.
3. Ökonomische und ökologische Kriterien/Indikatoren sind vergleichsweise weit entwickelt; gesellschaftliche Kriterien sind eher schwach entwickelt und (in vielen Fällen) sehr subjektiv.
4. Die meisten Bewertungssätze basieren auf direkt verfügbaren, stark vereinfachten Indikatoren mit erheblichen Konsistenzproblemen.
5. Es sind wenige Anstrengungen unternommen worden, Indikatoren zu aggregieren, um die Entscheidungsfindung zu erleichtern.
6. Die Indikatorensätze der Enquete-Kommission und des PSI weisen zahlreiche Gemeinsamkeiten auf. Die Enquete-Kommission berücksichtigt keine spezifischen Unfall- und Abfall-Indikatoren, die aber für die gesellschaftliche Dimension sehr relevant sind. Bei den aggregierten Indikatoren des PSI werden Überschneidungen vermieden, was bei den meisten anderen Indikatorensätzen nicht der Fall ist.
7. Aus früheren Studien ist kein Satz technologie- und anwendungsspezifischer, abgestimmter quantitativer Indikatoren verfügbar, der allgemein akzeptiert ist. Voraussetzung für die Entwicklung derartiger Indikatoren ist eine breite Wissensbasis. Ein analytischer Rahmen, der als Grundlage für die Entwicklung eines derartigen Indikatorensatzes dienen kann, wird in der Studie des PSI [1], auf der diese Stellungnahme gründet, verwendet.

Ausgehend von Recherche-Ergebnissen, Erfahrungen aus Nachhaltigkeitsbewertungen für China und die Schweiz, die unter sehr unterschiedlichen Randbedingungen vom PSI durchgeführt wurden, und den generellen Anforderungen an Indikatoren, schließt sich die ILK den Empfehlungen in [1] bezüglich eines geeigneten Kriterien- und Indikatorenansatzes an. Dabei werden die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit berücksichtigt: Wirtschaftlichkeit, Umwelt sowie Gesellschaft (einschließlich Gesundheit). In der nachfolgenden Tabelle sind die für die Bewertung von alternativen Stromerzeugungstechnologien ausgewählten Indikatoren dargestellt; sie sollen als Ausgangspunkt für eine vertiefte Diskussion dienen.

Dimension	Auswirkungsbereich	Indikator	Einheit
Wirtschaftlichkeit	Finanzielle Anforderungen	Produktionskosten	€ cent/kWh
		Anfälligkeit für Preiserhöhung des Rohstoffs	Faktor
	Ressourcen	Verfügbarkeit (Lastfaktor)	%
		Geopolitische Faktoren	Relative Skala
		Langzeit-Nachhaltigkeit: Energetisch	Jahre
		Langzeit-Nachhaltigkeit: Nicht-energetisch	kg (Cu)/GWh
Lastfolge-Verhalten	Relative Skala		
Umwelt	Globale Erwärmung	CO ₂ -Äquivalent	Tonnen/GWh
	Regionale Umwelteinflüsse	Veränderung ungeschützter Öko-Systeme	km ² /GWh
	Schadstoff-unabhängige Auswirkungen	Landverbrauch	m ² /GWh
	Schwere Unfälle	Kollektives Risiko	Todesfälle/GWh
	Gesamtabfall	Gewicht	Tonnen/GWh
Gesellschaft	Beschäftigung	Technologiespezifische Arbeitsmöglichkeiten	Personen-Jahre/GWh
	Proliferation	Potential	Relative Skala
	Auswirkungen auf die Gesundheit (Normalbetrieb)	Sterblichkeit (reduzierte Lebenserwartung)	Jahre verlorene Lebens/GWh
	Lokale Störungen	Lärm, visuelle Effekte	Relative Skala
	Einschluss des kritischen Abfalls	„Notwendige“ Einschusszeit	Tausend Jahre
	Risiko-Aversion	Maximale Konsequenzen eines potentiellen Unfalls	Todesfälle/glaubhaftem Unfall

Diese Indikatoren sind weitgehend mit denen der Untersuchung des PSI [1] identisch, mit einigen Begriffsanpassungen zur besseren Verständlichkeit dieser ILK-Stellungnahme. Wie bereits dargelegt, berücksichtigt Nachhaltigkeit sowohl die Bedürfnisse der zukünftigen als auch der heutigen Generation; dies wird, unter anderem, durch Indikatoren wie „Landverbrauch“ oder „Lokale Störungen“ deutlich. Der Aspekt der Effizienz wird nicht über einen gesonderten Indikator erfasst, sondern ist implizit in dem verwendeten Indikatorenansatz beinhaltet. In Übereinstimmung mit der Enquête-Kommission [7] wird Gesundheit als Teil der gesellschaftlichen Dimension, und nicht der Umwelt-Dimension, betrachtet. Es wird generell davon ausgegangen, dass all diese Indikatoren hinreichend unabhängig voneinander sind.

Die Einheit („Faktor“) des Indikators „Anfälligkeit für Preiserhöhung des Rohstoffs“ berücksichtigt eine Erhöhung der Produktionskosten infolge einer Verdoppelung der Rohstoffkosten. Der Indikator „Geopolitische Faktoren“ bezieht sich auf die Sicherheit der Rohstoffversorgung angesichts der politischen Stabilität des Herkunftslands (Schätzwerte). Kupfer (Cu) wurde als eine repräsentative Größe für die nicht-energetischen Aspekte (Ressourcen) der „Langzeit-Nachhaltigkeit“ herangezogen, da es ein sehr teures, breit verwendetes Material ist und nicht vollständig rezykliert werden kann. Das „Kollektive Risiko“ erfasst die Konsequenzen von schweren Unfällen, bezogen auf die pro Jahr durch die jeweilige Technologie erzeugte Strommenge. Die Anzahl der Todesfälle dient dabei als Ersatzeinheit für die Auswirkungen auf die Umwelt und basiert entweder auf historischen Daten oder auf theoretischen Analysen (Probabilistische Sicherheitsanalysen, PSA). „Beschäftigung“ ist ein wichtiges gesellschaftliches Thema für heutige und zukünftige Generationen; mögliche nachteilige Auswirkungen einer arbeitsintensiven Energieproduktion spiegeln sich bei den „Produktionskosten“ wider. Der Indikator „Maximale Konsequenzen eines potentiellen Unfalls“ dient als Ersatzmaßstab für „Risiko-Aversion“ und gibt den maximalen Schaden glaubhafter Unfälle wieder, ohne ihre Häufigkeit zu berücksichtigen, und unterscheidet sich folglich von „Schwere Unfälle“ bzw. „Kollektives Risiko“.

3 Umsetzung – Referenzsatz von Indikatoren

3.1 Methodik zur Bewertung und Zusammenfassung von Indikatoren

Die in der Untersuchung des PSI eingesetzten quantitativen Indikatoren basieren auf einer systematischen, disziplinübergreifenden Bottom-up-Methodik für die Bewertung von Energiesystemen [1]. Der Ansatz ist prozessorientiert, d. h. die relevanten Technologien und ihre Eigenschaften werden explizit abgebildet. Die Umsetzung und die Anwendung der verschiedenen Bewertungsmethoden sind geprägt von Prinzipien, die von der Lebenszyklus-Analyse (LCA) übernommen wurden [1]. Die hier kurz beschriebenen Methoden konzentrieren sich auf disaggregierte Umwelt-Indikatoren und verwandte gesellschaftliche Indikatoren; die meisten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Indikatoren sind entweder direkt verfügbar, oder sie ergeben sich aus einfachen Bewertungen und dem Einsatz von Expertenwissen.

Detaillierte Umwelt-Inventare (d. h. Belastungen wie Emissionen oder Abfälle) von derzeitigen und zukünftigen Energiesystemen während des Normalbetriebs sind für die UCTE (European „Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity“-Staaten ermittelt worden, mit dem höchsten Detaillierungsgrad für die Schweiz (siehe [1]). Dabei wurden die vollständigen Energiekreisläufe betrachtet, einschließlich der Rohstoffgewinnung und -umwandlung, der Energieproduktion und der Abfallbeseitigung. Alle Systeme sind von „Anfang bis Ende“ beschrieben worden, wobei jeder Schritt des Kreislaufs unterteilt ist in Errichtungs-, Betriebs- und Rückbauphase. Für alle Schritte der Energiekreisläufe sind die erforderlichen Materialien und Transporte berücksichtigt worden. Dieser Ansatz erlaubt es erstens die direkten Emissionen und andere Belastungen der gesamten Lebensdauer von Kraftwerken sowie aller relevanten vor- und nachgeschalteten Prozesse sowie zweitens die indirekten Emissionen und anderen Belastungen abzudecken, die mit Material- und Energieeinsatz verbunden sind.

Die Bewertung der *Auswirkungen auf die Umwelt* beruht auf einer Abschätzung der Schadstoffkonzentrationen und -ablagerungen, die aus den Emissionen der wichtigsten Schadstoffe herrühren. Die Abschätzung der *externen Umweltkosten*, d. h. der Gesundheits- und Umweltschäden, die derzeit nicht in den Energiepreisen enthalten sind, beruht auf dem Ansatz des „Auswirkungspfades“ („impact pathway“ [9, 10]) mit folgenden Schritten: Charakterisierung der Technologie und des Standortes, einschließlich verursachter Belastungen, Beschreibung der „aufnehmenden“ Umwelt, Quantifizierung der Auswirkungen (soweit möglich unter Benutzung von Ausbreitungsmodellen für atmosphärische Schadstoffe und einer Dosis-Risiko-Beziehung) und wirtschaftliche Bewertung.

Die *Risiken schwerer Unfälle* werden anhand bisheriger weltweiter Erfahrungen oder unter Verwendung von Methoden der Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) für die Kernenergie abgeschätzt. In diesem Rahmen wurde die umfassende Datenbank ENSAD („Energy-related Severe Accident Database“) entwickelt [1], wiederum für die kompletten Energiekreisläufe. Bei den Betrachtungen wurde besonderes Augenmerk auf die Übertragbarkeit der historischen Ereignisse auf die jetzt zu betrachtenden Technologien gelegt. Es wurde ein breites Spektrum von Schadenskategorien berücksichtigt, u. a. Todesfälle, schwere Verletzungen, Evakuierungen, Land- oder Wasserkontamination und wirtschaftliche Schäden (für eine Diskussion der Risiken schwerer Unfälle im Bereich der Kernenergie wird auch auf [11] verwiesen).

Externe Kosten stellen einen hoch aggregierten Indikator des Umweltverhaltens dar. Die *gesamten („echten“) Kosten* der Stromproduktion werden durch die Summierung der internen und der externen Kosten abgeschätzt. Von einigen Autoren, z. B. [12], wurde vorgeschlagen, die systemspezifischen Gesamtkosten der Energieproduktion als integrierten Indikator der Nachhaltigkeit für Vergleichsbetrachtungen zu benutzen, da sich darin die wirtschaftliche und ökologische Effizienz der Energiesysteme widerspiegelt. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Gesamtkosten nur diejenigen Kosten beinhalten, die direkt den spezifischen Energieträgern zuzuordnen sind. Es gibt aber weitere Kosten, die aus der spezifischen Kombination von Energieträgern („Mix“) innerhalb des Energieversorgungssystems resultieren. Zum Beispiel können verschiedene Kombinationen von Energieträgern und regionale Verteilungen unterschiedliche Kosten für das Stromnetz und für Reservekapazitäten verursachen. Diese Aspekte benachteiligen Energieträger mit einer stochastischen Verfügbarkeit oder einer erheblichen regionalen Konzentration.

Ein anderer Ansatz zur Aggregation basiert auf der Anwendung der *Multi-kriteriellen Entscheidungsanalyse* (MCDA). Der Einsatz dieses Ansatzes ermöglicht den Entscheidungsträgern, die oft im Widerspruch zueinander stehenden wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Kriterien gemeinsam zu betrachten. Im Vergleich zu der alleinigen Betrachtung der Gesamtkosten bringt MCDA die gesellschaftliche Dimension in die Bewertung mit ein. Die von der ILK in Auftrag gegebene Studie nutzt in hohem Maße Detailkenntnisse über das Verhalten von Energiesystemen, und zwar in einem Prozess, der die Berücksichtigung von Werturteilen zulässt.

3.2 Referenztechnologien

Die Untersuchung berücksichtigt fossile Energieträger (Braunkohle, Steinkohle, Öl, Erdgas), Kernenergie und erneuerbare Energien (Wasserkraft, Windenergie, Sonnenenergie (Photovoltaik (PV))). Soweit möglich wurden die derzeit in Deutschland bei der Stromerzeugung eingesetzten Technologien als Referenz herangezogen. Die Berechnungen wurden exemplarisch für eine durchschnittliche Leistungscharakteristik dieser Technologien durchgeführt. Dies gilt entsprechend auch für die jeweiligen Energiekreisläufe, außerdem wurden typische Lastfaktoren angesetzt. Der für die Untersuchung benutzte Satz an Indikatorwerten gilt für heute zum Einsatz kommende Technologien. Zum Beispiel wurde das Entwicklungspotential, das einen entscheidenden Faktor darstellt, wenn man realistische Optionen für die Stromversorgung der Zukunft betrachtet, in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt, da diese auf die derzeitige Situation der Stromversorgung in Deutschland fokussiert ist.

3.3 Datenanpassung an die deutsche Situation

Sofern sie verfügbar und konsistent mit dem Gesamtansatz waren, wurden spezifische deutsche Daten benutzt. In einigen wenigen Fällen wurden Schweizer Daten eingesetzt, und zwar dann, wenn die Unterschiede als unbedeutend eingestuft wurden. Wann immer notwendig, wurden geeignete Anpassungen der größtenteils aus der Schweiz oder der UCTE stammenden Indikatorwerte an die deutschen Verhältnisse durchgeführt. Aufgrund begrenzter Ressourcen sind einige dieser Anpassungen recht grob, was für das Anliegen der vorliegenden Studie dennoch hinreichend ist.

Bei den Unfall-Indikatoren wurden die OECD-spezifischen Ergebnisse der Energiekreisläufe für fossile Energieträger und die Wasserkraft (siehe [1]) auch als repräsentativ für Deutschland betrachtet. Bei der Kernenergie wurden die Risikowerte, die in einer Level 3 PSA für ein Schweizer Kernkraftwerk ermittelt wurden, als Ausgangspunkt herangezogen, allerdings mit nachträglicher Anpassung an die für die deutschen Kraftwerke typische höhere Anlagenleistung und das damit einhergehende höhere radioaktive Inventar.

Die folgende Tabellen zeigen den vollständigen Indikatorensatz der vorliegenden Untersuchung. Einige der in diesen Tabellen aufgeführten Werte stammen aus modellbasierten Bewertungen, andere beruhen auf Schätzungen. Die damit verbundenen Unsicherheiten können bedeutsam sein. Aus diesem Grund sind die genannten quantitativen Indikatorwerte vorrangig für Vergleiche zur Ermittlung einer Reihenfolge der einzelnen Technologien untereinander einsetzbar und somit

für das Anliegen der vorliegenden Studie, einschließlich der MCDA-basierten Aggregation, geeignet. Die Zahlenwerte sind in einigen Fällen gerundet. Bei dem Bestreben, für alle Technologien und alle Indikatoren einen quantitativen Wert zu ermitteln, war es nur möglich, Punktwerte zu bestimmen; obwohl es wünschenswert wäre, erlaubt der Stand der Technik keine generelle Ergänzung durch Streubreiten.

Einige Kommentare zu spezifischen Indikatoren mögen für ein besseres Verständnis der nachfolgenden Tabellen hilfreich sein: Der Indikator „Produktionskosten“ beinhaltet die Kosten der derzeit in Betrieb befindlichen Systeme, aber nicht die für neue Anlagen. Die Kapitalkosten der betriebenen Einrichtungen sind berücksichtigt, es sei denn, sie sind bereits amortisiert, wie dies z. B. für die Kernenergie weitgehend der Fall ist. Der angegebene Wert für „Risiko-Aversion“ ist für alle Technologien aus Erfahrungen abgeleitet worden, mit Ausnahme der Kernenergie. Für die Kernenergie wurde der angegebene Maximalwert aus theoretischen Analysen (PSA, Level 3, siehe auch [11]) entnommen, der bestimmt wird von den Langzeit-Auswirkungen geringer Strahlendosen, unter Zugrundelegung einer (konservativen) linearen Dosis-Risiko-Beziehung. Diese Analysen weisen erhebliche Unsicherheiten auf.

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
	Lastfolgeverhalten	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 ₂ -Äquivalent	Tonnen/GWh	1 220	1 080	884	531	10	4	14	86
Regionale Umwelteinflüsse	Veränderung ungeschützter Öko-Systeme	km ² /GWh	0,032	0,039	0,061	0,016	0,0017	0,0009	0,0029	0,011
Schadstoff-unabhängige Auswirkungen	Landverbrauch	m ² /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.

4 Aggregation

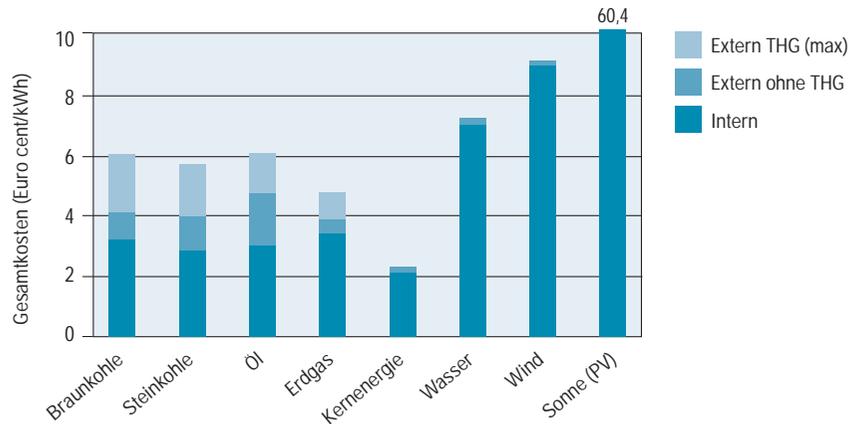
Die Aggregation der Indikatoren ermöglicht es, eine Gesamtbewertung der Technologien durchzuführen. Zwei Aggregationsansätze wurden zur Fundierung dieser ILK-Stellungnahme verwendet.

4.1 Aggregation anhand der Gesamtkosten

Die Gesamtkosten setzen sich aus den internen Kosten, d. h. den Produktionskosten, und den externen Kosten zusammen. Die externen Kosten werden bestimmt durch die auf die öffentliche Gesundheit wirkenden Effekte, die durch einen Anstieg von Schadstoffkonzentrationen in der Umgebungsluft bzw. ionisierender Strahlung aufgrund der verschiedenen Verarbeitungsschritte der Energiesysteme verursacht werden². Die externen Kosten müssen auch die Effekte globaler Erwärmung bzw. von Treibhausgasen beinhalten, da alle diese Effekte erhebliche Auswirkungen haben können. Generell ist der durch die Emission einer Einheit eines Schadstoffes verursachte Schaden dann hoch, wenn die Zahl der davon Betroffenen sehr groß ist. Die fossilen Systeme, mit Ausnahme von Erdgas, zeigen dabei sehr viel höhere Auswirkungen als die anderen Energieträger.

Die auf Basis der für Deutschland spezifischen internen und externen Kosten ermittelten und auf kWh normalisierten Gesamtkosten sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Die mit der globalen Erwärmung verbundenen externen Kostenangaben sind dabei sehr unsicher und viel weniger stabil als entsprechende durch Luftschadstoffe verursachte Kosten.

² Abschätzungen der externen Kosten beinhalten auch die gesundheitlichen Auswirkungen häufigkeitsgewichteter schwerer Unfälle innerhalb der jeweiligen Energiekreisläufe obwohl diese Beiträge praktisch vernachlässigbar sind im Vergleich zu den monetären Schäden während des Normalbetriebs.



Vergleich der normalisierten Gesamtkosten der derzeit in Deutschland eingesetzten Technologien (THG = Treibhausgase)

In einer Rangfolge aufgrund der Gesamtkosten weist die Kernenergie das beste Ergebnis auf, gefolgt von Erdgas und Steinkohle. Der große Abstand der Kernenergie gegenüber den anderen Energieträgern ist zum Teil dem Umstand zuzuschreiben, dass die deutschen Kernkraftwerke weitgehend amortisiert sind, so dass Investitionskosten nur eine untergeordnete Rolle spielen, und auch frühere staatliche Investitionen zur Förderung und Entwicklung der Kernenergie nicht berücksichtigt sind; allerdings würden letztere nur etwa 0,2 cent/kWh [13] ausmachen. Die Berücksichtigung der über die Lebensdauer gemittelten Investitionskosten würde das Ergebnis für die Kernenergie belasten, aber der Anstieg bei den (normalisierten) Kosten würde die Rangfolge nicht ändern. Die Sonnenenergie (Photovoltaik) weist die mit Abstand höchsten internen Kosten und Gesamtkosten auf, aber geringe externe Kosten. Abschließend ist erneut darauf hinzuweisen, dass die vorhergehende Darstellung eine Bewertung der derzeit in Betrieb befindlichen Anlagen darstellt, jedoch, vor allem aufgrund der genannten Einschränkungen hinsichtlich der Kernenergie, nicht als alleinige Basis für eine Entscheidung über zukünftige Energietechnologien herangezogen werden kann.

4.2 Aggregation anhand der Multi-kriteriellen Entscheidungsanalyse

Die in [1] eingesetzte Multi-kriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA) erlaubt es, die wesentlichen Ergebnisse der Analyse des wirtschaftlichen und des ökologischen Bereichs mit den gesellschaftlichen Präferenzen der Benutzer auf einem aggregierten Niveau zusammenzuführen. Die technologiespezifischen Indikatoren stellen die analytischen Eingangsgrößen der Bewertung dar.

Der für die Bewertung verwendete Ansatz beruht auf einer einfachen Gewichtungsfunktion vielfacher Merkmale. Die Gewichtungen geben die relative Bedeutung der verschiedenen Bewertungskriterien wieder und werden mit den normalisierten Indikatorwerten („Ergebnisse“) kombiniert. Die Normalisierung wird unter Benutzung einer linearen lokalen Skala, die durch den Satz der betrachteten Optionen definiert ist, durchgeführt. Zum Beispiel wird derjenigen Option, die für ein bestimmtes Kriterium am besten abschneidet, ein Wert von 100 zugewiesen und derjenigen, die am schlechtesten abschneidet ein Wert von 0; allen anderen Optionen werden dazwischen liegende Werte zugeordnet, die sich aufgrund ihrer Ergebnisse im Vergleich zu diesen beiden Endpunkten ergeben. Das bedeutet, dass die absoluten Zahlen derjenigen Technologien, die die Endpunkte repräsentieren, ihren zugewiesenen Wert nicht beeinflussen. So wird z. B. der Steinkohle ein Wert von 0 hinsichtlich des Gesamtabfalls zugeordnet, unabhängig davon ob die Zahl 180 oder vielleicht 500 Tonnen/GWh beträgt, solange diese Zahl die größte für die betrachteten Optionen ist. Für jede Option wird dann durch die Summierung der gewichteten Ergebnisse jedes Kriteriums ein einziger Gesamtwert ermittelt. Auf der Basis dieser Gesamtwerte wird die Rangfolge der verfügbaren Optionen festgelegt. Eine Konsistenzprüfung ist sicherlich erforderlich, war aber nicht Teil der PSI-Untersuchung. Schließlich ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die Gesamtwerte für eine spezifische Technologie nur eine Bedeutung beinhalten, die dazu dient, die Rangfolge der jeweiligen Technologie im Vergleich zu den anderen Optionen festzulegen.

Die Gewichtungen können durch die beteiligten Personen („stakeholder“) festgelegt werden. Alternativ können verschiedene Gewichtungsverteilungen zugeordnet werden, um die in der Energiedebatte auftretenden unterschiedlichen Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Der Einsatz dieser unterschiedlichen Gewichtungsverteilungen, auch als Sensitivitätsabbild bezeichnet, ist in der PSI-Untersuchung auf der Ebene der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit durchgeführt worden. Zusätzlich, wie in der folgenden Tabelle ausgewiesen, mussten auch Gewichtungen auf den darunterliegenden Ebenen der Auswirkungsbereiche und der Indikatoren zugeordnet werden; dies wurde vom PSI unter Berücksichtigung der Prioritäten in der Energiepolitik durchgeführt. Diese Gewichtungsverteilungen

stehen zur Diskussion, da verschiedene beteiligte Personen andere Gewichtungsverteilungen favorisieren könnten. So mag z. B. die in der Tabelle ausgewiesene, deutlich höhere Gewichtung der „Auswirkungen auf die Gesundheit (Normalbetrieb)“ gegenüber der „Risiko-Aversion“ insbesondere singular für die Kernenergie erstaunlich sein; wie aber auch im folgenden noch ausgewiesen wird, ist die Empfindlichkeit gegenüber moderaten Gewichtungsänderungen auf dieser Ebene eher gering.

Dimension	Auswirkungsbereich (Gewichtung)	Indikator (Gewichtung)
Wirtschaftlichkeit	Finanzielle Anforderungen (70)	Produktionskosten (75)
		Anfälligkeit für Preiserhöhung des Rohstoffs (25)
	Ressourcen (30)	Verfügbarkeit (Lastfaktor) (40)
		Geopolitische Faktoren (15)
		Langzeit-Nachhaltigkeit: Energetisch (15)
		Langzeit-Nachhaltigkeit: Nicht-energetisch (10)
Lastfolge-Verhalten (20)		
Umwelt	Globale Erwärmung	CO ₂ -Äquivalent (40)
	Regionale Umwelteinflüsse	Veränderung ungeschützter Öko-Systeme (25)
	Schadstoff-unabhängige Auswirkungen	Landverbrauch (5)
	Schwere Unfälle	Kollektives Risiko (15)
	Gesamtabfall	Gewicht (15)
Gesellschaft	Beschäftigung	Technologiespezifische Arbeitsmöglichkeiten (10)
	Proliferation	Potential (5)
	Auswirkungen auf die Gesundheit (Normalbetrieb)	Sterblichkeit (reduzierte Lebenserwartung) (40)
	Lokale Störungen	Lärm, visuelle Effekte (15)
	Einschluss des kritischen Abfalls	„Notwendige“ Einschlusszeit (15)
	Risiko-Aversion	Maximale Konsequenzen eines potentiellen Unfalls (15)

Gewichtungen der Auswirkungsbereiche und Indikatoren für MCDA

In einem der Bewertungsfälle ist nur eine Teilmenge der Kriterien berücksichtigt worden, d. h. neben den Umwelt-Kriterien die in der gesellschaftlichen Dimension enthaltene Gesundheitskomponente und die Produktionskosten. Dieser Fall hat einige Parallelen zu der Bewertung anhand der Gesamtkosten. Die Rangordnung aufgrund dieser beiden Methoden zeigt gewisse Gemeinsamkeiten (allerdings keine exakten Übereinstimmungen): die Kernenergie schneidet am besten und die Sonnenenergie am schlechtesten ab.

Falls der gesamte Kriteriensatz zusammen mit gleichen Gewichtungen der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (Wirtschaftlichkeit, Umwelt, Gesellschaft) verwendet wird, und somit dem Konzept Rechnung getragen wird, dass Nachhaltigkeit prinzipiell allen Dimensionen die gleiche Bedeutung zuordnen sollte, ändern sich die Ergebnisse (siehe folgende Abbildung).



MCDA-basierte Reihenfolge bei Verwendung aller Kriterien und gleicher Gewichtungen für die drei Haupt-Dimensionen der Nachhaltigkeit (je höher der Wert, desto besser die Gesamtleistung dieses Systems)

Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse sehr empfindlich auf eine Veränderung der Gewichtungen auf der höchsten Ebene (drei Haupt-Dimensionen) reagieren. Obwohl die Gewichtungen, die auf unteren Ebenen der Kriterien (Auswirkungsbereiche, Indikatoren, siehe die vorhergehende Tabelle) zugeordnet werden, in vielen Fällen als willkürlich betrachtet werden können, bleibt die Rangordnung der Systeme bei einer eher geringen Veränderung dieser Werte vergleichsweise stabil. Schließlich ist es wichtig, erneut darauf hinzuweisen, dass den absoluten Werten der obigen Abbildung lediglich eine Bedeutung für die Festlegung der relativen Rangfolge der einzelnen Technologien zukommt. Der obigen Abbildung mag es etwas an Überzeugungskraft fehlen, da sich die Ergebnisse auf Punktwerte beschränken und die Angabe von Streubreiten nicht möglich ist, aber das sollte in diesem Zusammenhang nicht überbewertet werden.

Bei gleichen Gewichtungen auf der höchsten Ebene weisen Wasserkraft und Windenergie das beste Ergebnis auf, gefolgt von der Kernenergie und Erdgas. Als Folge der Berücksichtigung der gesellschaftlichen Kriterien weist die Kernenergie einen schlechteren Rang auf, als bei der Betrachtung „Gesamtkosten“, einschließlich der „Umwelt-Kriterien plus Gesundheit plus Produktionskosten“.

Es wurden einige Sensitivitäts-Untersuchungen durchgeführt, die, in Abhängigkeit der wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Kriterien, bestimmte Muster aufzeigen. Diese Ergebnisse werden in den Schlussfolgerungen genannt.

Zusätzlich wurde der mögliche Einfluss kerntechnikspezifischer Weiterentwicklungen untersucht. Diese zielen auf eine erhebliche konstruktionsbedingte Begrenzung der Konsequenzen eines potentiellen nuklearen Unfalls zusammen mit einer massiven Reduzierung der notwendigen Einschusszeiten des radioaktiven Abfalls auf einen geschichtlich überschaubaren Zeitbereich. In der MCDA-basierten Nachhaltigkeitsbewertung nimmt die Kernenergie dann in der Rangordnung zusammen mit der Wasserkraft den Spitzenplatz ein. Diese Empfindlichkeitsuntersuchung wird vor allem deshalb erwähnt, weil sie die positiven Auswirkungen der derzeit verfolgten umfangreichen Weiterentwicklungen im Bereich der kerntechnischen Sicherheit und der Abfallentsorgung aufzeigt. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass auch für andere Technologien Weiterentwicklungen möglich sind, obwohl zum jetzigen Zeitpunkt keine ähnlich entscheidenden Auswirkungen wie bei der Kernenergie erkennbar sind. Hinsichtlich der Informationen über systematische Untersuchungen zu den Auswirkungen von evolutionären Entwicklungen der Stromerzeugungstechnologien und der zugehörigen Energiekreisläufe auf die Umweltbelastungen verweist die ILK auf [1].

5 Schlussfolgerungen

5.1 Die Rolle der Nachhaltigkeit und die Bewertungsmethode

- Die ILK ist der Meinung, dass Nachhaltigkeitsbetrachtungen die politischen Entscheidungen zu Energieversorgungsoptionen und zugehörigen technischen Entwicklungen abstützen sollten.
- Nach Ansicht der ILK muss der Bewertungsprozess transparent und unvoreingenommen sein. Sehr vielversprechend ist in diesem Zusammenhang der Einsatz konsistenter und soweit möglich objektiver, quantitativer, technologie-spezifischer Indikatoren, wobei die zugehörigen Unsicherheiten nicht vernachlässigt werden sollten.
- Die ILK unterbreitet einen Vorschlag für eine geeignete Bewertungsmethode, die bereits auf die wesentlichen Energiekreisläufe zur Stromerzeugung in Deutschland angewendet wurde. Dies sollte für die in Deutschland notwendige energiepolitische Diskussion hilfreich sein.

5.2 Eigenschaften bestimmter Optionen

- Die fossilen Systeme unterliegen begrenzten Energieressourcen und weisen vergleichsweise ungünstige ökologische Eigenschaften und Unfallrisiken auf. Bei den fossilen Energieträgern schneidet Erdgas mit Abstand am besten ab.
- Unter den deutschen Rahmenbedingungen weist die Kernenergie ausgezeichnete Eigenschaften hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, aber auch in Bezug auf Umwelt- und Gesundheitsaspekte auf. Weiterhin hat sie in der westlichen Welt auch eine exzellente Sicherheitsbilanz, die sich in geringen Werten des kollektiven Risikos niederschlägt. Die schwierigen Punkte für die Kernenergie sind die Risiko-Aversion und die Probleme, die im Zusammenhang mit der Notwendigkeit einer sicheren Lagerung relativ geringer Mengen radioaktiver Abfälle über einen extrem langen Zeitraum wahrgenommen werden.
- Die „neuen“ erneuerbaren Energien (Sonnen- und Windenergie) sind hinsichtlich der Einwirkungen auf die Umgebung in aller Regel vorteilhafter als fossile Energieträger, aber sie verbrauchen große Mengen nicht-energetischer Materialressourcen und ihre Kosten sind hoch. In der Gesamtleistung („overall performance“) schneidet bei der im Beispiel verwendeten Gewichtung die Windenergie sehr günstig ab; die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der

Sonnenenergie(Photovoltaik)-Systeme ist hingegen unter den deutschen Klimabedingungen sehr gering. Aus dem Blickwinkel der Versorgungssicherheit können diese erneuerbaren Energien nur einen begrenzten Anteil zur gesamten Energieversorgung beitragen.

5.3 Gesamtbewertung der Nachhaltigkeit

- Ausgehend von den vorgestellten Ergebnissen zieht die ILK den Schluss, dass Bewertungen, die eine Vielzahl von Nachhaltigkeitskriterien verwenden, ein differenzierteres Bild der Vor- und Nachteile der gegenwärtig verfügbaren Stromversorgungsoptionen liefern. Kein System weist dabei für alle Kriterien das beste Ergebnis auf. Viele Indikatoren, die die Kernenergie charakterisieren, stellen sich vorteilhaft dar.
- Nach Meinung der ILK sind relative Aussagen zur Nachhaltigkeit der Stromversorgungsoptionen von vorrangiger Bedeutung. Eine vergleichende Bewertung der Nachhaltigkeit kann durch die Aggregation von Indikatoren durchgeführt werden, unter Einsatz des Gesamtkosten-Ansatzes oder der Multi-kriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA).
- Die Kohle- und Ölkreisläufe weisen die höchsten normalisierten externen Kosten auf, insbesondere wegen ihrer Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die globale Erwärmung. Die mit Erdgas verbundenen externen Kosten sind die geringsten bei den fossilen Kreisläufen, d. h. von der gleichen Größenordnung wie bei der Sonnenenergie (Photovoltaik). Der kerntechnische Energiekreislauf besitzt die niedrigsten quantifizierbaren externen Kosten, gefolgt von Windenergie und Wasserkraft. Bei der Betrachtung der normalisierten Gesamtkosten weist die Kernenergie unter den deutschen Bedingungen ebenfalls die beste Leistung auf und ist somit besser als die anderen gegenwärtig eingesetzten Technologien. Insbesondere die Sonnenenergie (Photovoltaik) ist derzeit durch die hohen Produktionskosten für Solarzellen belastet.
- Die ILK ist der Ansicht, dass neben den Gesamtkosten die gesellschaftliche Dimension bei Aussagen zur Nachhaltigkeit berücksichtigt werden sollte, denn sie spielt eine entscheidende Rolle bei den Entscheidungsprozessen, ohne in den Kosten als einzigem aggregiertem Wert hinreichend widerspiegelt zu werden. Betrachtet man die Kernenergie als Beispiel, so tragen strittige Punkte wie die langlebigen hochradioaktiven Abfälle, seltene schwere Unfälle oder die Möglichkeit der Proliferation, nur marginal oder gar nicht zu den externen

Kosten bei. Gleichzeitig sind diese Aspekte aber sehr kontrovers und können, je nach gesellschaftspolitischer Perspektive der Beteiligten, von großer Bedeutung für den Entscheidungsfindungsprozess sein.

- Die ILK hält das Abwägen zwischen den Nachhaltigkeits-Komponenten Umwelt, Wirtschaftlichkeit und Gesellschaft für unausweichlich. Diese Komponenten sind empfindlich gegenüber Werturteilen. Dadurch, dass diese Werturteile explizit gemacht werden, wird die vorgeschlagene Methodik hoffentlich eine Debatte zu spezifischen Aspekten fördern und zum Prozess der Konsensbildung beitragen. Werden für die MCDA Kriterien verwendet, die vergleichbar dem Ansatz einer Gesamtkostenbewertung eingeschränkt sind, d. h. eine gleiche Gewichtung der Gesundheits- und Umwelteinflüsse und der Produktionskosten, so werden weitgehend vergleichbare Rangordnungen der Technologien erreicht. Eine Rangordnung, die auf allen drei Säulen der Nachhaltigkeit beruht, ist vergleichsweise robust, wenn diese Säulen gleichgewichtet werden und nur die Gewichtung der Kriterien der darunter liegenden Ebenen (z. B. notwendige Finanzmittel oder Beschäftigungseffekte) verändert wird. Eine höhere Gewichtung der Wirtschaftlichkeit benachteiligt die erneuerbaren Energien, ein Vorrang der Umwelt benachteiligt die fossilen Systeme und die Betonung der gesellschaftlichen Aspekte benachteiligt die Kernenergie.
- Weiterentwicklungen hin zu einer verstärkten Begrenzung der Konsequenzen hypothetischer Unfälle zusammen mit einer drastischen Reduzierung der notwendigen Einschlusszeiten für Abfälle, vorgeschlagen durch [11] und [14], werden einen positiven Einfluss auf die MCDA-basierte Rangordnung der Kernenergie haben.

5.4 Weitere Schritte

- Die Aufgabe, Energieversorgungstechnologien unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit zu bewerten, ist sehr komplex. Die ILK ist der Ansicht, dass dieses Problem sicher nicht allein durch die Anwendung mathematischer Methoden gelöst werden kann, da diese die bedeutsamen gesellschaftlichen Themen und die großen inhärenten Unsicherheiten nicht abdecken können. Die ILK ist jedoch der Meinung, dass Bewertungen, wie die hier vorgestellte, eine hilfreiche Basis für eine gesellschaftliche Diskussion bilden können, in der die spezifischen Meinungsdivergenzen identifiziert und ihre Auswirkungen auf den Entscheidungsprozess bewertet werden können. Eine derartig strukturierte Debatte kann einen sehr bedeutsamen Schritt hin zur einer Konsensbildung darstellen.

- Die in dieser ILK-Stellungnahme vorgestellte Bewertung ist eingeschränkt, betrachtet vorrangig die derzeitigen Technologien, und ist eher als Machbarkeitsstudie denn als abschließende Untersuchung anzusehen. Es besteht aber die Hoffnung, dass diese Studie einen Beitrag dazu leisten kann, eine weitergehende Diskussion dieser Themen anzuregen. Diese Diskussion sollte zu einer Beteiligung der wesentlichen betroffenen Personen („stakeholder“) und zu einer Verfeinerung der Analysemethoden führen sowie zu verstärkter Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet. Die ILK befürwortet nachdrücklich eine derartige Debatte und eine Anwendung entsprechender Methoden zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Szenarien für die deutsche Stromversorgung auf Landes- und auf Bundesebene.



Literatur

- [1] 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.
- [2] Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, "Unsere gemeinsame Zukunft" (auch bekannt als Brundtland-Bericht), New York, 1987
- [3] UN, "Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies". United Nations, Commission on Sustainable Development. New York, 2001.
- [4] OECD/NEA, "Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective". Paris, 2000.
- [5] OECD/NEA, "NDC: Indicators of Sustainable Development in the Nuclear Energy Sector - A Preliminary Approach". NEA/NDC(2002)5, Paris, April 2002.
- [6] IAEA, "Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles". Report of Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). Technical Document, IAEA-TECDOC-1362, Wien, Juni 2003.
- [7] Enquête Kommission, "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung". Abschlussbericht, Berlin, Juli 2002.
- [8] Energie-Spiegel: "Facts für die Energiepolitik von Morgen". Nr. 3, Paul Scherrer Institut, Würenlingen und Villigen, 2000.
- [9] Hirschberg S., Dones R., und Gantner U. , "Use of External Cost Assessment and Multi-criteria Decision Analysis for Comparative Evaluation of Options for Electricity". In S. Kondo, K. Furuta (Eds.), Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 5), Osaka, Japan, pp. 289-296 (2000).
- [10] European Commission (1998), "ExternE - Externalities of Energy". ExternE Final Report, Brüssel, 1998.

- [11] ILK, "ILK-Stellungnahme zur Sicherheit der Kernenergienutzung in Deutschland" ILK-03 D, Augsburg, 2000
- [12] Voss A., "Sustainable Energy Supply – Specification of Guiding Principles" (in deutsch). Proceedings of VDI Conference on Energy and Sustainable Development: Contributions to Future Energy Supply, VDI, Düsseldorf, pp. 122-140, 2000.
- [13] Jäger, G. und Weis, M., "Forschungsförderung Kernenergie 1956 bis 2002: Anschubfinanzierung oder Subvention", atw, 49(1), pp. 8 – 10, 2004
- [14] ILK, "ILK-Stellungnahme zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente" ILK-07 D, Augsburg, 2001

1. **Prof. Dr. George Apostolakis, USA**
Professor für Kerntechnik und Techniksysteme 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
Inhaber des Lehrstuhls für Reaktordynamik und Reaktorsicherheit der Technischen Universität München
3. **Frau Annick Carnino, Frankreich**
Ehemalige Direktorin des Bereichs Sicherheit Kerntechnischer Einrichtungen bei der IAEA
4. **Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. techn. h.c. Josef Eibl, Deutschland**
Ehemaliger Leiter des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe
5. **Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Dieter Fischer, Deutschland**
Inhaber des Lehrstuhls für Nachrichtentechnik der Ruhr-Universität Bochum
6. **Ing. Bo Gustafsson, Schweden**
Ehemaliger Geschäftsführer von SKB International Consultants AB, die 2001 als internationale Tochter von SKB gegründet wurde
7. **Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker, Deutschland**
Ehemaliger Professor für Allgemeine Psychologie an der Technischen Universität Dresden
8. **Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kröger, Schweiz**
Inhaber des Lehrstuhls für Sicherheitstechnik an der ETH Zürich
9. **Dr.-Ing. Erwin Lindauer, Deutschland** (stellvertretender Vorsitzender der ILK)
Geschäftsführer der GfS Gesellschaft für Simulatorschulung mbH
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

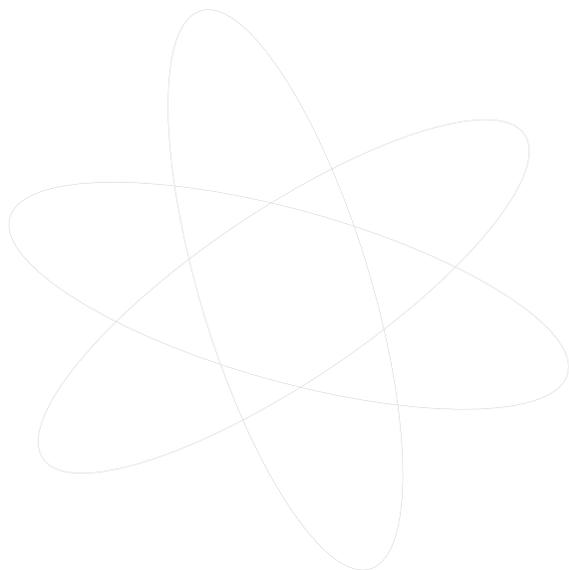
Direktor der Staatlichen Materialprüfungsanstalt, Universität Stuttgart

12. 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-Veröffentlichungen:**

- 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)
- 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