



5 Bewertungskriterien für ein «nachhaltiges Elektrizitätssystem der Schweiz»

Autoren

Paul Burger, Universität Basel; Stefan Hirschberg, Paul Scherrer Institut; Heinz Gutscher, Universität Zürich

Obwohl dieses Kapitel sich von den Kapiteln 2 bis 4 darin unterscheidet, dass die einzelnen Teile nicht auf Vorarbeiten einer grösseren Gruppe von Experten und Expertinnen basieren, sondern von den drei genannten Autoren stammen, ist es Ergebnis intensiver Diskussionen und Feedbacks.

Als in den 1960er- und 1970er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts das in den Grundzügen bis heute bestehende Elektrizitätssystem der Schweiz etabliert wurde, standen für dieses zwei Ziele im Vordergrund: Es sollte möglichst billigen Strom für eine wachsende Wirtschaft und für eine wachsende Bevölkerung auf wirtschaftlich effiziente Weise zur Verfügung stellen und es sollte eine sichere Versorgung gewährleisten. Die vorgängigen Kapitel haben deutlich gemacht, dass das heute bestehende Elektrizitätssystem vor grossen Herausforderungen steht und dass ein beträchtlicher Investitions- und Innovationsbedarf besteht. Dabei stellt sich angesichts der Langfristigkeit von Infrastrukturentscheidungen die Frage, welchen Zielen die Transformation des Elektrizitätssystems mit Blick auf den hier verfolgten Zeithorizont bis 2050 genügen soll.

Das Zielsystem aus der Mitte des letzten Jahrhunderts genügt den Ansprüchen aus verschiedenen Gründen nicht mehr. Schon seit längerer Zeit sind neben der Wirtschaftlichkeit und der Versorgungssicherheit zusätzlich Umweltfaktoren wie Schad-

stoffe oder Landschaftsschutz hinzugekommen. Mit Kohle lässt sich heute z. B. billig und auf Grund der geltenden Rahmenbedingungen wirtschaftlich effizient Strom produzieren; die damit einhergehenden CO₂-Emissionen sprechen aber gegen diese Produktionsart, zumindest solange das CO₂ nicht abgeschieden und sicher entsorgt werden kann. Angesichts der Langfristigkeit von Umwelttrisiken – Klimawandel, Fragilität der ökologischen Systeme, Wasserknappheiten, Ressourcenknappheiten – müssen Umweltfaktoren heute in einem Zielsystem für die künftige Stromversorgung unbedingt berücksichtigt werden.

Zudem kann es auch nicht mehr einfach darum gehen, einen Bedarf allgemein zu bedienen, da sich sowohl aus Effizienz- als auch aus Suffizienzüberlegungen die Frage nach der Legitimität (Verantwortlichkeit) des Verbrauchs von Elektrizität stellt. Schliesslich ist die Entwicklung des Elektrizitätssystems sowohl in den europäischen Kontext als auch in den Kontext der Entwicklung des Energiesystems insgesamt (z. B. Tendenzen bezüglich Erdöl) zu stellen.

Diese Faktoren bedeuten nicht, dass die Kriterien «möglichst billig» (resp. «wirtschaftlich effizient») und «sichere Versorgung» nicht mehr länger zum Zielsystem eines künftigen Elektrizitätssystems der Schweiz gehören sollen. Die genannten Aspekte machen aber deutlich, dass das gesuchte Zielsystem durch weitere substanzielle Kriterien zu ergänzen ist.

Als Rahmen für derartige Ergänzungen stehen zwei Optionen im Vordergrund: die Orientierung an einem Schlüsselindikator, der insbesondere die grundlegenden Umweltaspekte berücksichtigt, oder aber die Orientierung an dem seit der Konferenz von Rio 1992 international anerkannten Leitbild der Nachhaltigkeit (resp. der nachhaltigen Entwicklung). Als Schlüsselindikator käme z.B. der CO₂-Ausstoss in Frage oder eine durchschnittliche (Primärenergieverbrauch orientierte) Verbrauchsgrösse, wie das bei der bekannten Formel der 2000-Watt-Gesellschaft der Fall ist. Auf den CO₂-Ausstoss zielt die Idee der 1-Tonnen-CO₂-Gesellschaft ab. Dieser zu Folge soll das Energiesystem so transformiert werden, dass neben den Kriterien «wirtschaftlich effizient» und «sichere Versorgung» auch noch das Ziel hinzukommt, die Schweiz dürfe höchstens 1 t CO₂ pro Kopf und Jahr verbrauchen. Dieses Ziel sollte für 2100 erreicht werden, für 2050 wäre das Ziel 2 t CO₂.

Das Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung ist demgegenüber weiter gefasst. Nachhaltigkeit berücksichtigt nicht nur Umweltfaktoren wie CO₂, sondern auch soziale und institutionelle Aspekte. Die Schweiz (Bundesverfassung Art. 73; Nachhaltigkeitsstrategie des Bundes) sowie die EU (EU-Strategie 2001, Energiepolitik 2007) haben sich grundsätzlich auf das Ziel der Nachhaltigkeit verpflichtet, und in vielen Bereichen ist heute die Orientierung an Nachhaltigkeit zu einem Standard geworden (z.B. GRI-Reporting in der Wirtschaft). Da «nachhaltige Entwicklung» zusätzlich gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt, hat sich der Steuerungsausschuss entschlossen, sich am Leitbild der Nachhaltigkeit zu orientieren.

Dieses Leitbild gibt nun zwar einen allgemeinen Rahmen vor, wirft aber auch einige Fragen auf,

wenn es um konkrete Kriterien geht, die als Richtschnur für Ziel- resp. Bewertungssysteme dienen sollen. Erstens stellt sich die Frage, in welcher Hinsicht mit der Verpflichtung auf Nachhaltigkeit wissenschaftlich fundierte Zielbestimmungen erwachsen, die eindeutige Urteile über die Ausrichtung des neuen Systems erlauben. Daran anschliessend stellt sich zweitens die Frage, ob wir über wissenschaftlich fundierte Bewertungssysteme verfügen, mit denen hinreichend eindeutig Vor- und Nachteile der verschiedenen Optionen evaluiert werden können, so dass daraus zweifelsfreie Politikempfehlungen erwachsen.

Dieses Kapitel argumentiert einerseits dafür, dass beide Erwartungen in dieser starken Form (eindeutiges Zielsystem, Entscheidungen determinierendes Bewertungssystem) nicht erfüllbar sind. Es demonstriert aber andererseits auch, dass die Nichterfüllung dieser hohen Erwartung nicht gleichbedeutend damit ist, dass wir keine gut fundierten Nachhaltigkeits- bzw. Bewertungskriterien haben. Alle Bewertungssysteme basieren zwar auf Prämissen und Methoden, und ihre Aussagekraft ist immer von diesen abhängig. Dennoch lassen sich solche Ziel- und Bewertungssysteme vergleichen und analysieren. Nachhaltigkeitsbewertungen vermögen Entscheidungen nicht auszulösen bzw. gar zu determinieren, aber sie können Grundlagen für rationale Entscheide liefern.

Im Folgenden geht es in Kapitel 5.1 zunächst um die allgemeinen Grundlagen von Nachhaltigkeitsbewertungen (mit Blick auf das Elektrizitätssystem der Schweiz). Drei Aspekte werden angesprochen: die Bedeutung von Unsicherheit, die verschiedenen Bausteine, die für Bewertungen erforderlich sind, und die verschiedenen Varianten für Zielbestimmungen. Mit Kapitel 5.1 soll auf der einen Seite ein Boden für das in Kapitel 6 zugrunde gelegte Zielsystem gelegt werden. Zum anderen soll dieses Kapitel auch verständlich machen, weshalb unterschiedliche Bewertungen gerade in Bezug auf ein «nachhaltiges Elektrizitätssystem» vorgenommen werden können. Es soll mit anderen Worten Gründe für die Diversität von begründeten (!) Auffassungen verständlich machen. Schliesslich soll es auch in

Erinnerung rufen, dass es nicht Aufgabe der Wissenschaft sein kann, der Gesellschaft Ziele vorzugeben.

Kapitel 5.2 stellt einen durch das PSI entwickelten und im Kontext des europäischen NEEDS-Projekts angewandten Ansatz vor. Dieser fokussiert auf die Bewertung der verschiedenen Technologien, die für die Produktion von Elektrizität zur Verfügung stehen, und verwendet Methoden wie Lebenszyklusanalysen (LCA), Umwelteinfluss-Assessment, Kostenrechnungen oder Multikriterien-Entscheidungsanalysen (MCDA). Dieser Ansatz enthält selbst kein Zielsystem, sondern soll unter Berücksichtigung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten einen Vergleich der verschiedenen Technologien ermöglichen, die heute für die Produktion von Elektrizität zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse dieses Indikatoren-gestützten Ansatzes können zu verschiedenen Zielsystemen in Beziehung gesetzt werden.

Die beiden Kapitel 5.1 und 5.2 thematisieren wissenschaftliche Grundlagen für rationale, d.h. informierte Entscheidungen. Allerdings wissen wir, dass «rational» ein Ideal ist und Entscheidungen gerade mit Blick auf das Management von Risiken nicht allein nach komplexen Kriterien der Informiertheit getroffen werden. Kapitel 5.3 thematisiert daher die Unterschiede zwischen der erfahrungsbasierten und der analytischen Informationsverarbeitung und deren Konsequenzen für Entscheidungsfindungen.

5.1 Nachhaltigkeitsbewertung: Leistungen, Grundlagen & Kriterien

Bewertungen haben die grundsätzliche Funktion, Informationen über eine bestimmte Situation in Relation zu einem bestimmten Zielzustand (etwas Gewünschtes oder gar Gesolltes) zu vermitteln. Mit Handlungen verfolgen wir bestimmte Ziele, und die Bewertungen geben uns Auskunft darüber, wie günstig oder ungünstig die jetzige Situation oder mögliche Handlungsfolgen mit Blick auf diese Ziele sind. Wenn wir sagen, dass wir uns in einer Rezession befinden, dann ist das eine Bewertung des wirtschaftlichen Zustands, basierend auf der Annahme, dass wirtschaftswissenschaftlichen

Standardauffassungen zufolge Wirtschaftswachstum der Sollzustand ist. Eine derartige Bewertung informiert uns, dass wir womöglich gewisse Handlungen tätigen sollten, z.B. die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen verändern.

Bei Nachhaltigkeitsbewertungen interessiert das Hier und Jetzt allerdings nur in zweiter Linie. Wichtig bei Nachhaltigkeitsbewertungen ist der Blick in die Zukunft. Wir möchten a) wissen, in welche Richtung sich etwas längerfristig bewegen könnte (z.B. Entwicklung der CO₂-Emissionen) und wie günstig oder ungünstig dies mit Blick auf die Nachhaltigkeit ist. Und wir wollen b) wissen, wie günstig oder ungünstig die Konsequenzen unserer Entscheidungen in der Zukunft sein werden, d.h. ob sie in die für nachhaltige Entwicklung angenommene Richtung zielen (z.B. substanziell weniger Ressourcenverbrauch). Nachhaltigkeitsbewertungen sollen uns also erlauben, unsere Entscheidungen mit Blick auf die langfristigen Konsequenzen zu fällen.

Diese Zukunftsausrichtung ist ein grundlegendes Merkmal des Diskurses um Nachhaltigkeit. Die überragende Bedeutung einer langfristig orientierten Zukunftsperspektive ist eine Folge des Problemhintergrunds, der für die World Commission on Environment and Development (WCED) bei der Ausarbeitung ihres Leitbilds «Nachhaltigkeit» entscheidend war (Brundtland-Bericht). Vor dem Hintergrund zunehmend knapper werdender ökologischen Ressourcen und fragiler Ökosysteme sind die menschlichen Entwicklungsstrategien mit erheblichen Risiken behaftet. Was heute die Lebensbedingungen der Menschen verbessert, kann übermorgen erhebliche negative Auswirkungen eben auf diese Lebensbedingungen haben. Der Klimawandel ist das vielleicht prominenteste Beispiel für derartige Risiken. Nachhaltige Entwicklung ist die von der Brundtland-Kommission vorgeschlagene Antwort auf diese von uns selbst hervorgebrachten Risiken. Allerdings geht es nicht allein um Umweltrisiken, sondern generell um Risiken, durch deren Eintreten künftige Generationen um die Möglichkeit gebracht werden könnten, ihre Vorstellungen von Lebensqualität zu verwirklichen. Selbstverantwortung, Dynamik und Offenheit einer freiheitlichen

Gesellschaft sind zudem integrale Bestandteile einer Nachhaltigen Entwicklung.

Für Nachhaltigkeitsbewertungen, die informierte Entscheidungen ermöglichen sollen, hat dieser Zeithorizont sowie die Berücksichtigung von Offenheit und Selbstverantwortung künftiger Generationen erhebliche Folgen: Die erste Folge besteht darin, dass wir immer unter Unsicherheiten operieren (vgl. Abschnitt 5.1.1). Die zweite besteht darin, dass wir mit Blick auf die hier zur Diskussion stehende Komplexität unterschiedliche Bausteine für die Konstruktion von Bewertungssystemen berücksichtigen müssen, wobei diese Bausteine unterschiedliche Optionen zulassen (vgl. Abschnitt 5.1.2). Drittens schliesslich ist gerade aus Sicht der Wissenschaften höchst unklar, ob und in welcher Weise Nachhaltigkeitsziele eindeutig festgelegt werden können. Tatsächlich gibt es dazu unterschiedliche Optionen (vgl. Abschnitt 5.1.3).

5.1.1 Entscheidungen unter Unsicherheit

Der Blick der vorliegenden Stellungnahme der Akademien Schweiz ist auf das Jahr 2050 gerichtet. Entscheidungen mit Blick auf einen Zeithorizont von 40 Jahren sind grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet. Die in den Kapiteln 2 bis 4 diskutierten Aspekte bringen die Komplexität des Elektrizitätssystems deutlich zum Ausdruck. Es handelt sich um ein dynamisches System mit vielfältigen Rückkopplungsmechanismen. Zu diesen gehören beispielsweise gesellschaftliche Reaktionen und Technologieentwicklungen, Marktmechanismen, politische Steuerungsinstrumente, die internationale Vernetzung, individuelles Verhalten etc. Wer vor diesem Hintergrund davon ausgeht, dass im Jahre 2050 die Individuen noch genauso mit Elektrizität umgehen werden wie heute, geht demnach bei den heutigen Entscheidungen von der Annahme aus, dass keine sozio-kulturellen Lernprozesse stattfinden werden. Das ist genauso unplausibel wie die umgekehrte Annahme, dass sich bis 2050 suffiziente Lebensstile weitgehend durchgesetzt haben werden. Welche Lernprozesse tatsächlich stattfinden werden ist, lässt sich kaum voraussagen, zumal diese ja freiheitlich vollzogen werden sollen.

Gerade in Bezug auf die Lernprozesse wird die für die Nachhaltigkeitsthematik fundamentale Klammer der Unsicherheiten deutlich. Wir dürfen zwar zusätzlich zu Verhaltensänderungen Lernprozesse in folgenden Bereichen erwarten: Technologien zur Elektrizitätsproduktion, Netztechnologien, Effizienzsteigerung für Haushalte und Wirtschaft, internationale Abkommen (europäische Vernetzung, CO₂-Abkommen), Steuerungsinstrumente sowie Internalisierung von externen Kosten. Aber wir können heute nicht genau sagen, worin diese Lernprozesse bestehen werden. Sie können iterativ sein wie z.B. eine kontinuierliche Verbesserung der Photovoltaik. Sie könnten aber auch revolutionäre Schritte beinhalten, welche die Ausgangslage schlagartig verändern. Weder wissen wir, worin das follow-up des follow-up besteht, noch können wir vorweg revolutionäre Durchbrüche identifizieren. Wir können auch nicht die wechselseitigen Interaktionen der künftigen Lernprozesse bestimmen. Auch das oft in Anspruch genommene Vorsorgeprinzip hilft hier nicht viel weiter. Dieses fordert nämlich nicht einen Verzicht auf Risiken, sondern verlangt «nur» einen vertretbaren Umgang mit Risiken. Es gilt Risiken zu vermeiden, deren Eintreten zum Schaden Y führen, und es gilt zu vermeiden, dass ein Schaden Z entsteht, weil ein bestimmtes Risiko nicht in Kauf genommen wurde.

Eine Nachhaltigkeitsbewertung wird somit schon deswegen eine Entscheidung immer nur informieren, nicht aber determinieren können, weil es um ein komplexes dynamisches System mit Rückkopplungen und einem Zukunftshorizont geht. Die Nachhaltigkeitsbewertung selbst unterliegt dem Kriterium der Unsicherheit. Eine Entscheidung könnte nur dann durch eine Bewertung determiniert werden, wenn a) die Ziele eindeutig identifiziert werden können und b) vollständige Informationen über die Wirkung von Massnahmen vorliegen. Weder a) noch b) sind realisierbar. Eine Nachhaltigkeitsbewertung kann allerdings Eckpunkte setzen, innerhalb denen Entscheidungen als rational gelten können. Ohne zusätzliche gesellschaftliche Aushandlungen über die konkreten Ziele wird es aber nicht gehen. Die von der Politik verlangten «Ge-

wissheiten» können durch eine Nachhaltigkeitsbewertung nicht beigebracht werden.

In einem Punkt lässt sich aber dennoch eine klare Aussage machen:

Grundsatz der Vermeidung von Lernprozessen verändernden Pfadabhängigkeiten

Auch wenn wir die Lernprozesse nicht genau identifizieren können, sind solche für ein nachhaltiges Elektrizitätssystem notwendig. Da Infrastrukturrentscheidungen immer zur Folge haben, dass man einen bestimmten Pfad beschreitet, muss für diese Pfade gelten, dass sie nicht Innovationen und Lernprozesse hemmen dürfen, die zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen (vgl. Abschnitt 5.1.3) unverzichtbar sind.

5.1.2 Bausteine einer Nachhaltigkeitsbewertung («Indikatorensystem»)

Obwohl wir keine vollständige Information über den heutigen Zustand und die künftige Entwicklung des schweizerischen Elektrizitätssystems haben, wollen wir mit Nachhaltigkeitsindikatoren mögliche Entwicklungspfade beurteilen. Zusätzlich zu der in Abschnitt 5.1.1 thematisierten Unsicherheit kommt diesbezüglich als weitere Einschränkung hinzu, dass Indikatorensysteme auf unterschiedliche Weise konstruiert werden können.

Was unterscheidet Nachhaltigkeitsindikatoren von Messgrössen? Wenn wir sagen, dass in der Schweiz pro Sekunde ein Quadratmeter Land zugebaut wird, dann beschreibt diese Aussage mit Hilfe einer Messgrösse, wie sich ein Zustand verändert. Sie dokumentiert, wie die Bodenversiegelung in der Schweiz zunimmt. Diese Messgrösse ist aber noch kein Nachhaltigkeitsindikator. Nachhaltigkeitsindikatoren zeichnen sich durch ein besonderes Erkenntnisinteresse aus: Wir wollen Informationen in Bezug auf eine bestimmte, zumindest qualitative Zielgrösse gewinnen. Die Nachhaltigkeit eines Systems lässt sich demnach nur beurteilen, wenn Ziele festgelegt wurden, welche die Nachhaltigkeit repräsentieren.

Die Zielorientierung ist allerdings nur eine von vier Strukturanforderungen, die ein Nachhaltigkeitsbewertungssystem erfüllen muss. Die zweite Anforderung bezieht sich auf den Gegenstand. Soll z. B. das Elektrizitätssystem als Ganzes oder sollen nur einzelne Herstellungstechnologien bewertet werden? Eine Nachhaltigkeitsbewertung muss in irgendeiner Weise den zu bewertenden Gegenstand unter Einschluss der Rückkoppelungsmechanismen konzeptualisieren. Dafür gibt es verschiedene Ansätze wie das DPSIR-Modell (Driving Force-Pressure-State-Impact-Response), Stoff- resp. Kapital-Fluss-Modelle, das pragmatische Drei-Dimensionen-Modell oder Agenten-basierte Modelle.

Die dritte Anforderung betrifft die Kriterien für die Indikatoren selbst. Hier sind zunächst eine Reihe formaler Kriterien zu erfüllen wie Zuverlässigkeit der Daten (unter Einschluss ihrer Gewinnung), Vergleichbarkeit, Relevanz, Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Weiter geht es um die Art der Indikatoren: Will man z. B. nur quantitative (=messbare) Skalen, oder lässt man auch qualitative oder ordinale Skalen für Indikatoren (z. B. mittels Expertenbefragungen) zu? Schliesslich stellt sich das Problem der Aggregation. Wie kommt man von einer Menge von Indikatoren zu einem Gesamturteil? Hierzu bedarf es oft zusätzlicher Methoden.

Viertens schliesslich stellen sich bei all diesen Punkten Fragen nach dem «Wer legt diese fest?» resp. dem «Wie werden diese festgelegt?». Konkrete Indikatorensysteme basieren in der Regel auf Aushandlungsprozessen zwischen Akteuren (siehe z. B. MONET) oder aber auf Expertenbefragungen z. B. mit Delphi (vgl. Abschnitt 5.2). Das konkrete Ergebnis ist somit immer rückbezogen auf diejenigen, die am Prozess beteiligt waren.

Diese offenkundige Komplexität der Nachhaltigkeitsbewertungen wurde schon Mitte der 1990er-Jahre auf internationaler Ebene gesehen. In den Bellagio-Prinzipien (1997) wurden daher allgemeine Rahmenbedingungen für Indikatorensysteme definiert. Diese legen aber z. B. nur fest, dass es klar formulierter Ziele bedarf, sie legen nicht fest, wie man zu diesen Zielen gelangt. Dass kein noch so transparent und seriös entwickeltes Indikatorensys-

tem einen Alleinvertretungsanspruch erheben kann, wird auch daran erkenntlich, dass mindestens drei Typen von Bewertungen zu unterscheiden sind:

a) Normatives (deduktives) Assessment: Die Grundlage bilden Zielbestimmungen, die deduktiv auf der Basis einer Operationalisierung des normativen Gehalts von Nachhaltigkeit festgelegt wurden. Das Assessment orientiert sich an einem normativ festgelegten Massstab und berücksichtigt insbesondere Kriterien der Gerechtigkeit. Beispiele hierfür bilden u.a. MONET, der Bericht der britischen Sustainable Development Commission über «The role of nuclear power in a low-carbon society» (SDC 2006), sowie das auf 15 minimal-notwendigen Nachhaltigkeitsregeln beruhende Indikatorenset der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (Kopfmüller 2001).

b) Deskriptives Assessment mit Fokus auf die Präferenzen der Akteure: Hierbei werden Einstellungen resp. Präferenzen von Akteuren (Experten, Stakeholder, Entscheidungsträger etc.) auf der Basis eines vorgängig festgelegten Kriteriensets ermittelt. Dies geschieht in der Regel unter Verwendung eines Tools, das Entscheidungen unterstützen soll (z.B. eine MCDA). Die Kriterien können z.B. über ein Delphi-Verfahren mit Experten etabliert werden (vgl. die Literatur unter 5.2).

c) Deskriptive Assessment-Verfahren «aus der Beobachter-Perspektive»: Hierbei werden Prozesse und Zustände z.B. mittels Verwendung von Stoff-, Energie- oder Kapitalbilanzen oder auch von Risikobestimmungen erfasst. Weder wird dabei explizit ein normativer Massstab zugrunde gelegt noch geht es um die Einstellungen der Akteure. Bekannte Beispiele für derartige Verfahren sind Lebenszyklusanalysen oder Kosten-Nutzen-Rechnungen, die von subjektiven Präferenzen unabhängige quantitative Grundlagen für Entscheidungen beisteuern sollen. Obwohl diese drei Typen unabhängig voneinander vorkommen resp. für Nachhaltigkeitsbewertungen verwendet werden, handelt es sich nicht um Alternativen. Vielmehr ergänzen sie sich und sie werden

idealerweise im Zusammenspiel verwendet. So entspricht der Ansatz in Kapitel 5.2 einer Kombination der Typen b) und c).

Vor dem Hintergrund der skizzierten Bausteine und den daraus erwachsenden Optionen zur Entwicklung von Indikatorensystemen wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von konkreten Vorschlägen für Nachhaltigkeitsbewertungen im Energiebereich entwickelt, etwa von politischen Ämtern oder Agenturen (Walter 2001, IAA 2007), Nachhaltigkeitsräten wie der UK Sustainable Development Commission, Konsensinitiativen wie dem Energietrialog und von Seiten der Wissenschaft. Eine Metaauswertung dieser Systeme steht allerdings noch aus.

Blickt man auf die einzelnen Indikatorensysteme, stösst man jedoch immer wieder auf ähnliche Kriterien wie CO₂-Emissionen, Energiebilanz, Abfälle, Kosten, Wertschöpfung, Zugang zu Elektrizität, Sicherheit, Effizienz, eventuell Suffizienz, soziale Kohäsion, Innovation, libertärer Staat (Nicht-Pateralismus). Die Schwierigkeiten bei einer Nachhaltigkeitsbewertung beziehen sich denn auch weniger auf die einzelnen Kriterien. Die Schwierigkeiten treten dann auf, wenn es um aggregierte Aussagen geht, d.h. wenn zwischen den einzelnen Aspekten Gewichtungen vorgenommen werden müssen und über derartige Priorisierungen ein Gesamturteil angestrebt wird. Die Schwierigkeit, ein aggregiertes Urteil zu etablieren, hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass es unterschiedliche Optionen gibt, den Zielgehalt der «nachhaltigen Entwicklung» festzulegen.

5.1.3 Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung): Der Zielgehalt des Leitbilds

Die moderne politische Idee einer nachhaltigen Entwicklung wurde 1987 im WCED-Bericht (Brundtland-Bericht) formuliert und mit der Deklaration von Rio 1992 zur international leitenden Entwicklungsmaxime erhoben.¹ Eine (globale) Gesellschaft ist demzufolge dann nachhaltig, wenn sie allen Menschen unabhängig von Rasse, Geschlecht

1 Die Idee fiel nicht vom Himmel. Grossen Einfluss übten etwa der Brandt-Bericht von 1980, die IUCN-Strategie von 1980 oder der Meadows-Bericht 1972 aus.

Grossbritannien	Schweiz
Living within environmental limits	Ökologische Verantwortung
Ensuring a strong, healthy and just society	Gesellschaftliche Solidarität
Achieving a sustainable economy	Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit
Promoting good governance	
Using sound science responsibility	

Tabelle 5.1

und Herkunft ein menschenwürdiges Leben ermöglicht und dieses Ziel auf eine Weise realisiert, dass sich künftige Gesellschaften nicht mit unvermeidbaren Risiken hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur Realisierung dieses Ziels konfrontiert sehen. Die im WCED-Bericht enthaltene politische Idee der Nachhaltigkeit bringt zwei bzw. drei grosse globale Themenfelder zusammen: den klassischen Gerechtigkeitsdiskurs (z.B. den Nord-Süd-Diskurs) und den Diskurs um Umwelt resp. um knappe und fragile Ressourcen. Nachhaltigkeit ist demnach nicht allein ein Ressourcendiskurs. Im Vordergrund steht die globale, nationale und regionale Entwicklung der menschlichen Gesellschaft unter Berücksichtigung einer verantwortbaren Nutzung der natürlichen Ressourcen.² Dazu sollen – im Gegensatz zur klassisch sektoriellen Politik – integrative, Gesellschaft und bio-physische Umwelt gleichermaßen berücksichtigende Strategien entwickelt werden. Die allgemeine Idee ist das eine, deren Operationalisierung in Politik und Wissenschaft ein anderes. Ein Vergleich zwischen den in Grossbritannien und in der Schweiz vorgenommenen Operationalisierungen des Brundtland-Verständnisses zeitigt Vielfalt und nicht Eindeutigkeit (Tabelle 5.1).

Trotz bestehender Ähnlichkeiten ist offenkundig, dass Interpretationsräume bestehen. Diese sind

von grosser Bedeutung, wenn in der Gesellschaft konkrete Ziele ausgehandelt werden sollen, da sie unterschiedliche Akteure zusammenführen können, ohne dass dazu zuvor ein einheitliches Verständnis dieser allgemeinen Ziele etabliert werden musste. Über die politischen Interpretationsspielräume hinaus gehend hat sich innerhalb der Wissenschaften eine Reihe von theoriebasierten Konzepten für «Nachhaltigkeit» etabliert. In diesen geht es um begründete Angebote für Zielsysteme, d.h. um Angebote für das «what to sustain» (vgl. Dobson 1996).

Zwei Typen derartiger theoriegeleiteten Nachhaltigkeitskonzeptionen sind zunächst:

- a. Eine Gesellschaft ist nachhaltig, wenn sie zumindest dasjenige Niveau an Wohlfahrt an die nächste Generation weiter gibt, das sie geerbt hat.
- b. Eine Gesellschaft ist nachhaltig, wenn sie zumindest dasjenige Niveau an vorhandenen Ressourcen (oft auch als Kapitalstöcke bezeichnet) an die nächste Generation weiter gibt, das sie geerbt hat.

Gemeinsam ist diesen beiden Varianten, was man als Generationengleichheit bezeichnet: Genera-

² Der Begriff «nachhaltig» wird in der Alltagssprache in vielfältiger Weise verwendet, oft einfach im Sinne von «eine dauerhafte, langfristige Wirkung erzielen» («nachhaltiger Wirtschaftsaufschwung», «nachhaltige Sicherung der Unternehmensgewinne» etc.). Wenn hingegen im politisch-wissenschaftlichen Diskurs wie hier von «nachhaltiges Elektrizitätssystem» die Rede ist, gilt immer der Bezug zur Bedeutung des WCED-Berichts (so auch in der Strategie «Nachhaltigkeit» des Bundes).

Exkurs 1: Wissenschaft – Politik – Nachhaltigkeit

Gesellschaften basieren auf Arbeitsteilung und Kooperation. In den Gesellschaftswissenschaften spricht man von der funktionalen Ausdifferenzierung der Gesellschaften. Entlang von Grundfunktionen wie Produktion, Recht, Politik, Wissensgenerierung etc. differenzieren sich Gesellschaften arbeitsteilig aus, wobei sich sowohl innerhalb dieser Bereiche als auch zwischen diesen Bereichen Kooperationen entwickeln. Die Gesellschaft ist dann das Insgesamt dieser Subsysteme zusammen mit deren Interaktionen. Solche Subsysteme sind etwa Wissenschaft, Politik, Wirtschaft, Recht, Öffentlichkeit etc. Handlungen einzelner Akteure folgen innerhalb dieser Subsysteme deren jeweiligen institutionellen Codices. Es gibt keine Akteure auf der Ebene «Gesellschaft». Daraus ergeben sich für Transformationsstrategien einige zu beachtende Konsequenzen:

1. Staatliches Handeln ist immer Teil des Ganzen und nicht das Ganze selbst. Es gibt keinen Punkt, von dem her sich das gesellschaftliche System eindeutig steuern lässt.
2. Nachhaltigkeit ist zwar ein gesamtgesellschaftliches Leitbild, es gibt aber keine Akteure, die dieses gewissermassen «gesamtgesellschaftlich» repräsentieren. Nachhaltige Entwicklung vollzieht sich über die Integration von «Nachhaltigkeit» in die institutionellen Codices der einzelnen Subsysteme (vgl. «Nachhaltiges Wirtschaften», «Nachhaltigkeitspolitik», «Nachhaltige Universitäten», «Nachhaltigkeit in NGOs»). Vielfalt und nicht Einheitlichkeit ist die Folge. Das Elektrizitätssystem ist ein multisektorielles System mit unterschiedlichsten Akteuren.
3. Wissenschaft und Politik sind zwei der wichtigsten Subsysteme moderner Gesellschaften mit ganz unterschiedlichen institutionellen Codices. Wissenschaft ist an wahr-falsch resp. methodisch begründet-unbegründet orientiert, während Politik an prozedural gesicherter Legitimität und an Aushandlungen orientiert ist. Die Politik kann sich z. B. nicht an einem bestimmten wissenschaftlichen Verständnis von «Nachhaltigkeit» ausrichten. Nachhaltigkeit kann nur soweit als politisches Leitbild fungieren, als es erstens grundsätzlich konsensfähig ist und zweitens einen Rahmen für deliberativ festzulegende Handlungen formuliert. Demgegenüber ist die Wissenschaft an «bestmöglicher Begründung» orientiert. Für sie ist das Brundtland-Verständnis nicht Prämisse, sondern Ausgangspunkt analytischer Durchdringung. Die Wissenschaft kann dabei die vernünftigerweise bestehenden Möglichkeiten rational rahmen und auch Minimalstandards für den öffentlich-politischen Diskurs über Nachhaltigkeit formulieren.

tionen haben gleiche Ansprüche. Der Unterschied zwischen a) und b) besteht darin, dass erstere als Kriterium «Erhaltung der Wohlfahrt», letztere «Erhaltung der Ressourcenbasis» aufstellt. Dies spiegelt unterschiedliche Prämissen in das zugrunde gelegte Gerechtigkeitsverständnis. Während a) im Verständnis der ökonomischen Wohlfahrts-Konzeptionen auf die Maximierung der Befriedigung von Präferenzen zielt, bildet für b) die gerechte Verteilung von Ressourcen die Grundlage nicht nur für die intra- sondern auch für die intergenerationelle Gerechtigkeit. Beide Varianten differenzieren sich

intern weiter aus nach Massgabe ihrer Kriterien für die Verwendung von ökologischen Ressourcen. Das Ergebnis ist die bekannte Unterscheidung zwischen schwacher und starker Nachhaltigkeit. Ohne hier auf Details und Differenzierungen einzugehen, besagt die schwache Nachhaltigkeit, dass ökologische Ressourcen grundsätzlich dann verbraucht werden können, wenn mit diesen artifizielle, langfristig tragende Produktionsmittel (wirtschaftliches und soziales Kapital) bereitgestellt werden (Substitution). Starke Nachhaltigkeit verwirft diese Substituierbarkeit und orientiert sich an den für die Ökosysteme

Exkurs 2: Gerechtigkeit

- I. Wissenschaftliche Gerechtigkeitskonzeptionen sind begründungspflichtig und haben einen diskursiv einzulösenden Objektivitätsanspruch.
- II. Gerechtigkeitstheorien konzentrieren sich entweder auf Kriterien für Wohlergehen (plus Verteilungsregeln) oder umfassen auch den prozeduralen Bereich unter Einschluss politischer Rechte. Letztere werden hier vorausgesetzt und nicht weiter thematisiert.
- III. Für die Gerechtigkeitsdiskussion im Kontext von Nachhaltigkeit ist charakteristisch, dass sie Fragen der Gerechtigkeit innerhalb einer Generation mit dem Problem der Gerechtigkeit zwischen den Generationen verknüpft.
- IV. Die skizzierten Nachhaltigkeitskonzeptionen a) – d) spiegeln unterschiedliche Verpflichtungen auf bestehende Theorien der Gerechtigkeit. Eine erste Trennlinie besteht entlang des Verhältnisses zwischen inter- und intragenerationaler Gerechtigkeit. So lässt sich «Nachhaltigkeit» als Herausforderung zur Realisierung von «intragenerational justice under the condition of intergenerational justice» (Christen & Schmidt 2011) verstehen oder aber als Konzeptualisierung von intergenerationaler Gerechtigkeit allein (z. B. Kirchgässner 1997). Eine zweite betrifft die für Nachhaltigkeitskonzeptionen zentrale Thematik einer angemessenen Metrik für Lebensqualität (Wohlergehen). Die vier Varianten Wohlfahrt, Bereitstellung der Ressourcen, Capabilities und Grundbedürfnisse entsprechen den vier gängigsten Konzeptionen für Wohlergehen.
- V. Wenn Gerechtigkeit (als Bedingung für ein menschenwürdiges Leben für alle) konstitutiv für Nachhaltigkeit ist, und wenn es begründete Varianten von Gerechtigkeitskonzeptionen gibt, dann ist grundsätzlich nicht damit zu rechnen, dass ein einziger wissenschaftlich etablierter Bewertungsmaßstab für Nachhaltigkeit bereitgestellt werden kann.

inhärenten Funktionsgrenzen. Die dabei zu berücksichtigenden Regeln sind etwa in den «environmental management rules» (siehe unten) ausgedrückt. Alternativen zu a) und b) ergeben sich, wenn erstens eine andere Metrik des Wohlergehens investiert wird und wenn zweitens das Prinzip der Gleichheit der Ansprüche der Generationen fallen gelassen wird:

- c. Die so genannte integrative Nachhaltigkeitskonzeption der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) postuliert 15 allgemeine (universell gültige) qualitative Regeln, die sowohl Kriterien des Wohlergehens als auch die Ressourcen für deren Realisierung berücksichtigen (Kopfmüller 2001, 2006). Eine Gesellschaft ist demnach nachhaltig, wenn sie diese 15

Regeln erfüllt und das Niveau von Wohlergehen über die Generationen erhalten bleibt. Hier besteht Gleichheit der Generationen über einer objektiven Metrik von 15 Minimalanforderungen.

- d. Im Unterschied dazu wird die Forderung nach Gleichheit zwischen Generationen im Rahmen einer so genannten Schwellenkonzeption eines menschenwürdigen Lebens verworfen. Unter moralischen Gesichtspunkten sei es nicht zwingend, dass nachfolgende Generationen dasselbe Mass an Wohlfahrt erzielen müssen wie ihre vorhergehenden, so lange die qualitativen Kriterien (Mindestbedingungen oder Schwelle) eines menschenwürdigen Lebens erfüllbar bleiben (Meyer 2008). Eine nachhaltige Gesellschaft wäre dann realisiert, wenn über die Generatio-

nen hinweg diese Minimalbedingungen immer erfüllt werden können. Ein sehr einflussreicher Schwellenansatz ist der so genannte Capability-Approach von Amartya Sen (1980, 1993) und Martha Nussbaum (2000), der eine alternative, an Bedingungen der menschlichen Wahlfreiheit orientierte Metrik für Wohlergehen postuliert.

Zusätzliche Varianten ergeben sich durch die Investition stärkerer ethischer Prämissen:

- e. Investiert eine Position z.B. naturethische Prämissen wie im «Greifswalder Ansatz» (Ott 2004), entsteht ein Konzept starker Nachhaltigkeit, in dem die Menschen die moralische Pflicht haben, ihre Gesellschaften an die Rahmenbedingungen der Natur anzupassen. Eine starke Orientierung an normativen Aspekten des Pragmatismus kann demgegenüber dazu führen, Nachhaltigkeitskriterien in erster Linie mit Gestaltungsmöglichkeiten von Gemeinschaften (Gemeinde, Städten, Regionen u.ä.) zu verknüpfen (vgl. Norton 2005).

Gemeinsam ist diesen Positionen, dass sie die in der Nachhaltigkeitsidee immanenten Gerechtigkeitsaspekte auf der Basis normativer Theorien konzeptualisieren. Sie stellen den Aspekt der Gerechtigkeit resp. die Zielorientierung «menschwürdiges Leben für alle» ins Zentrum. Die ökologischen, institutionell-politischen und wirtschaftlichen Aspekte sind Instrumente zur Zielerreichung.

Ein alternativer Typus von Nachhaltigkeitskonzeptionen zeichnet sich dadurch aus, dass er sich allein an Systemeigenschaften lebender Systeme zur Formulierung der allgemeinen Ziele von Nachhaltigkeit orientiert. John Ehrenfeld (2004) versteht Nachhaltigkeit «as evoking flourishing, resilience, integrity, adaptive capacity, or other similar concepts – all of which happen to be emergent properties of living complex systems...» (p. 3).

- f. Die Grundlagen für die Konzeptualisierung von Nachhaltigkeit stellt hier die System-

theorie resp. die darin formulierten Systemeigenschaften von komplexen Systemen bereit, insbesondere Resilienz und Vulnerabilität. Resilienz ist die Eigenschaft eines Systems, auf Störungen von aussen so zu reagieren, dass die Grundfunktionen des Systems aufrechterhalten bleiben (durch Anpassungen innerhalb des Systems selbst). Verwundbarkeit bezeichnet dagegen das Potenzial eines Systems, Einflüsse von aussen nicht «abfedern» zu können. Folgt man der Idee, Resilienz als relevante Zielorientierung zu nehmen, dann wäre ein System nachhaltig, wenn es seine Selbstorganisationsfähigkeiten so bewahrt, dass es sich den äusseren auf sie wirkenden Einflüssen und Änderungen unter Beibehaltung seiner wesentlichen Funktionen und Eigenschaften anpassen kann. Die Zielorientierung entspringt hier dem «Sollen der Selbsterhaltung» lebender Systeme. Gemeinsam ist diesen Ansätzen, dass das Ökosystem und nicht die Gesellschaft das Objekt von Nachhaltigkeit ist: «The system under study and the system that is the focus of the process of sustainable development is the global ecosystem or the ecosphere.» (Korhonen 2004, 810; vgl. auch Robèrt 2000)

Schliesslich ist noch auf das bekannte Drei- (oder Vier-) Dimensionen-Modell hinzuweisen:

- g. Das Drei-Dimensionen-Modell ist in der wissenschaftlich-konzeptuellen Literatur weit weniger vertreten als in der gesellschaftlichen Praxis. Die Gründe dafür liegen bei dessen Schwächen wie z.B. der willkürlichen Trennung zwischen den drei Bereichen resp. den damit ausser Acht gelassenen Beziehungen zwischen ihnen, Problemen der Aggregation sowie dem Fehlen der politisch-institutionellen oder des kulturellen Bereichs. Die Vorteile dieses Modells werden in der Literatur auf der praktischen Ebene der Umsetzung gesehen, insofern z.B. Management- oder Entscheidungstools so konzipiert werden, dass ökologische, wirtschaftliche und soziale Aspekte auch wirklich mit berücksichtigt wer-

den (vgl. Kleine & von Hauff 2009, Schaltegger & Burritt 2005). Der bedeutende praktische Wert des Dimensionen-Modells wird auch im Kontext des in Kapitel 5.2 dargestellten Ansatzes deutlich.

Es ist hier nicht möglich, die Diskussion um das Für und Wider dieser Vorschläge etwa auch mit Blick auf eine übergreifende Typologie von Nachhaltigkeitskonzeptionen zu führen (vgl. Burger & Christen 2011, Christen & Schmidt 2011). Mit Blick auf eine Nachhaltigkeitsbewertung der Optionen für ein künftiges schweizerisches Elektrizitätssystem lassen sich dennoch einige Grundsätze heraus stellen:

1. Eine Nachhaltigkeitsbewertung kann keine Entscheidung determinieren, weil es mehrere verteidigbare Optionen zur Formulierung konkreter Nachhaltigkeitsziele gibt. Für konkrete Nachhaltigkeitsziele gilt zudem immer das Prinzip der Unsicherheit.
2. Es besteht keine «anything goes»-Situation mit beliebigen Varianten. Man kann sich z.B. nicht sowohl auf die Brundtland-Tradition der Nachhaltigkeitsidee berufen und die obige Position (f) vertreten. Folgt man der politisch-gesellschaftlichen Idee von Nachhaltigkeit, geht es um den normativen Bereich des Wohlergehens für alle unter Berücksichtigung der Fragilität und Endlichkeit des irdischen Ökosystems. Entsprechend lassen sich sozio-kulturelle und institutionelle Aspekte nicht aus Bewertungen «wegschmieren» (z.B. mit dem Hinweis, dass die diesbezüglichen Daten nicht «hart genug» seien).
3. Nachhaltigkeitsbewertungen können Entscheidungsgrundlagen bereitstellen: Gegeben wir investieren ein Konzept X zusammen mit einem bestimmten Systemverständnis Y und mit einem Indikatorenset Z, dann sind die Bewertungen relativ zu diesen Prämissen zuverlässig und können entsprechend Entscheidungen informieren.

4. Unabhängig von der Operationalisierung von Gerechtigkeit existieren ziemlich gut etablierte Grundregeln für den ökologischen Bereich, die so genannten Umweltmanagementregeln (vgl. Enquête-Kommission 1998, Pearce & Turner 1990 S. 44f):

- I. Langfristig betrachtet stehen in erster Linie erneuerbare Ressourcen zur Verfügung. Dies führt zu einer Priorisierung erneuerbarer Ressourcen. Bezüglich ihrer Verwendung gilt die alte «Holzschlag-Regel»: Erneuerbare Ressourcen sind im Rahmen ihrer Regenerationsrate zu nutzen.
- II. Da aus jeder Nutzung Stoffwechselprodukte anfallen und diese durch das irdische Ökosystem aufzunehmen sind, ergibt sich unter Berücksichtigung von (I) die Senkenregel: Die Art der Nutzung von Ressourcen resp. die Belastung der Ökosysteme durch Stoffwechselprodukte darf die Regenerationsfähigkeit der Ökosysteme nicht übersteigen. (Je nach Interpretation ist die Biodiversität in dieser Regel mit enthalten, während oft die Erhaltung der Biodiversität als zusätzliche Regel aufgestellt wird.)
- III. Die Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen ist nur dann legitim, wenn eine adäquate Substitution möglich ist. Kohle könnte z.B. verbraucht werden, da mittelfristig eine Substitution durch neue Erneuerbare denkbar ist (wenn das CO₂-Problem nicht wäre). Hierbei gibt es die Varianten «durch erneuerbare Ressourcen substituierbar» oder eine Variante, die auch künstliches Kapital als Substitution zulässt. Bei seltenen nicht-erneuerbaren Ressourcen bedeutet «Substitution» Sicherstellung der Rezyklierbarkeit.
- IV. Grossrisiken, die in langfristig irreparable Schäden münden können, sind zu vermeiden. Allfällige Grossrisiken bestehen nicht allein bei Kernkraftwerken oder Staudämmen; der Klimawandel oder auch die weiter zunehmende Bodenversiegelung repräsentieren ebenfalls Grossrisiken.

Trotz der relativen Klarheit dieser Regeln besteht erheblicher Interpretationsbedarf. Was Grossrisiken im Einzelnen sind ist ebenso strittig wie die Frage, was Begriffe wie «langfristig» oder «Priorisierung» konkret bedeuten. Zu berücksichtigen wären zudem Kriterien wie Effizienz und technologisches Entwicklungspotenzial (z.B. bei der Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen, Recycling etc.). Wenn wir somit «in der Wissenschaft gut etabliert» sagen, bedeutet das nicht, dass sich daraus in dogmatischer Weise konkrete Ziele eindeutig ableiten lassen. Es gibt einen recht ansehnlichen Interpretationsspielraum – die anhaltende Diskussion um «Grossrisiken» im Kontext von Kernkraftwerken legt davon Zeugnis ab.

5.1.4 Ziele

Wenn richtig ist, dass für Nachhaltigkeit generell Unsicherheit konstitutiv ist und dass für das «what to sustain» verschiedene Optionen resp. auch für die Umweltmanagementregeln verschiedene Interpretationen möglich sind, dann gilt, dass die Wissenschaft der Gesellschaft nicht die konkreten Handlungsziele vorgeben kann. Konkrete Ziele wie z.B. das 2 °C-Ziel oder die europäische 20-20-20-Formel sind Ergebnis von gesellschaftlichen Debatten und Aushandlungen. Die Wissenschaft kann bezüglich der Ziele zweierlei tun: Sie kann sie zum einen kritisch analysieren, so wie hier die Bausteine eines Bewertungssystem allgemein kritisch analysiert wurden. Die Wissenschaft kann damit auf Leistungen und Grenzen von Bewertungs- und Zielsystemen aufmerksam machen und in der Praxis auf einen nicht-dogmatischen Umgang mit derartigen Instrumenten hinarbeiten. Indem wir hier zu zeigen versucht haben, dass es begründete Alternativen bei Bewertungen gibt, haben wir auf die Gründe aufmerksam gemacht, welche die unterschiedlichen Resultate bei Nachhaltigkeitsbewertungen erklären lassen. Zugleich haben wir dafür argumentiert, dass derartige Bewertungen nicht beliebig erfolgen können, sondern dass sie sich vielmehr innerhalb eines Rahmen bewegen.

Die Wissenschaft kann zum anderen auch mögliche allgemeine Rahmungen für das «what to sustain»

vorschlagen. Das ist zwar voraussetzungsreich, weil z.B. einer der vier heute vertretenen Massstäbe bezüglich Wohlergehen (Metrik von Gerechtigkeit) dazu investiert werden muss. Dennoch lässt sich das methodisch gestützt durchführen – auch wenn der kritische Diskurs darüber in den Nachhaltigkeitswissenschaften erst begonnen hat. Darüber Einigkeit zu erwarten, wäre allerdings vermessen. Wenn die Konzeptualisierung von Nachhaltigkeit Prämissen über Gerechtigkeit voraussetzt, Gerechtigkeit aber über die vier oben erwähnten Optionen ausgestaltet werden kann, ist auf die Schnelle keine einheitliche wissenschaftliche Theorie über Nachhaltigkeit zu erwarten.

Neben dem mit der Erarbeitung von Theorien verbundenen hohen Anspruch ist allerdings auch eine wissenschaftliche, interdisziplinär ausgerichtete Rahmung auf einer mittleren, konsensualen Ebene denkbar. Dieser Weg wurde vom Steuerungsausschuss bei der Ausarbeitung des Kapitels 6 besprochen und die Ergebnisse werden in der Kurzfassung des Kapitels 5 dargestellt. Als obersten Grundsatz galt die Orientierung am menschlichen Wohlergehen – ein Elektrizitätssystem muss der Realisierung von Wohlergehen dienen und dabei ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Risiken resp. Risiken bezüglich der Versorgungssicherheit berücksichtigen.

5.1.5 Literatur

- Bundesamt für Statistik: Monitoring der Nachhaltigen Entwicklung. Schlussbericht Methoden und Resultate (MONET), Neuenburg 2003. www.proclim.ch/news?2521
- Brighthouse, H., Robeyns, I. (eds.) (2010): *Measuring Justice. Primary Goods and Capabilities*. Cambridge: UP.
- Burger, Paul, Christen, Marius (2011): Towards a capability approach of sustainability, *Journal of Cleaner Production* vol. 19, 787–795. www.proclim.ch/news?2522
- Christen, Marius, Schmidt Stephan (2011): A Formal Framework for Conceptions of Sustainability – a meta-approach as a guideline, *Sustainable Development*, online published DOI: 10.1002/sd.518
- Dobson, A. (1996): Environment Sustainable: An analysis and a typology. In: *Environmental Politics* 5 (3), 401–428.
- Ehrenfeld, J. (2004). Can Industrial Ecology be the «Science of Sustainability»? *Journal of Industrial Ecology*, vol. 8, p.1–3. www.proclim.ch/news?2523
- Enquete-Kommission, Deutscher Bundestag (1998): Konzept Nachhaltigkeit: Vom Leitbild zur Umsetzung. 13. Wahlperiode, Drucksache 13/11200 26.06.98 www.proclim.ch/news?2524
- International Atomic Energy Agency (IAEA 2007): Indicators for Sustainable Energy Development. www.proclim.ch/news?2525
- Kates, R.W./Parris, T.M./Leiserowitz, A.A. (2005): What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice. In: *Environment. Science and Policy for Sustainable Development* 47 (3), 8–21. www.proclim.ch/news?2526
- Kleine, A., von Hauff M. (2009): Sustainability-Driven Implementation of Corporate Social Responsibility: Application of the Integrative Sustainability Triangle, *Journal of Business Ethics* vol. 85, Supp. 3, 517–533. www.proclim.ch/news?2527
- Kopfmüller, J./Brandl, V./Jörissen, J./Paetau, M./Banse, G./Coenen, R./Grunwald, A. (2001): *Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet: Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren*. Berlin: Edition Sigma.
- Kopfmüller, J. (ed.) (2006): *Ein Konzept auf dem Prüfstand: das integrative Nachhaltigkeitskonzept in der Forschungspraxis*. Berlin: Edition Sigma.
- Korhonen, J. (2004): Industrial ecology in the strategic sustainable development model: strategic application of industrial ecology, *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, 809–823. www.proclim.ch/news?2528
- Meyer, L. (2008). Intergenerational Justice, Entry in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. www.proclim.ch/news?2529
- Norton, B.G. (2005). *Sustainability. A Philosophy of Adaptive Ecosystem Management*. Chicago: University of Chicago Press.
- Nussbaum, M. C. (2000): *Woman and Human Development. The Capability Approach*, Cambridge: University Press. www.proclim.ch/news?2530
- Ott, K., Döring, R. (2004): *Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit*. Marburg: Metropolis-Verlag.
- Pearce, D.W., Turner, R.K. (1990): *Economics of natural resources and the environment*. Baltimore: John Hopkins University Press. www.proclim.ch/news?2531
- Robèrt, K.H. (2000): Tools and concepts for sustainable development, how do they relate to a general framework for sustainable development and to each other? *Journal of Cleaner Production*, vol. 8, 243–254. www.proclim.ch/news?2532
- Schaltegger, St., Burrit, R., Petersen, H. (2003): *An Introduction to Corporate Environmental Management. Striving for Sustainability*, Sheffield: Greenleaf Publishing.
- Sen, A. (1980): Equality of what? In: St. McMurrin (ed.), *Tanner lectures on human values*. Cambridge: Cambridge University Press pp. 195–220. www.proclim.ch/news?2533
- Sen, A. (1993): Capability and well-being. In: M. Nussbaum & A. Sen (eds), *The quality of life*. Oxford: Clarendon Press, pp 51–73.
- Sustainable Development Commission UK (SDC 2006): *The role of nuclear power in a low carbon society*, SDC position paper, www.proclim.ch/news?2534
- Walter, F. et. al. (2001): *Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich – Schlussbericht*. Bern, Bundesamt für Energie

5.2 Indikatoren-gestützte Evaluation

Im Folgenden wird das vom PSI entwickelte und im Kontext des EU-Projekts NEEDS umgesetzte Konzept vorgestellt und demonstriert, wie es von Akteuren auf Grund unterschiedlicher Präferenzen resp. unterschiedlicher Interpretationen von Nachhaltigkeit zur Generierung von unterschiedlichen Schlüssen verwendet wird.

5.2.1 Das PSI-System

Um ein umfassendes Analyseverfahren zu erarbeiten, mit dem ein Nachhaltigkeitsindex und ein entsprechendes Ranking von Technologien erstellt werden kann, braucht es folgende grundlegende Schritte:

- Auswahl der Technologien
- Auswahl verschiedener Kriterien und assoziierter Indikatoren zur Beurteilung der Technologien
- Quantifizierung der Indikatoren
- Festlegung von Präferenzen für Aggregationszwecke
- Aggregation auf der Basis einer Kombination von Indikatorenwerten und Präferenzen
- Abbildung der Sensitivität zur Veranschaulichung der Auswirkung verschiedener Präferenzprofile auf die Ergebnisse

Die Beurteilung kann auf der Ebene einzelner Technologien mit den entsprechenden Brennstoffkreisläufen oder für Strom-/Energieversorgungsoptionen (bestehend aus alternativen Mixen einzelner Technologien) erfolgen. Für die Schweiz existiert für Letzteres noch kein vollständiges Anwendungsszenario.

Das PSI hat bei der Entwicklung einer Indikatoren-basierten Nachhaltigkeitsbeurteilung in den letzten zehn Jahren eine sehr aktive Rolle gespielt. Insbesondere das EU-Projekt NEEDS (Ricci et al., 2009)

zeigt den aktuellen Stand bei der Ausarbeitung eines Bezugssystems für die Indikatoren-basierte Technologiebeurteilung im Hinblick auf zukünftige Technologien im Jahr 2050. Es weist eine Reihe von Parallelen zur Stromportfoliobeurteilung für das Schweizer Axpo-Unternehmen (Roth et al., 2009) auf; im Rahmen dieses Projekts wurden die aktuellen wie auch zukünftige Technologien beurteilt, jedoch für einen kürzeren Zeithorizont, d.h. bis 2030.

5.2.2 Referenztechnologien

Von entscheidender Bedeutung für die Ergebnisse ist zunächst die Festlegung, welche Technologien überhaupt beurteilt werden sollen. Hier kommt es vor allem darauf an, zwischen aktuellen und zukünftigen sowie durchschnittlich gut und optimal verfügbaren Technologien zu unterscheiden, und – für den Fall, dass zukünftige Technologien in Betracht gezogen werden sollen –, den zeitlichen Horizont zu bestimmen. Die Berücksichtigung der gesamten Energiekette über die Kraftwerke hinaus, d.h. der vor- und nachgelagerten Komponenten, wirkt sich wesentlich auf die Gesamtleistung der Optionen aus. Da die Leistung einiger Alternativen wie zum Beispiel Solar- und Windkrafttechnologien in hohem Masse von den klimatischen Bedingungen abhängt, ist zudem eine geografische Spezifizierung erforderlich. Darüber hinaus kann der genaue Standort einer Technologie erheblichen Einfluss auf gewisse Indikatoren haben, wie zum Beispiel die mit dem Normalbetrieb verbundenen Risiken oder Konsequenzen möglicher Unfälle. Eine Berücksichtigung zukünftiger Technologien setzt als Grundlage die Analyse zukünftiger technologischer Entwicklungen voraus. Der Grad des Optimismus hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen spezifischer Technologien wirkt sich natürlich stark auf die Ergebnisse und deren interne Kohärenz aus. In der Praxis erhalten Technologien, die zum betreffenden Zeitpunkt noch relativ unausgereift sind, im Allgemeinen einen relativ hohen «Entwicklungsbonus».

In der Axpo-Studie wurden insgesamt achtzehn Technologien zur Stromerzeugung untersucht. Dazu gehören Technologien zur Nutzung regene-

rativer Energien sowie fossile und nukleare Kraftwerkstechnologien mit den damit verbundenen Energieketten. Die Leistung wurde für zwei Zeitfenster, bezogen auf das Referenzjahr 2000 (stellvertretend für die bestverfügbare Technologie) und das Jahr 2030 ermittelt. Die Technologie-Palette umfasst sowohl zentrale Grosskraftwerke als auch kleinere, dezentrale Anlagen in der Schweiz und einigen anderen europäischen Ländern (für potenzielle Elektrizitätsimporte). Beurteilt wurden neben Grundlast- und mittelgrossen Kraftwerken kleine Erdgas- und Biomasse-Blockheizkraftwerke. Für die Zeit zwischen heute und 2030 wurden für alle Referenz-Kraftwerke evolutionäre technologische Weiterentwicklungen angenommen (Bauer et al., 2008 und Roth et al., 2009).

Das NEEDS-Projekt deckte ein breites Spektrum an zukünftigen, modernen Stromerzeugungstechnologien einschliesslich fossiler Kraftwerke (Steinkohle, Braunkohle und Erdgas), nuklearer Technologien (Druckwasser- und Brutreaktoren) und einer Reihe regenerativer Ressourcen (Biomasse, Solarkraft und Wind) ab. Insgesamt wurden, unter Berücksichtigung der Gegebenheiten in vier Ländern (Deutschland, Frankreich, Italien und der Schweiz), 26 Technologien untersucht. Einige Technologien wurden als nicht für alle Länder gleichermassen geeignet angesehen (z.B. Solarthermie-Anlagen für Deutschland und die Schweiz). Die Basisdaten für jede Technologie wurden von zahlreichen NEEDS-Partnern erhoben und spiegeln die erwarteten zukünftigen Entwicklungen unter Vorgabe von drei Szenarien – pessimistisch, realistisch-optimistisch und sehr optimistisch – wider. Für die Beschreibung dieser Szenarien gab es unter den diversen Partnern keine strenge oder einheitliche Definition, und einige technologische Entwicklungen sind erheblich spekulativerer Art als andere – das in den Daten enthaltene Mass an Optimismus kann daher variieren (z.B. hinsichtlich erneuerbarer Energien und konventionellerer Technologien mit fossilen Brennstoffen).

Die Tabellen 5.1, 5.2 und 5.3 fassen die Hauptmerkmale der in den Axpo- und NEEDS-Studien untersuchten Technologien zusammen.

Tabelle 5.1: Liste von Energietechniken und ihre Hauptmerkmale; PSI für Axpo, Jahr 2005 (Bauer et al., 2008)

Energy source	Nuclear	Nuclear	Hard coal	Natural gas
Technology	Pressurized water reactor, Generation II	Pressurized water reactor, Generation II	Supercritical steam cycle (SC), base load	Combined Cycle (CC), base load
Capacity el. [Mw _{el}]	730	1300	509	400
Capacity th. [Mw _{th}]	-	-	-	-
Location	Switzerland (CH), Beznau	France (F), Cattenom	Germany (D), Rostock	Switzerland (CH), Birr
Operating time [full load hours per year]	8000	6300	7000	8000
Efficiency electric [%]	32.0	34.0	43.2	57.5
Lifetime [a]	40	40	30	25
Energy source	Hydro power	Biogas	Synthetic Natural Gas (SNG)	Wind power
Technology	Reservoir	Combined Heat & Power (CHP)	Combined Heat & Power (CHP)	Onshore wind park, 4 turbines
Capacity el. [Mw _{el}]	53	0.1	0.2	4 x 0.85
Capacity th. [Mw _{th}]	-	0.1	0.3	-
Location	Switzerland (CH), Illanz/Panix	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Mt. Crosin
Operating time [full load hours per year]	2476	7000	4500	1250
Efficiency electric [%]	89.0	36.0	43.0	n.a.
Lifetime [a]	150	15	20	20

a) Effizienz der Zelle; Moduleffizienz ist 13,2 %.

b) Durchschnittliche Effizienz der Zelle über die Lebensspanne (inkl. Degradation)

Natural gas	Natural gas	Natural gas	Natural gas	Hydro power
Combined Cycle (CC), mid load	Combined Cycle (CC), base load	Combined Heat & Power (CHP)	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	Run-of-river
400	400	0.2	0.2	51
-	-	0.3	0.2	-
Switzerland (CH), Birr	Italy (I), Naples	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Wildegg-Brugg
4000	8000	4500	4500	5720
55.5	55.5	32.0	40.0	88.9
25	25	20	5	80
Wind power	Wind power	Photovoltaic	Photovoltaic	Geothermal
Onshore wind park, 50 turbines	Offshore wind park, 80 turbines	Multicrystalline Si panel, rooftop	Amorphous Si, rooftop	Enhanced Geothermal System (EGS)
50 x 2	80 x 2	0.02	0.01	3
-	-	-	-	-
Germany (D), Northsea coast	Denmark (DK), HornsRev	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Basel
2500	3750	850	850	7000
n.a.	n.a.	14.4 ^a	6.5 ^b	11.3
20	20	30	30	30

Tabelle 5.2: Liste von Energietechniken und ihre Hauptmerkmale; PSI für Axpo, Jahr 2030 (Bauer et al., 2008)

Energy source	Nuclear	Nuclear	Hard coal	Natural gas
Technology	European Pressurized Water Reactor (EPR), Generation III	European Pressurized Water Reactor (EPR), Generation III	Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)	Combined Cycle (CC), base load
Capacity el. [Mw _{el}]	1500	1500	450	500
Capacity th. [Mw _{th}]	-	-	-	-
Location	Switzerland (CH), Beznau	France (F), Cattenom	Germany (D), Rostock	Switzerland (CH), Birr
Operating time [full load hours per year]	8000	8000	7000	8000
Efficiency electric [%]	33.8	33.8	51.5	63.0
Lifetime [a]	60	60	30	25
Energy source	Hydro power	Biogas	Synthetic Natural Gas (SNG)	Wind power
Technology	Reservoir	Combined Heat & Power (CHP)	Combined Heat & Power (CHP)	Onshore wind park, 4 turbines
Capacity el. [Mw _{el}]	53	0.2	0.2	4 x 2
Capacity th. [Mw _{th}]	-	0.15	0.21	-
Location	Switzerland (CH), Illanz/Panix	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Mt. Crosin
Operating time [full load hours per year]	2500	7500	4500	1500
Efficiency electric [%]	89.0	41.7	42.0	n.a.
Lifetime [a]	150	15	20	20

a) Effizienz der Zelle; Moduleffizienz ist 13,2 %.

b) Durchschnittliche Effizienz der Zelle über die Lebensspanne (inkl. Degradation)

Natural gas	Natural gas	Natural gas	Natural gas	Hydro power
Combined Cycle (CC), mid load	Combined Cycle (CC), base load	Combined Heat & Power (CHP)	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	Run-of-river
500	500	0.2	0.2	51
-	-	0.21	0.11	-
Switzerland (CH), Birr	Italy (I), Naples	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Wildegg-Brugg
4000	8000	4500	4500	5720
61.0	61.0	42.0	52.0	88.9
25	25	20	15	80
Wind power	Wind power	Photovoltaic	Photovoltaic	Geothermal
Onshore wind park, 50 turbines	Offshore wind park, 80 turbines	Multicrystalline Si panel, rooftop	Amorphous Si, rooftop	Enhanced Geothermal System (EGS)
50 x 4.5	80 x 20	0.02	0.01	36
-	-	-	-	-
Germany (D), Northsea coast	Denmark (DK), HornsRev	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Baden	Switzerland (CH), Basel
2700	4000	850	850	7000
n.a.	n.a.	20.0 ^a	13.7 ^b	11.3
20	20	30	30	30

Tabelle 5.3: NEEDS Technologien für das Jahr 2050 (Schenler et al., 2008).

		1	2	3	4	5
		Nuclear Plants		Advanced Fossil		
		EPR	EFR	PC	PC-post CCS	PC-oxyfuel CCS
		European Pressurized Reactor	Sodium Fast Reactor (Gen IV Fast Breeder Reactor)	Pulverized Coal (PC) steam plant	Pulverized Coal (PC) plant with Carbon Capture & Storage (CCS), post combustion	Pulverized Coal (PC) plant with Carbon Capture & Storage (CCS), oxyfuel combustion
Characteristics	Units					
Type of fuel		U235, 4.9 %	Mixed Oxide	hard coal	hard coal	hard coal
Electric efficiency	%	0.37	0.4	0.54	0.49	0.47
Electric generation capacity	MW	1590	1450	600	500	500
Load factor (expected hours/yr)	hours/year	7916	7889	7600	7600	7600
Annual generation (expected)	kWh/year	1.26E+10	1.14E+10	4.56E+09	3.80E+09	3.80E+09
Construction time	years	4.8	5.5	3	3	3
Capital cost (net present value)	€/kWe	1498	1900	983	1560	1560
Total capital cost (net present value)	M€	2383	2756	590	780	780
Plant life	years	60	40	35	35	35
Average cost of electricity	€cents/kWhe	3.01	2.68	2.96	3.94	4.00

		13	14	15	16	17
		GTCC	GTCC CCS	IC CHP	Fuel Cells	
					MCFC NG	MCFC wood gas
		Combined Cycle	Combined Cycle with Carbon Capture & Storage (CCS), post combustion	IC engine cogeneration	Molten Carbonate Fuel Cells, natural gas	Molten Carbonate Fuel Cells, wood gas
Characteristics	Units					
Type of fuel		natural gas	natural gas	natural gas	natural gas	wood gas
Electric efficiency	%	0.65	0.61	0.44	0.5	0.5
Electric generation capacity	MW	1000	1000	0.2	0.25	0.25
Load factor (expected hours/yr)	hours/year	7200	7200	5000	5000	5000
Annual generation (expected)	kWh/year	7.20E+09	7.20E+09	1.00E+06	1.25E+06	1.25E+06
Construction time	years	3	3	1	0.83	0.83
Capital cost (net present value)	€/kWe	440	615	879	1544	1544
Total capital cost (net present value)	M€	440	615	0	0	0
Plant life	years	25	25	20	5	5
Average cost of electricity	€cents/kWhe	5.99	8.69	11.10	8.74	8.44

6	7	8	9	10	11	12
PL	PL-post CCS	PL-oxyfuel CCS	Integrated Gasification Combined Cycle			
Pulverized Lignite (PL) steam plant	Pulverized Lignite (PL) plant with Carbon Capture & Storage (CCS), post combustion	Pulverized Lignite (PL) plant with Carbon Capture & Storage (CCS), oxyfuel combustion	IGCC coal	IGCC coal CCS	IGCC lig	IGCC lig CCS
			Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)	Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) with Carbon Capture & Storage (CCS)	Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)	Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) with Carbon Capture & Storage (CCS)
lignite	lignite	lignite	hard coal	hard coal	lignite	lignite
0.54	0.49	0.47	0.545	0.485	0.525	0.465
950	800	800	450	400	450	400
7760	7760	7760	7500	7500	7500	7500
7.37E+09	6.21E+09	6.21E+09	3.38E+09	3.00E+09	3.38E+09	3.00E+09
3	3	3	3	3	3	3
989	1560	1560	1209	1505	1209	1209
939	1248	1248	544	602	544	483
35	35	35	35	35	35	35
3.01	4.08	4.16	6.17	7.26	6.57	6.78

18	19	20	21	22	23	24	25	26
MCFC NG	SOFC NG	Biomass CHP		Solar				Wind
Molten Carbonate Fuel Cells, natural gas	Solid Oxide Fuel Cells (tubular, natural gas)	CHP poplar	CHP straw	PV-Si plant	PV-Si building	PV-CdTe building	Solar thermal	Wind-off-shore
		Steam turbine cogeneration, short rotation forestry poplar	Steam turbine cogeneration, agricultural waste wheat straw	PV, Monocrystalline Si, Plant Size	PV, Monocrystalline Si, Building Integrated	CdTe, Building Integrated	Concentrating solar thermal power plant	Wind
natural gas	natural gas	SRF poplar	waste straw	sun	sun	sun	sun	wind
0.55	0.58	0.3	0.3	0	0	0	0.185	0
2	0.3	9	9	46.6375	0.419738	0.839475	400	24
5000	5000	8000	8000	984	984	984	4518	4000
1.00E+07	1.50E+06	7.20E+07	7.20E+07	4.59E+07	4.13E+05	8.26E+05	1.81E+09	9.60E+07
0.83	0.83	2	2	2	0.5	0.5	3	2
1235	1030	2280	2280	848	927	927	3044	1130
2	0	21	21	40	0	1	1217	27
5	5	15	15	40	40	35	40	30
7.29	6.73	7.29	6.51	6.30	6.92	7.15	6.31	7.27

5.2.3 Kriterien und Indikatoren

Für die Beurteilung wurde das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit herangezogen, das die Bereiche Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft abdeckt. Dieses Modell ermöglicht die praktische Operationalisierung des allgemeinen Konzepts der Nachhaltigkeit gemäss dem Brundtland-Bericht und den in Kapitel 5.1 erläuterten qualitativen Regeln.

Das PSI hat im Rahmen des NEEDS-Projekts mit Unterstützung seiner Partner (Hirschberg et al., 2008) einen umfassenden Katalog technologie-spezifischer Beurteilungskriterien und Indikatoren erarbeitet, der die ökologische, ökonomische und soziale Dimension der Nachhaltigkeit abdeckt. Ein Teil dieses Katalogs basiert auf Literaturrecherche-Ergebnissen und auf quantitativen Nachhaltigkeitsbeurteilungen früherer Projekte. Die sozialen Kriterien und Indikatoren wurden, unter Zugrundelegung der Pionierarbeit der Universität Stuttgart im Rahmen der Axpo-Studie (Roth et al., 2009), weiterentwickelt und angepasst (Renn et al., 2006).

Der Gesamtkatalog ermöglicht es, die wesentlichen Merkmale der Technologien zu erfassen und ihre Unterschiede herauszustellen. Grundsätzlich sties- sen die vorgeschlagenen Kriterien und Indikatoren, wie eine Umfrage (Burgherr et al., 2008) zeigt, unter den europäischen Interessenvertretern sowohl inhaltlich als auch hinsichtlich ihrer hierarchischen Struktur auf breite Zustimmung. Die Zahl der dazugehörigen Indikatoren beläuft sich auf 36, die sich wie folgt verteilen:

- 11 ökologische Indikatoren zur Abdeckung der Bereiche Energieressourcen und Bodenschätze, Klimawandel, Auswirkungen auf das Ökosystem bei normalem Betrieb bzw. im Falle eines schweren Unfalls, sowie spezielle chemische und mittel- sowie hochradioaktive Abfälle.
- 9 ökonomische Indikatoren wie zum Beispiel Auswirkungen für Kunden (Strompreis), die Gesamtwirtschaft (Beschäftigung, Stromerzeugungsaunomie) und Energieversorger (finanzielle Risiken, Betrieb).

- 16 soziale Indikatoren bezüglich Sicherheit/Zuverlässigkeit der Energieversorgung, politische Stabilität und Legitimität, sowohl expertenbasierte als auch wahrgenommene gesellschaftliche und individuelle Risiken (Normalbetrieb und Unfälle) als auch auf Ebene der subjektiven Wahrnehmung, terroristische Bedrohung und Wohnumfeldqualität (Landschaftsbild, Lärm).

Die Tabellen 5.4 bis 5.6 enthalten die Definitionen der für NEEDS angewendeten Kriterien und Indikatoren (Hirschberg et al., 2008).

In der Axpo-Studie (Roth et al., 2009) gab es insgesamt 75 Indikatoren: 11 ökologische, 33 soziale und 31 ökonomische. Die höhere Anzahl der Indikatoren ergab sich hauptsächlich aus der stärkeren Berücksichtigung von Energieversorger- und Standort-spezifischen Faktoren sowie operativen und makroökonomischen Aspekten.

Zu erwähnen ist, dass die Anzahl der Indikatoren für die jeweilige Nachhaltigkeitsdimension nichts über ihre relative Bedeutung aussagt. Erstens werden dem hier zugrunde gelegten Nachhaltigkeitsverständnis zufolge allen drei Dimensionen gleich viel Bedeutung beigemessen. Zweitens spiegelt die Anzahl der Indikatoren, dass es möglich ist, ökologische Indikatoren auf der Grundlage objektiver, den Naturwissenschaften entlehnter Methoden zu aggregieren. Eine solche Aggregation sozialer Indikatoren ist dagegen nur in wenigen Fällen möglich.

5.2.3 Quantifizierungsansätze

Um die Transparenz und systematische Nutzung der objektiven Wissensbasis zu verbessern, wurde am Paul Scherrer Institut (PSI) ein Bezugssystem für die systematische vergleichende Evaluation von Energiesystemen entwickelt. Dieses ermöglicht es, kritische Aspekte der technologischen Alternativen im Verhältnis zu den für politische Strategien als relevant betrachteten wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Dimensionen zu untersuchen. Wenngleich es Unterschiede bei Detaillierungsgrad, Umfang und Tiefe gibt, wurden die meisten Teile dieses Bezugssystems im Wesentlichen sowohl für die Axpo- als auch die NEEDS-Projekte verwendet (vgl. Abb. 5.1).

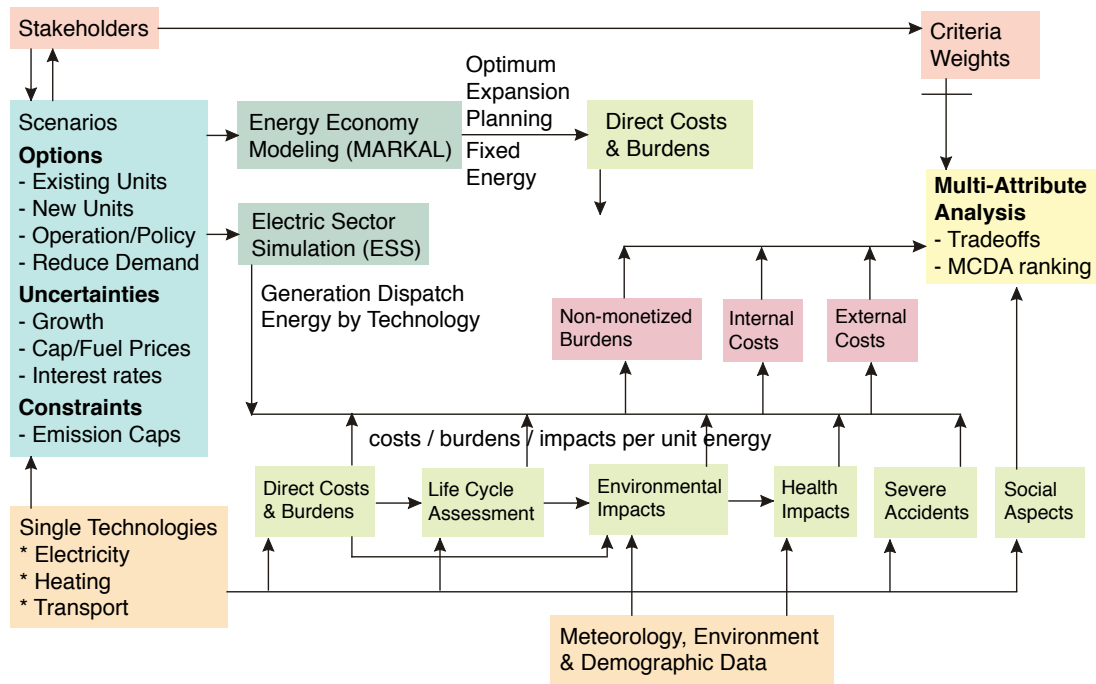


Abbildung 5.1: PSI-Bezugssystem für umfassende Energiesystemanalyse

Der interdisziplinäre Ansatz bezieht verschiedenste Forschungsgebiete ein, unter anderem die Lebenszyklus-Analyse (LCA), die Analyse von Umweltverträglichkeit und externen Kosten, Systemmodellierung und integrale Bewertung mithilfe der Gesamtkosten- und der Multi-Kriterien-Analyse (MCDA) unter Verwendung ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Indikatoren. Der integrale Ansatz ermöglicht umfassende Studien zum Vergleich von Energieoptionen für den Elektrizitäts-, Wärme- und Transportsektor. Die in diesem Kapitel aufgeführten quantitativen Indikatoren basieren hinsichtlich der Beurteilung von Energiesystemen, soweit möglich, auf einer systematischen, multidisziplinären Bottom-Up-Methode. Dies gilt insbesondere für die komplexen ökologischen Indikatoren. Der Gesamtansatz ist prozessorientiert, d.h. die betreffenden Technologien und ihre Merkmale werden explizit dargestellt. In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten angewandten Ansätze kurz erläutert.

Lebenszyklus-Analyse

Die Lebenszyklus-Analyse (LCA) wird zur Generierung von Indikatoren verwendet, welche die

Belastungen und Auswirkungen des Normalbetriebs auf Ökosysteme charakterisieren. Die LCA ist eine systematische Methode für die Erstellung von Energie- und Materialbilanzen der verschiedenen Energieketten. Sie verwendet eine für die Arten der im jeweiligen Prozess verwendeten Brennstoffe spezifische Prozesskettenanalyse und ermöglicht die vollständige Einbeziehung von Belastungen wie Emissionen, auch jenseits der Landesgrenzen. Bei der LCA werden nicht nur direkte Emissionen aus dem Bau, dem Betrieb und der Stilllegung von Kraftwerken, sondern auch Umweltlasten im Zusammenhang mit dem kompletten Lebenszyklus aller relevanten vor- und nachgelagerten Prozesse innerhalb der Energiekette berücksichtigt, darunter Exploration, Förderung, Aufarbeitung, Transport sowie Abfallbehandlung und -lagerung. Direkte Emissionen beinhalten unter anderem Ausstöße aus dem Betrieb von Kraftwerken, Minen und verarbeitenden Betrieben, Transportsystemen und Baumaschinen. Auch indirekte Emissionen, die aus der Materialherstellung – vom Energieinput bis hin zu allen Schritten der Kette – und aus der Infrastruktur stammen, sind abgedeckt.

Tabelle 5.4: Ökologische Kriterien / Indikatoren

Kriterium/Indikator	Beschreibung	Einheit
UMWELT	Umweltrelevante Kriterien	
RESSOURCEN	Ressourcenverbrauch (nicht erneuerbar)	
Energie	Energieressourcenverbrauch im Laufe des gesamten Lebenszyklus	
Fossile Brennstoffe	Dieses Kriterium dient der Berechnung der Gesamtprimärenergie der für die Erzeugung von 1 kWh Strom verbrauchten fossilen Ressourcen. Dies beinhaltet den Gesamtverbrauch an Kohle, Erdgas und Rohöl für die jeweilige komplette Stromerzeugungstechnologiekette.	MJ/kWh
Uran	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung der für die Erzeugung von 1 kWh Strom verbrauchten Primärenergie aus Uran-Ressourcen. Hierin enthalten ist der Gesamt-Uranverbrauch für die jeweilige komplette Stromerzeugungstechnologiekette.	MJ/kWh
Mineralische Rohstoffe	Verbrauch mineralischer Ressourcen im Laufe des gesamten Lebenszyklus	
Metallerz	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung des Verbrauchs bestimmter seltener Metalle für die Erzeugung von 1 kWh Strom. Der Verbrauch aller einzelnen Metalle wird in Antimon-Äquivalenten angegeben (basierend auf der Seltenheit des jeweiligen Erzes in Relation zu Antimon).	kg(Sb-eq.)/kWh
KLIMA	Potenzielle Auswirkungen auf das Klima	
CO ₂ -Emissionen	Dieses Kriterium beinhaltet die Gesamtmenge aller Treibhausgase, angegeben in kg CO ₂ -Äquivalent.	kg(CO ₂ -eq.)/kWh
ÖKOSYSTEME	Potenzielle Auswirkungen auf Ökosysteme	
Normalbetrieb	Auswirkungen auf das Ökosystem bei Normalbetrieb	
Biodiversität	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung der durch die Landnutzung zur Erzeugung von 1 kWh Strom verursachten Artenverluste (Flora & Fauna). Die in PDF («Potentially Damaged Fraction») angegebene Anzahl potenziell geschädigter Arten wird mit der Landfläche und den Jahren multipliziert.	PDF*m ² *a/kWh

Ökotoxizität	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung der zur Erzeugung von 1 kWh Strom verursachten Artenverluste (Flora & Fauna) aufgrund ökotoxischer Substanzen, die in die Luft, in Wasser und ins Erdreich gelangen. Die in PDF («Potentially Damaged Fraction») angegebene Anzahl potenziell geschädigter Arten wird mit der Landfläche und den Jahren multipliziert.	PDF*m ² *a/kWh
Luftverschmutzung	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung der durch Übersäuerung und Eutrophierung verursachten Artenverluste (Flora & Fauna) pro erzeugter kWh Strom. Die in PDF («Potentially Damaged Fraction») angegebene Anzahl potenziell geschädigter Arten wird mit der Landfläche und den Jahren multipliziert.	PDF*m ² *a/kWh
Schwere Unfälle	Auswirkungen auf das Ökosystem im Falle eines schweren Unfalls	
Kohlenwasserstoffe	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung grosser, potenziell Ökosystem-schädigender Mengen (mind. 10 000 Tonnen) unbeabsichtigt austretender Kohlenwasserstoffe.	t/kWh
Bodenkontaminierung	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung der Fläche, die bei einem Unfall durch die Freisetzung radioaktiver Isotope kontaminiert wird. Die kontaminierte Fläche wird mittels probabilistischer Sicherheitsanalyse (PSA) geschätzt. Hinweis: nur bei nuklearen Stromerzeugungstechnologieketten.	km ² /kWh
ABFALL	Potenzielle durch Abfälle verursachte Auswirkungen	
Chemische Abfälle	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung der für die Erzeugung von 1 kWh Strom anfallenden Gesamtmenge von in Untertageponien gelagerten chemischen Abfällen. Die Dauer der Einlagerung wird dabei nicht berücksichtigt.	kg/kWh
Radioaktive Abfälle	Dieses Kriterium dient der Quantifizierung des Volumens der für die Erzeugung von 1 kWh Strom anfallenden, in Untertageponien gelagerten mittel- und hochradioaktiven Abfälle. Die Dauer der Einlagerung wird dabei nicht berücksichtigt.	m ³ /kWh

Quelle: Hirschberg et al., 2008

Tabelle 5.5: Ökonomische Kriterien / Indikatoren

Kriterium/Indikator	Beschreibung	Einheit
WIRTSCHAFT	Wirtschaftsbezogene Kriterien	
KUNDEN	Wirtschaftliche Auswirkungen auf Kunden	
Erzeugungskosten	Dieses Kriterium gibt die durchschnittlichen Erzeugungskosten pro Kilowattstunde an (kWh). Es enthält die Investitionskosten des Werks, (Brennstoff), sowie Kosten für Betrieb und Wartung. Dabei handelt es sich nicht um den Endpreis.	€/MWh
GESELLSCHAFT	Wirtschaftliche Auswirkungen auf die Gesellschaft	
Direkte Arbeitsplätze	Das Kriterium gibt die Zahl der direkt mit dem Bau und dem Betrieb der Erzeugungstechnologie verbundenen Arbeit an, inklusive der mit der Förderung, der Gewinnung oder dem Transport von Brennstoffen (sofern zutreffend) verbundenen direkten Arbeit. Indirekte Arbeit ist nicht berücksichtigt. Gemessen in Personenjahre/GWh.	Personenjahre/GWh
Brennstoffautonomie	Die elektrische Leistung kann anfällig für Versorgungsunterbrechungen sein, wenn importierte Brennstoffe aufgrund wirtschaftlicher oder politischer Probleme im Zusammenhang mit der Energieressourcenverfügbarkeit nicht zur Verfügung stehen. Hierbei handelt es sich um ein expertenbasiertes Vulnerabilitäts-Mass.	Ordinal
VERSORGUNGSBETRIEB	Wirtschaftliche Auswirkungen auf Versorgungsunternehmen	
Finanzen	Finanzielle Auswirkungen auf Versorgungsunternehmen	
Finanzierungsrisiko	Versorgungsunternehmen können einem erheblichen Finanzierungsrisiko ausgesetzt sein, wenn die Gesamtkosten für neue Stromerzeugungsanlagen im Verhältnis zur Unternehmensgrösse sehr hoch sind. Möglicherweise ist es erforderlich, Partnerschaften mit anderen Versorgungsunternehmen zu schliessen oder Kapital über Finanzmärkte zu beschaffen.	€
Brennstoffsensitivität	Der Anteil der Brennstoffkosten an den Gesamterzeugungskosten kann bei Null liegen (Photovoltaik), gering (Kernkraft) oder auch hoch (Gasturbinen) sein. Er gibt somit an, wie empfindlich die Erzeugungskosten auf eine Brennstoffpreisänderung reagieren würden.	Faktor

Bauzeit	Sobald ein Versorgungsunternehmen mit dem Bau eines Werks begonnen hat, gerät es ins Blickfeld öffentlicher Opposition, was zu Verzögerungen und anderen Problemen führen kann. Dieser Indikator gibt die voraussichtliche Werkbauzeit in Jahren an. Planungs- und Genehmigungsphase sind nicht berücksichtigt.	Jahre
Betrieb	Faktoren im Zusammenhang mit der Nutzung einer Technologie durch ein Versorgungsunternehmen.	
Grenzkosten	Erzeugungsunternehmen setzen ihre Werke in Abhängigkeit von ihren variablen Kosten in Betrieb, angefangen bei Grundlastwerken mit den geringsten Kosten bis hin zu solchen mit den höchsten Kosten zu Spitzenlastzeiten. Diese variablen Kosten sind die Kosten, die für das Betreiben des Werks anfallen.	€-Cents/kWh
Flexibilität	Versorgungsunternehmen benötigen Prognosen für die Stromerzeugung, die sie nicht steuern können (erneuerbare Ressourcen wie Wind und Sonne) und die erforderlichen Ein- und Abschaltzeiten für die von ihnen steuerbaren Werke. Dieser Indikator kombiniert diese beiden Planungsflexibilitäts-Masse anhand von Beurteilungen durch Experten.	Ordinal
Verfügbarkeit	Bei allen Technologien kann es aufgrund von Störungen der Anlagen (störungsbedingte Nichtverfügbarkeit) oder von Wartungsaktivitäten (nicht störungsbedingte oder geplante Nichtverfügbarkeit) zu Ausfällen von Werken oder teilweisen Ausfällen (Erzeugung weniger als 100%) kommen. Dieser Indikator gibt Aufschluss über den zeitlichen Anteil, den das Kraftwerk für die Stromerzeugung zur Verfügung steht.	Faktor

Quelle: Hirschberg et al., 2008

Tabelle 5.6: Soziale Kriterien / Indikatoren

Kriterium/Indikator	Beschreibung	Einheit
GESELLSCHAFT	Gesellschaftsbezogene Kriterien (Quellen: NEEDS Research Stream 2b Umfrage unter Gesellschaftsexperten. PSI-Risikodatenbank-basiertes quantitatives Risiko.)	
SICHERHEIT	Soziale Sicherheit	
Politische Kontinuität	Politische Kontinuität	
Sicherheit der Energieversorgung	Marktkonzentrierung von Energieversorgern im jeweiligen Primärenergiesektor, die zu ökonomischen oder politischen Umbrüchen führen könnten.	Ordinalskala
Einlagerung von Abfällen	Die Möglichkeit, dass nicht rechtzeitig Deponieeinrichtungen für die Einlagerung von Abfallstoffen aus dem gesamten Lebenszyklus zur Verfügung stehen.	Ordinalskala
Anpassungsfähigkeit	Technische Eigenschaften der jeweiligen Technologie, die ihren flexibeln Einsatz bei der Umsetzung technischer Fortschritte und Neuerungen ermöglichen.	Ordinalskala
POL. LEGITIMITÄT	Politische Legitimität	
Konflikt	Bezieht sich auf Konflikte, die sich historisch belegen lassen. Steht in Zusammenhang mit Eigenschaften konfliktauflösender Energiesysteme.	Ordinalskala
Partizipation	Bestimmte Arten von Technologien erfordern öffentliche, partizipative Entscheidungsfindungsprozesse, insbesondere hinsichtlich der Bau- und Betriebsgenehmigungen.	Ordinalskala
RISIKO	Risiko	
Normales Risiko	Normales Betriebsrisiko	
Mortalität	Aufgrund des Normalbetriebs verlorene Lebensjahre durch vorzeitigen Tod in der Gesamtbevölkerung (Years of life lost, YOLL) im Vergleich zu einem Zustand ohne die entsprechende Technologie.	YOLL/kWh

Morbidität	Behinderungsbereinigte Lebensjahre (Disability adjusted life years, DALY) der Gesamtbevölkerung aufgrund des Normalbetriebs im Vergleich zu einem Zustand ohne die entsprechende Technologie.	DALY/kWh
Schwere Unfälle	Risiko schwerer Unfälle (Quelle: NEEDS Research Stream 2b für Daten zu schweren Unfällen)	
Unfallmortalität	Anzahl der pro kWh Strom erwarteten Todesfälle bei schweren Unfällen mit fünf oder mehr Toten pro Unfall.	Todesfälle/kWh
Maximale Todesfälle	Basiert auf der angemessenen glaubwürdigen Höchstzahl von Todesfällen für einen einzelnen Unfall für eine Stromerzeugungstechnologiekette.	Todesf./Unfall
Wahrgenommenes Risiko	Wahrgenommenes Risiko	
Normalbetrieb	Angst der Bürger/-innen vor Gesundheitsschäden bei Normalbetrieb der Stromerzeugungstechnologie.	Ordinalskala
Wahrgenommene Unf.	Wahrnehmung der Bürger/-innen von Risikoeigenschaften, der persönlichen Kontrolle darüber, Umfang möglicher Schäden sowie ihre Vertrautheit mit dem Risiko.	Ordinalskala
Terrorismus	Gefahr durch Terrorismus	
Terroristisches Potenzial	Möglichkeit eines erfolgreichen terroristischen Anschlags auf eine Technologie. Basiert auf ihre Vulnerabilität, möglichen Schäden und der öffentlichen Risikowahrnehmung.	Ordinalskala
Terroristische Auswirkungen	Mögliche maximale Folgen eines erfolgreichen terroristischen Anschlags. Speziell für unwahrscheinliche Unfälle mit weitreichenden Folgen.	Erw. Todesfälle
Proliferation	Potenzial für den Missbrauch von Technologien oder Substanzen aus der Kernenergieerzeugungstechnologiekette.	Ordinalskala
WOHNUMGEBUNG	Qualität der Wohnumgebung	
Landschaft	Funktionale und ästhetische Auswirkungen der gesamten Technologie und Brennstoffkette auf die Landschaft. Hinweis: Verkehr ausgeschlossen.	Ordinalskala
Lärm	Dieses Kriterium basiert auf dem durch das Kraftwerk und den Materialtransport für das Lager verursachten Lärmaufkommen.	Ordinalskala

Quelle: Hirschberg et al., 2008

Als Hintergrunddatenbank wird die ecoinvent-Datenbank herangezogen (www.ecoinvent.ch). Ecoinvent ist die weltweit umfangreichste zentralisierte, webbasierte Datenbank für Lebenszyklus-Analysen (LCA), die vom Schweizer Zentrum für Ökoinventare (EMPA, EPFL, ETHZ, FAL, PSI) entwickelt und implementiert und von verschiedenen Schweizer Bundesämtern unterstützt wurde.

Wirkungspfadansatz

Die LCA berücksichtigt keine standortspezifischen Abhängigkeiten. Die Quantifizierung von Gesundheits- und Umweltschäden, die auf Luftverschmutzung aus Energieketten zurückzuführen sind, basiert auf dem innerhalb der ExternE-Reihe entwickelten modernen Wirkungspfadansatz (Impact Pathway Approach/IPA) (Friedrich et al., 2004; Rabl und Spadaro, 2005).

Der IPA umfasst vier Schritte: 1. Abschätzung der Emissionen, 2. Abschätzung der Änderungen in der Konzentration von Schadstoffen, 3. Beurteilung der Wirkung auf Rezeptoren wie Menschen, Tiere, Pflanzen etc. und 4. Bewertung: Für die Bewertung der Wirkungen werden bei der Externkosten-Methode monetäre Werte verwendet. Der IPA wurde für die Referenzkraftwerk-Technologien an bestimmten, hauptsächlich in der Schweiz angesiedelten Standorten angewandt. Für die damit verbundenen Brennstoffkreisläufe werden Faktoren regionaler Schäden herangezogen.

Bewertung des Risikos eines schweren Unfalls

Die Risikoanalyse für schwere Unfälle deckt, sofern anwendbar, die kompletten Energieketten ab. Mit Ausnahme der Kernenergie stützt sich die Bewertung hauptsächlich auf zurückliegende Erfahrungen mit Unfällen unter Heranziehung der vom PSI entwickelten ENSAD (Energy-related Severe Accident Database). ENSAD ist die weltweit grösste und detaillierteste Datenbank zu schweren Unfällen im Energiebereich (Hirschberg et al., 2004, Burgherr und Hirschberg, 2008).

Die meisten Unfallindikatoren für heutige Technologien stammen aus ENSAD, wobei Anpassungen zur

Berücksichtigung der Effizienz der Referenztechnologien und Eigenschaften der entsprechenden Energieketten vorgenommen wurden. Bei den erneuerbaren Energien beruhen die Unfallrisikoabschätzungen mit Ausnahme der Staudämme teilweise auf der Literatur und teilweise auf eigenen Schätzungen. Die Schätzungen für die Jahre 2030 und 2050 werden von einer Trendanalyse der historischen Daten und Extrapolation in die Zukunft gestützt.

Die Abschätzung der Folgen hypothetischer wasserkraftbezogener Unfälle berücksichtigt standortspezifische Faktoren unter Verwendung einer Formel, die auf von zurückliegenden Erfahrungen mit Dammunfällen abgeleiteten Parametern basiert. Für hypothetische Nuklearunfälle wird die probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) herangezogen, die auf in der Literatur veröffentlichten (und gegebenenfalls an die spezifischen Designs angepassten) Quelltermen und einen vereinfachten, zu einem früheren Zeitpunkt (Hirschberg et al., 2003) veröffentlichten Folgenabschätzungs-Ansatz aufbaut.

Weitere angewandte Ansätze

Wirtschaftliche Indikatoren stützen sich auf umfassende Literaturstudien, ein Net Present Value Model, Input aus der Industrie und, sofern angemessen, auf Expertenmeinungen. Die meisten der gesellschaftlichen Indikatoren wurden anhand einer Umfrage unter Experten in den Bereichen Energietechnologien, Nachhaltigkeit, Energiepolitik und Risikoanalyse quantifiziert. Diese Erhebung beinhaltete auch eine abschliessende Delphi-Befragung der Experten.

5.2.4 Beispiele für messbare Indikatoren

Die hier aufgeführten Beispiele für ausgewählte ökologische, wirtschaftliche und soziale Indikatoren beziehen sich auf eine Reihe ausgewählter Technologien. Die Ergebnisse stammen aus dem Energie-Spiegel Nr. 20 (Hirschberg et al., 2010) und stützen sich auf die NEEDS- und Axpo-Projekte mit adäquaten, die jüngsten Entwicklungen widerspiegelnden Modifikationen. «Heute» bezieht sich in allen Abbildungen auf den Stand der Technologien um das Jahr 2005.

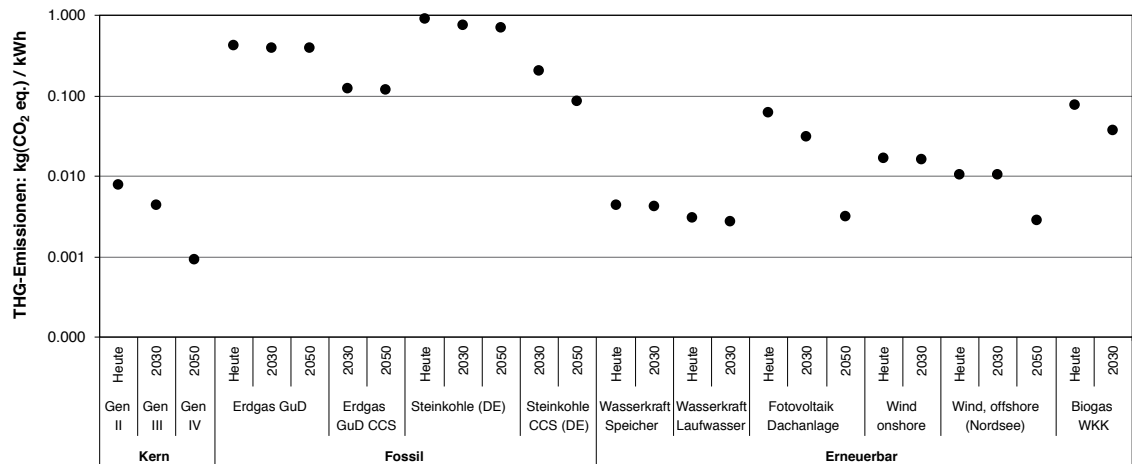


Abbildung 5.2: Treibhausgasemissionen von ausgewählten Technologien (Hirschberg et al., 2010).

Die erneuerbaren Energien und die Kernenergie erzeugen Treibhausgasemissionen, die eine bis zwei Größenordnungen tiefer liegen als bei fossilen Technologien ohne CCS (vgl. Abb. 5.2). CCS hat das Potenzial, die Emissionen um bis zu einer Größenordnung zu reduzieren.

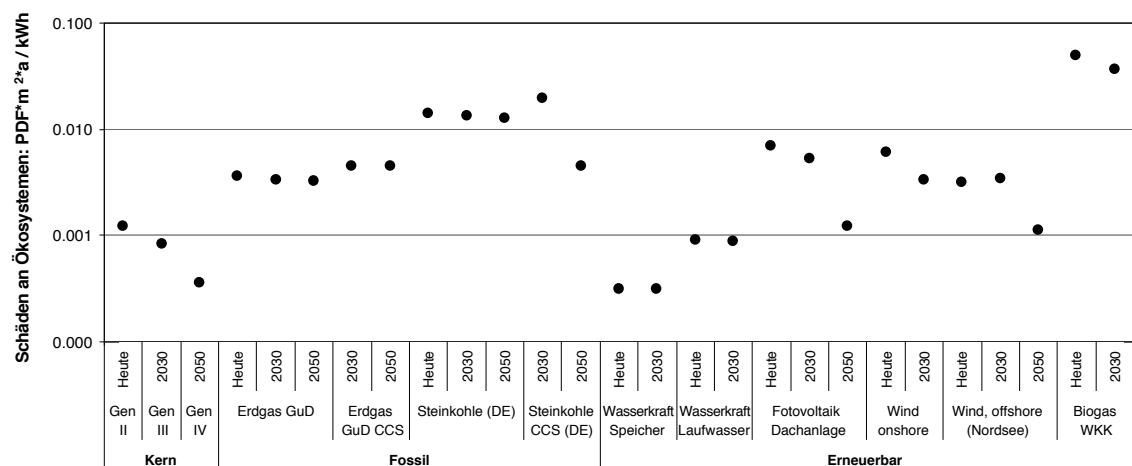


Abbildung 5.3: Schäden an Ökosystemen von ausgewählten Technologien: «Potentially Damaged Fraction» (PDF) von Arten quantifiziert den Artenverlust (Flora und Fauna) aufgrund von Landverbrauch, in die Luft abgegebene ökotoxische Substanzen, Wasser und Boden, sowie Versauerung und Eutrophierung (Hirschberg et al., 2010).

Die Schäden an Ökosysteme sind bei Biogasanlagen am höchsten, gefolgt von Kohlekraftwerken (vgl. Abb. 5.3). Die Wasserkraft aus Speicherseen bewirkt die geringsten Schäden.

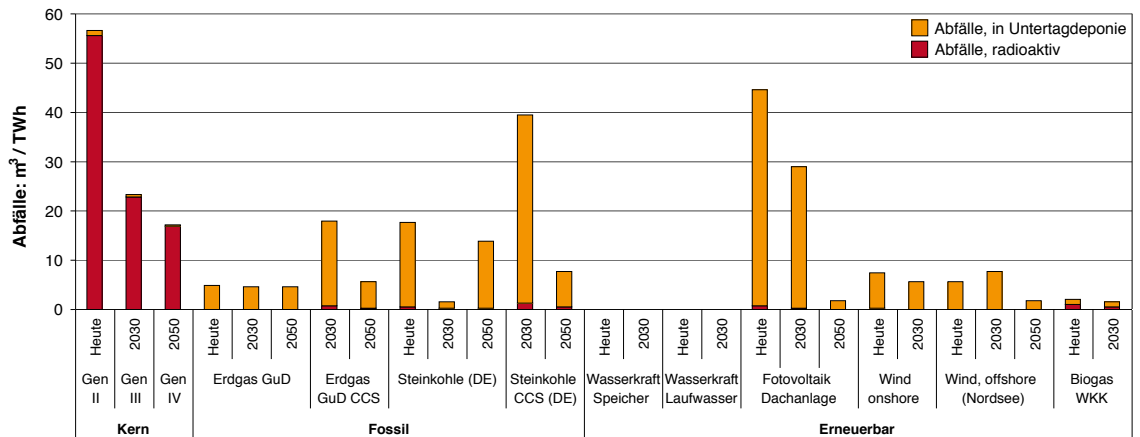


Abbildung 5.4: Mittel- und hochradioaktive Abfälle sowie Chemieabfälle, die in Untertagedeponien gelagert werden (Hirschberg et al., 2010).

Die Kernenergie produziert naturgemäss am meisten radioaktive Abfälle. Die meisten nicht-radioaktiven Sonderabfälle fallen bei Photovoltaik an. Es wird jedoch erwartet, dass diese Abfallmengen in Zukunft stark reduziert werden können (vgl. Abb. 5.4). Die Wasserkraft produziert am wenigsten Abfälle.

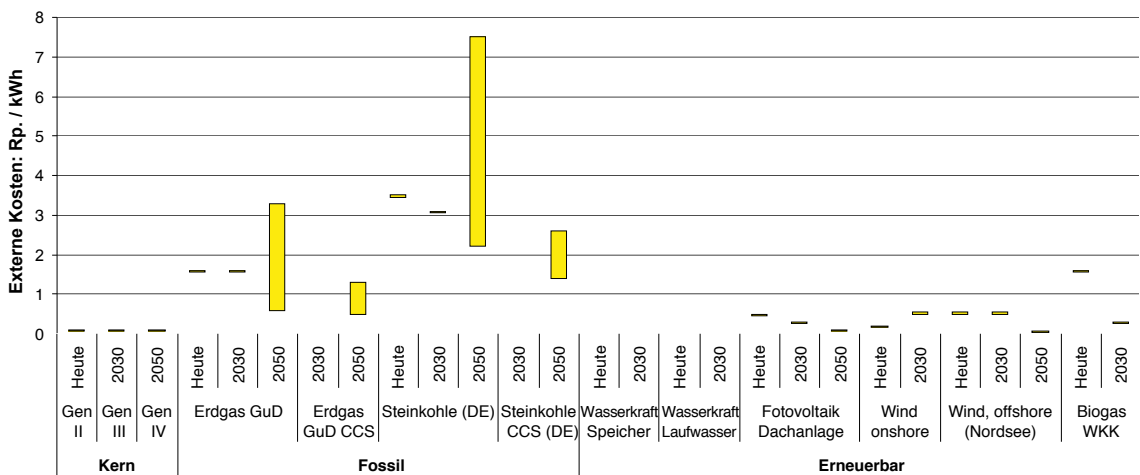


Abbildung 5.5: Externe Umweltkosten von ausgewählten Technologien, vor allem betreffend Klimagasen und Luftverschmutzung (Hirschberg et al., 2010). Externe Kosten von Kernenergie werden kontrovers betrachtet, da einige Stakeholder deren Relevanz in Frage stellen. Dies, weil sich in den Kosten Aspekten wie Risikowahrnehmung und -aversion nicht widerspiegeln.

Kohlekraftwerke verursachen die höchsten externen Kosten (aufgrund der Treibhausgasemissionen) (vgl. Abb. 5.5). Die Reduktion der Umweltkosten bei Biogas ist darauf zurückzuführen, dass dank technologischen Entwicklungen viel tiefere NO_x -Emissionen entstehen werden. Die externen Kosten der Kernenergie werden in Abschnitt 5.2.5 kommentiert.

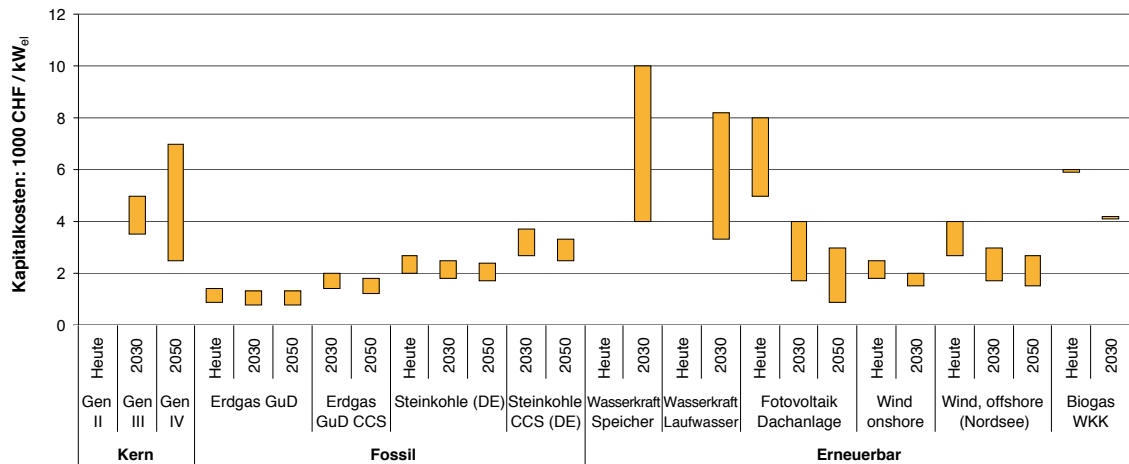


Abbildung 5.6: Kapitalkosten von ausgewählten Technologien. Historische Kapitalkosten von Kern- und Wasserkraftwerken, die heute in der Schweiz in Betrieb sind, werden nicht gezeigt (Hirschberg et al., 2010).

Die grösste Reduktion der Kapitalkosten wird bei der Photovoltaik erwartet (vgl. Abb. 5.6). Die Kapitalkosten für Kernenergie, Photovoltaik und Wasserkraft beinhalten die grössten Unsicherheiten, wenn auch unterschiedlicher Art. Während für Kernenergie die Umstände bei der Umsetzung entscheidend sind, hängen die Unsicherheiten bei der Wasserkraft zum grössten Teil von Merkmalen der Anlage ab und bei Photovoltaik in der erfolgreichen Umsetzung möglicher Verbesserungen.

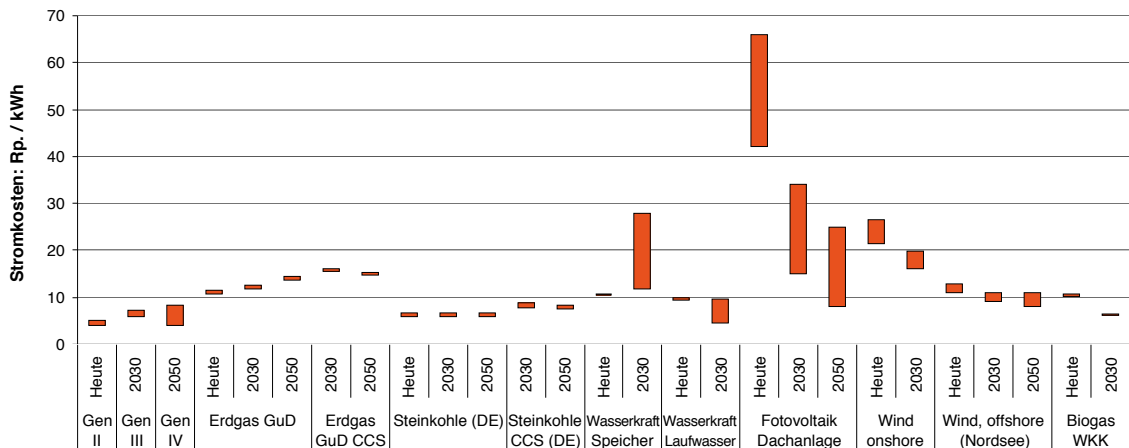


Abbildung 5.7: Stromkosten von ausgewählten Technologien; Zins 6 % (Hirschberg et al., 2010).

In den aktuellen Stromgestehungskosten der Kernenergie und Wasserkraft widerspiegelt sich der Umstand, dass die Kapitalkosten teilweise schon amortisiert sind (vgl. Abb. 5.7). Reduktionen in Kapitalkosten und ihre Unsicherheiten zeigen sich in den Produktionskosten. Da Kapitalkosten die Kosten bei Photovoltaik und künftiger Wasserkraft dominieren, sind die Unsicherheiten in den Produktionskosten bei diesen Technologien am höchsten. Unsicherheiten bei der Entwicklung der Treibstoffpreise wurden nicht berücksichtigt.

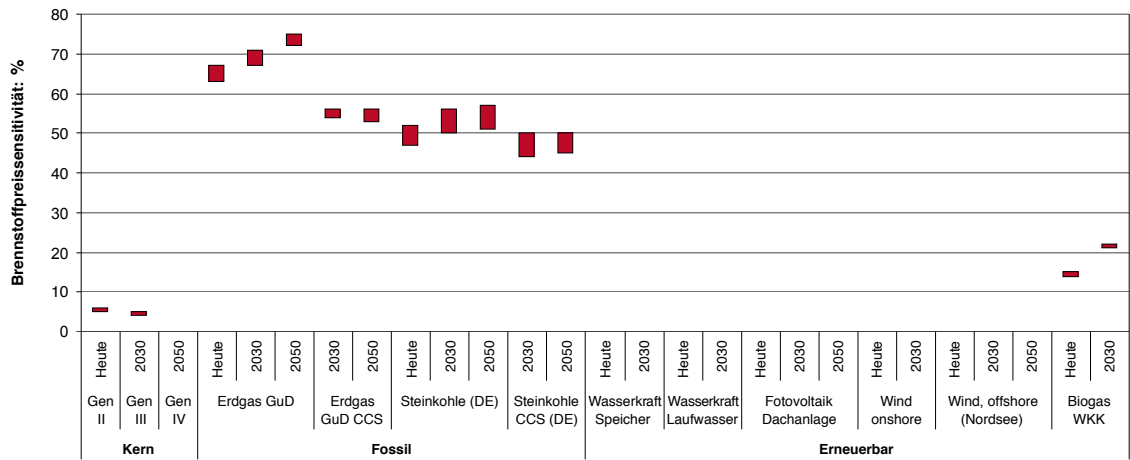


Abbildung 5.8: Brennstoffpreissensitivität (Hirschberg et al., 2010)

Fossile Technologien, vor allem Combined Cycle Gas, zeigen eine sehr hohe Brennstoffpreissensitivität (vgl. Abb. 5.8). Bei der Kernenergie ist diese Sensitivität bei schnellen Brütern sehr gering oder vernachlässigbar. Erneuerbare Energien – mit der Ausnahme von Biomasse – sind praktisch unabhängig von Brennstoffpreisen.

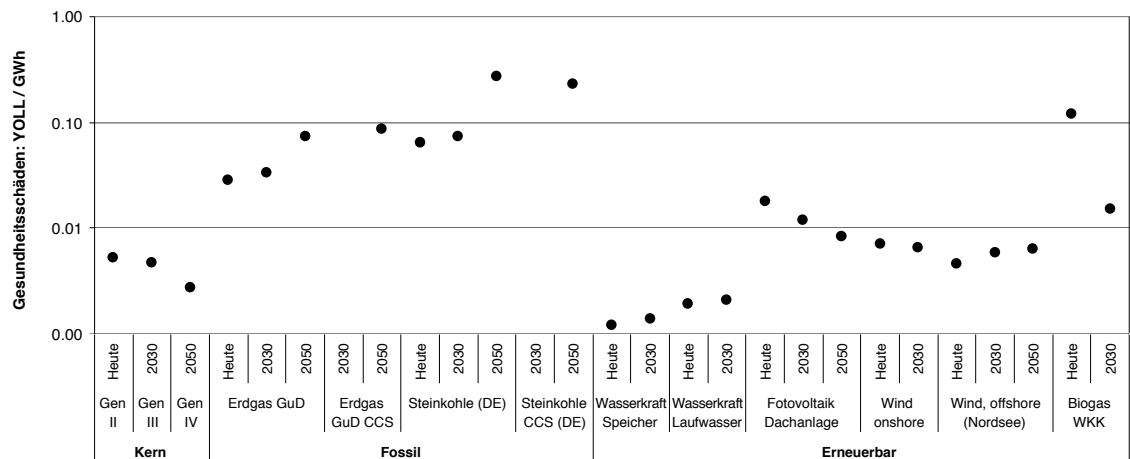


Abbildung 5.9: Gesundheitsschäden bei Normalbetrieb ausgedrückt als Verlust an Lebensjahren pro GWh (Hirschberg et al., 2010).

Wasserkraft bewirkt die geringsten Gesundheitsschäden, gefolgt von Kernenergie und Windenergie (vgl. Abb. 5.9). Kohle und momentan auch Biogas haben die grössten geschätzten Gesundheitsschäden. Im Fall von Biogas besteht ein grosses Reduktionspotenzial.

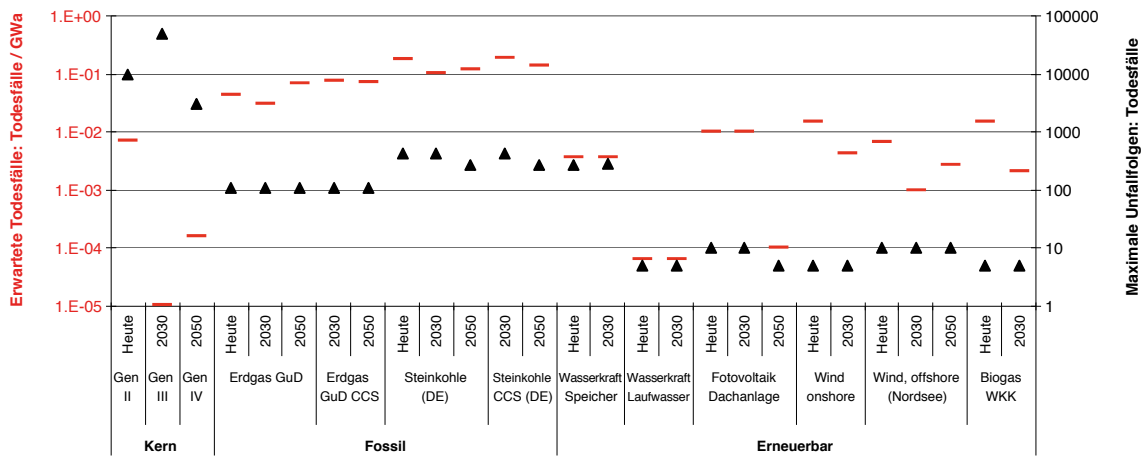


Abbildung 5.10: Erwartete Todesfälle aufgrund von schweren Unfällen und maximale Konsequenzen pro Unfall (Hirschberg et al., 2010).

Das grösste Unfallrisiko haben fossile Technologien (vgl. Abb. 5.10). Neue Kernenergietechnologien (GEN III) führen zu einer markanten Reduktion des aktuellen Risikoniveaus. Allerdings hat Kernenergie auch die höchsten denkbaren Konsequenzen im Falle eines Unfalls, was zu einem hohen Niveau an Risikoaversion führt. Es gilt anzumerken, dass für Wasserkraft aus Speicherseen Resultate für ein reales 50-MW-Kraftwerk mit geringer Population flussabwärts gezeigt werden. Grosse Wasserkraftwerke haben – abhängig von ihrem Standort – das Potenzial für Unfälle mit schwerwiegenden Folgen (mit 10 000 Todesfällen und mehr), jedoch ohne eine langjährige Kontamination des Landes zu bewirken. Letzteres betrifft nur die Kernenergie. Bei schweren nuklearen Unfällen müssen deshalb ganze Bevölkerungsteile nicht nur kurzfristig evakuiert, sondern langfristig umgesiedelt werden.

5.2.5 Aggregation – Beurteilung des Gesamt-Nachhaltigkeitsindex

Eine Aggregation aller Aspekte kann basierend auf dem Gesamtkosten-Ansatz (interne plus externe Kosten) durchgeführt werden oder anhand einer Multi-Kriterien-Analyse (MCDA).

Als «extern» werden jene Kosten bezeichnet, die nicht vom Verursacher, sondern von der Allgemeinheit getragen werden. Sie beinhalten die Kosten von Gesundheitsschäden, die durch Luftverschmutzung entstehen. Schäden dieser Art werden monetarisiert, d.h. in Geldbeträgen gemessen oder umgerechnet, und beinhalten auch Kosten, die in Zukunft durch den Klimawandel entstehen. Diese Kosten sind heute sehr unsicher und können über einen grossen Bereich schwanken. Weitere Aspekte sind durch Luftverschmutzung verringerte Ernteerträge und Schäden an Gebäuden.

Nicht alle Faktoren, die bei der Beurteilung einer Technologie eine Rolle spielen, werden in Franken und Rappen gemessen: Dies ist vor allem bei subjektiven Aspekten wie wahrgenommenen Risiken oder Störungen im Landschaftsbild umstritten.

Externe Kosten sind trotz dieser Einschränkungen für Kosten-Nutzen Analysen sehr wertvoll. Die Gesamtkosten setzen sich aus Produktions- (oder internen) und externen Kosten der Elektrizität zusammen und werden manchmal auch als Mass für die Nachhaltigkeit verwendet, was allerdings umstritten ist, da die soziale Dimension nur zum Teil repräsentiert ist. Nicht monetarisierte Aspekte sind naturgemäss nicht berücksichtigt. Abbildung 5.11 zeigt die Gesamtkosten von Technologien auf Basis der zuvor gezeigten Schätzungen von internen und externen Kosten.

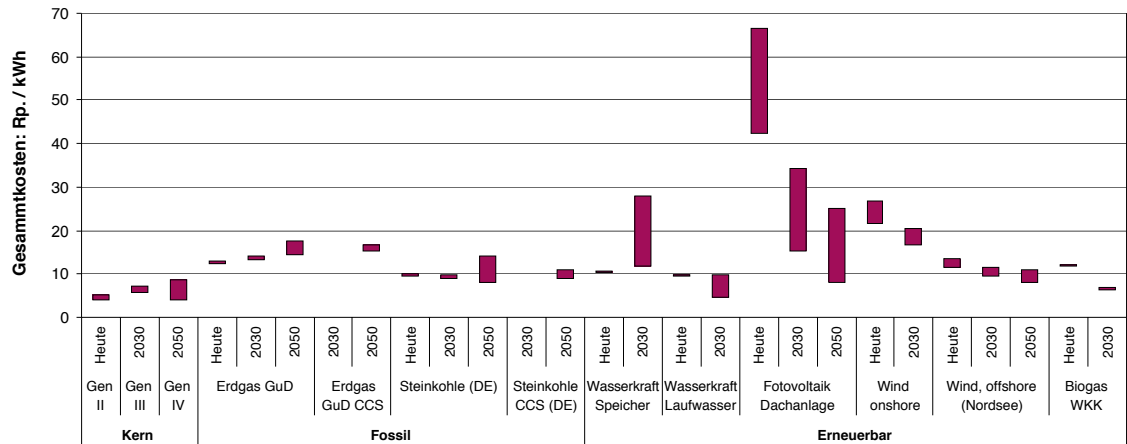


Abbildung 5.11: Gesamtkosten ausgewählter Technologien.

Kernenergie weist die niedrigsten Gesamtkosten auf, unterliegt aber folgenden (bereits zuvor erwähnten) Einschränkungen: Die heutigen internen Kosten basieren auf teilweise amortisierten Investitionskosten (dies gilt auch für Wasserkraft). Bei den zukünftigen internen Kosten wird angenommen, dass die Projekte ohne Verzögerungen umgesetzt werden können. Und schliesslich werden bei den externen Kosten Aspekte, die schwer oder nicht sinnvoll monetarisiert werden können, nicht berücksichtigt. Dazu gehören beispielsweise Fragen der Risikowahrnehmung und -aversion. Die Unsicherheiten bei der Beurteilung der Gesamtkosten fossiler Technologien hängen in erster Linie mit der Beurteilung der Schäden durch die globale Erwärmung zusammen. Auch die mit den zukünftigen Brennstoffkosten verbundenen Unsicherheiten sind nicht enthalten; sie können dominant sein. Bei der Photovoltaik wiederum ist die Entwicklung der Investitionskosten sehr unsicher.

Mithilfe der MCDA können Aspekte der subjektiven gesellschaftlichen Akzeptanz widerspiegelt werden. Der Ansatz stützt sich auf die in Abb. 5.12 gezeigten Schritte. Zunächst müssen die zu vergleichenden Technologien definiert werden. Anschliessend werden Indikatoren festgelegt, die alle drei Bereiche des Drei-Säulen-Modells abdecken und die für jede einzelne Technologie gemessen werden können (vgl. Tab. 5.4 bis 5.6). Diese Einzelindikatoren können bereits für einen Vergleich der Technologien verwendet werden. Auf dieser Grundlage kann ein einzelner, umfassender Index-Wert berechnet werden. Dieser Index (oder Rang) gibt Aufschluss darüber, wie nachhaltig die einzelnen Technologien im Vergleich zueinander sind. Bei der Berechnung des Gesamtindex werden die Indikatoren jeweils einzeln auf der Basis der jeweiligen Präferenzen des Anwenders gewichtet. Die Ergebnisse für den Nachhaltigkeitsindex fallen je nach Gewichtung des Indikators

unterschiedlich aus, sodass es keine «richtigen» oder «falschen» Ergebnisse gibt.

Abb. 5.13 zeigt die von den jeweiligen europäischen NEEDS-Projektbeteiligten beigemessene durchschnittliche Indikatorenengewichtung.

Abb. 5.14 zeigt eine auf allen Antworten von Akteuren basierende Ergebnisübersicht gemäss Erhebung im Rahmen des NEEDS-Projekts, zusammen mit den Gesamtkosten (Schenler et al., 2009).

Während beim im NEEDS-Projekt angewandten Konzept der externen Kosten die Nuklearenergie die niedrigsten Gesamtkosten aufweist, belegt sie beim MCDA-Ranking tendenziell einen schlechteren Rang. Dies ist hauptsächlich auf die Berücksichtigung einer Reihe von sozialen Aspekten zurückzuführen, die sich nicht in externen Kosten niederschlagen. So rangiert die Nuklearenergie im MCDA-Ranking zumeist auf niedrigeren Rängen als die erneuerbaren Energien, die von einer stark

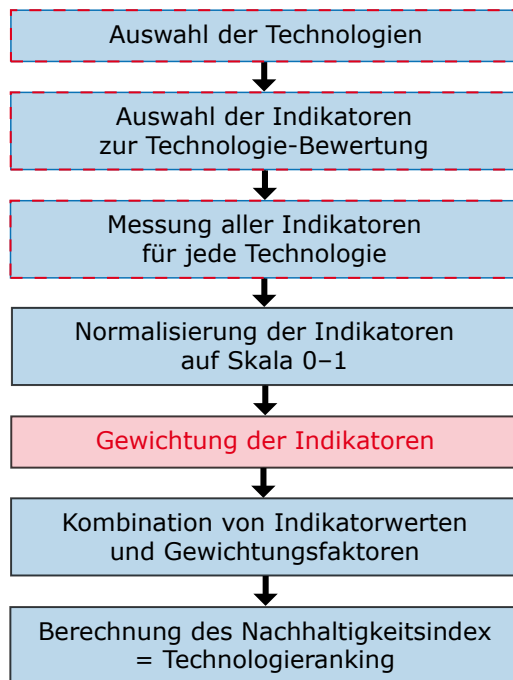


Abbildung 5.12: Schema für den Ablauf der Multi-Kriterien-Analyse (subjektive Elemente in rot, objektive Schritte in blau).

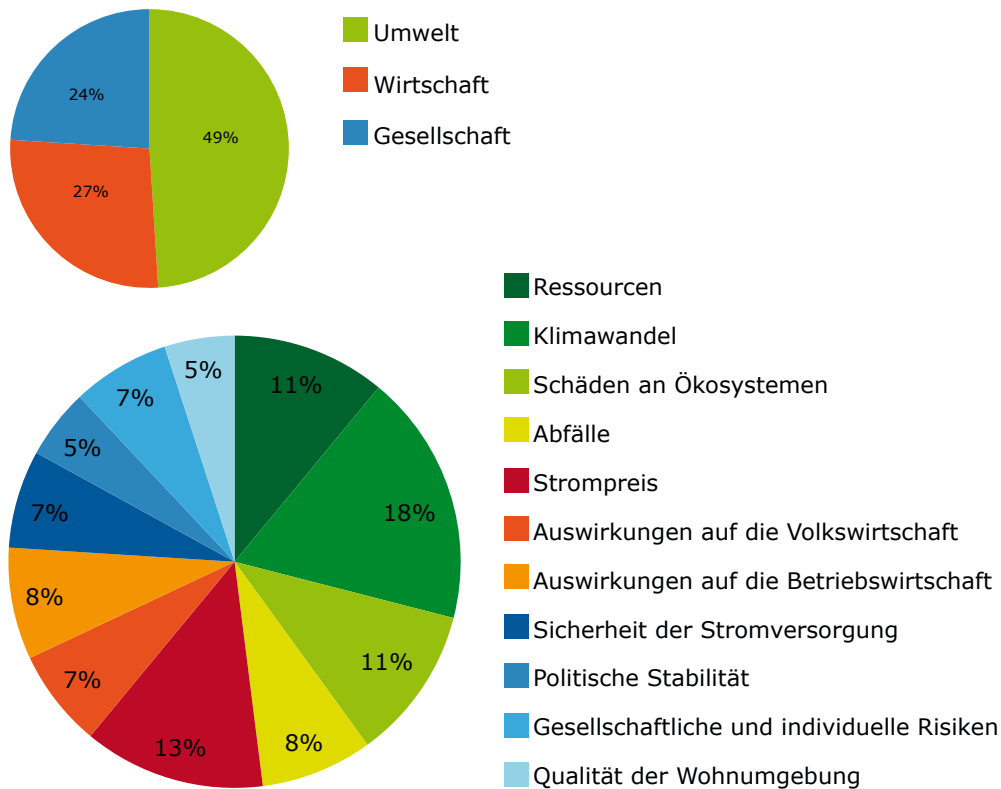


Abbildung 5.13: Durchschnittliche Indikatorengewichtung zur Technologiebewertung, ermittelt im Rahmen einer Online-Befragung von Akteuren im europäischen Energiesektor (nicht repräsentativ für den Bevölkerungsschnitt). (Schenler et al., 2009)

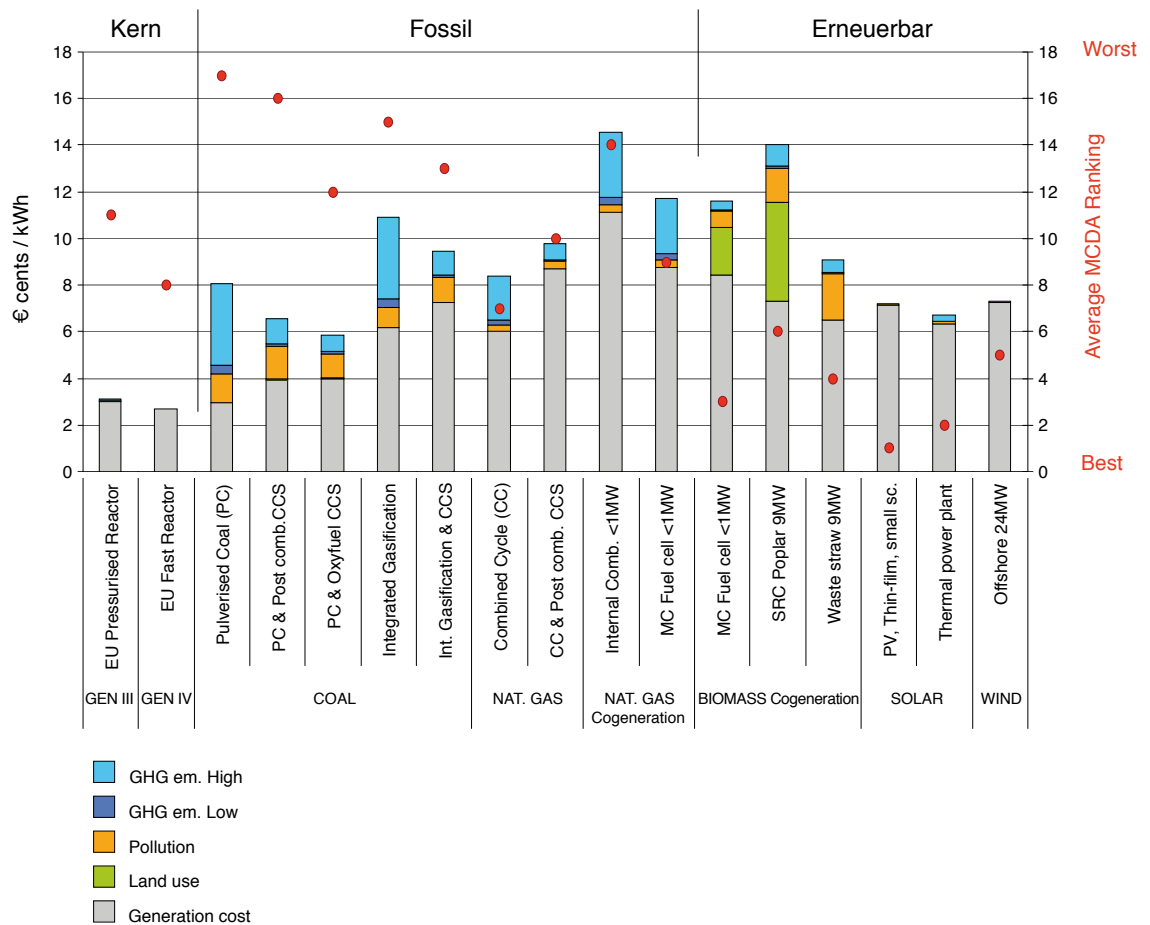


Abbildung 5.14: Durchschnittliches MCDA-Ranking (die roten Punkte) zukünftiger Technologien (2050) im Vergleich zu den Gesamtkosten. (Schenler et al., 2009) Die Grafik zeigt eine Auswahl der 26 bewerteten Systeme GHG (Treibhausgasemissionen) hohe (high)/niedrige (low) geschätzte Schadenskosten durch den Klimawandel. CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung; MC: Schmelzkarbonat; PV: Photovoltaik.

verbesserten Wirtschaftlichkeit profitieren. Kohle-technologien weisen meistens geringere Gesamtkosten auf als Erdgas. Andererseits schneidet Kohle beim MCDA-Ranking schlechter ab als zentrale Ergasoptionen, die im Mittelfeld liegen, ungefähr auf gleicher Höhe wie nukleare Technologien. Die CCS-Leistungen sind unterschiedlich.

Die einzelnen Präferenzprofile haben einen entscheidenden Einfluss auf das MCDA-Ranking der Technologien. Bei einer gleichen Gewichtung von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft und einer stärkeren Gewichtung von Klimaschutz und Ökosystemen, Minimierung objektiver Risiken und Erschwinglichkeit für Kunden rangieren nukleare Technologien unter den obersten Plätzen.

Eine stärkere Gewichtung von Faktoren wie radioaktive Abfälle, Bodenkontaminierung aufgrund hypothetischer Unfälle, Risikoaversion und Wahrnehmung, terroristischer Bedrohung und Konfliktpotenzial hingegen bewirkt eine Veränderung des Rankings zum Nachteil der Nuklearenergie. Dies unterstreicht die Notwendigkeit weiterer technologischer Entwicklungen zur Abschwächung der negativen Einflüsse dieser Aspekte.

Die Platzierung fossiler Technologien hängt in hohem Masse davon ab, wie stark die ökologische Leistung gewichtet wird, die, relativ gesehen, weiterhin eine Schwäche darstellt, für Kohle mehr noch als für Gas. Die Erneuerbaren zeigen aufgrund der stark verbesserten Wirtschaftlichkeit grösstenteils

eine stabile, sehr gute Leistung hinsichtlich der verhältnismässig niedrigen Empfindlichkeit gegenüber Änderungen in den Präferenzprofilen.

Es ist anzumerken, dass sich die obigen Ergebnisse auf zumeist evolutionäre wie auch manche revolutionäre Technologien der fernerer Zukunft (Jahr 2050) beziehen. Die im Rahmen des Axpo-Projekts für aktuelle und zukünftige (Jahr 2030) Technologien gewonnenen Resultate (Roth et al., 2009) weisen ähnliche Muster auf, jedoch mit Abstrichen bei Photovoltaik, hauptsächlich aufgrund der weniger beträchtlichen Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu der vom NEEDS-Projekt angenommenen Entwicklung. Staudämme und Laufwasserkraftwerke, die beim NEEDS-Projekt als voll ausgereifte Technologien eingestuft und somit nicht analysiert wurden, zeigten im Axpo-Projekt fast durchgängig Bestleistungen.

5.2.6 Vor- und Nachteile der Indikator-gestützten Analyse

Der wichtigste Vorteil der Einzelindikatoren besteht darin, dass sie ein differenziertes Bild der Leistung der verschiedenen technologischen Optionen hinsichtlich verschiedener Kriterien liefern. Dies ermöglicht es Akteuren und Entscheidungsträgern, die Stärken und Schwächen dieser Optionen zu verstehen. Der Hauptnachteil betrifft einige der weichen sozialen Indikatoren, die von Natur aus subjektiv sind und somit weniger stabil als naturwissenschaftlich gestützte Indikatoren.

Die auf den Gesamtkosten basierende Aggregation der Indikatoren ist äusserst nützlich für die Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen. Dennoch hat dieser Ansatz den Nachteil, soziale Aspekte nur eingeschränkt zu berücksichtigen. Diese können entweder nur schwer oder nicht sinnvoll monetarisiert werden oder aber weisen niedrige monetäre Werte auf, sind für die Bevölkerung aber von grosser Wichtigkeit.

Der MCDA-Ansatz ermöglicht eine transparente Berücksichtigung eines breiten Spektrums an ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Aspekten. Sie können als Basis für fundierte Entscheidungsfindungen und als Leitfaden für Diskussionen und

partizipative Prozesse herangezogen werden. Dennoch liefert die MCDA kein definitives Ranking der Technologien, vielmehr veranschaulicht sie die Sensitivität des Rankings gegenüber subjektiven Präferenzen der verschiedenen einzelnen Akteure oder Interessengruppen.

Die hier präsentierte Anwendung berücksichtigt lediglich einzelne Technologien. Das Potenzial spezifischer Optionen und deren Fähigkeit, Elektrizität auf Abruf zu liefern, wurden nicht berücksichtigt. Es ist also notwendig, das gesamte Stromversorgungssystem im Hinblick auf realistische alternative Technologiemixe zu untersuchen. Dies ist in vollem Umfang umsetzbar und erfolgte vor kurzem durch das PSI (Eckle et al., 2011) im Rahmen des EU-Projekts SECURE für internationale Stromversorgungsszenarien. Die nächste erforderliche Ausweitung ist die Einbindung des Stromnetzes in die Analyse.

5.2.7 Schlussfolgerungen

Aus den jüngsten Beurteilungen der verschiedenen Technologien lassen sich ziemlich klare Muster erkennen:

- **Ökologische Aspekte:** Die externen Gesamtkosten sind bei Wasserkraft, Kernkraft und Windenergie am niedrigsten. Diese Energiequellen weisen hinsichtlich der ökonomischen Kriterien sehr gute Leistungen auf. Die Nuklearenergie ist jedoch wegen der Produktion radioaktiver Abfälle und hypothetischer Unfälle umstritten; die hiermit verbundenen Risikoaversions- und Wahrnehmungsaspekte manifestieren sich nicht durch die externen Kosten, sondern beeinträchtigen in hohem Masse die Akzeptanz gegenüber der Kernkraft (soziale Dimension). Die diesen Aspekten beigemessene Wichtigkeit hängt von den individuellen Präferenzen ab.
- **Ökonomische Aspekte:** Aus Sicht der Kunden und unter schweizerischen Bedingungen bieten die Kernenergie und die Wasserkraft mit in unterschiedlichem Ausmass amortisierten Investitionskosten den billigsten Strom. Für neue Werke kann die Kernenergie trotz der hohen

Investitionskosten ökonomisch nach wie vor attraktiv sein, jedoch nur unter der Bedingung, dass Nuklearprojekte planungsgemäss, d.h. ohne grössere Hindernisse, umgesetzt werden. Die hohen Investitionskosten stellen ein Risiko für Investoren dar, da für einen sehr langen Zeitraum stabile Betriebsbedingungen erforderlich sind. Einige der neuen erneuerbaren Energien (z.B. Biogas, tiefe Geothermie) sind ökonomisch vielversprechend, haben aber entweder ein verhältnismässig niedriges Potenzial (Biogas) oder sind noch längst nicht ausgereift (tiefe Geothermie). Diese Aussagen beziehen sich auf die Bedingungen in der Schweiz. Insbesondere die Windenergie kann heute in Ländern, die bessere Windbedingungen aufweisen als die Schweiz, relativ wirtschaftlich Strom erzeugen.

- **Soziale Aspekte:** Die geringsten gesundheitlichen Auswirkungen (ein sozialer Aspekt) auf die Öffentlichkeit haben Wasserkraft, Kernenergie und Windenergie. Photovoltaik findet in der Öffentlichkeit die grösste Akzeptanz und schafft die meisten direkten Arbeitsplätze pro produzierter kWh. Der Gesamteffekt von konventionell erzeugtem Strom auf den Arbeitsmarkt kann in energieintensiven Sektoren jedoch negativ sein, je nach dem, welche Politik die Handelspartner der Schweiz verfolgen werden. Die Risikoaspekte sind sehr komplex und weisen grosse Diskrepanzen zwischen den expertenbasierten erwarteten und wahrgenommenen Risiken auf. Informierte Entscheidungsträger sollten beide Seiten berücksichtigen. Letztendlich ist es für die Nutzer wichtig, ihre kWh zu bekommen, wenn sie diese brauchen. Aus diesem Grund ist die Konzeption des Gesamtenergiesystems sehr wichtig. Es müssen angemessene Grundlastkapazitäten und reserven bereitgestellt werden, falls erneuerbare Energien, die stochastisch produzieren, einen erheblichen Anteil zur Gesamtversorgung beisteuern.

Der Gesamtkostenansatz als Mass für die ökonomische und ökologische Effizienz von Energie-

systemen begünstigt die Kernkraft, während die fossilen Ressourcen und die meisten Erneuerbaren, deren Leistung sich mit der Zeit jedoch verbessert, schlechter abschneiden. Gleichzeitig sind Gesamtkostenbeurteilungen für die Kernenergie umstritten – hauptsächlich aufgrund der eingeschränkten Berücksichtigung sozialer Aspekte – und werden von bestimmten Akteuren nur teilweise akzeptiert.

Der Multi-Kriterien-Analyse (MCDA)-Ansatz ist für die Erneuerbaren günstiger; zukünftige Nukleartechnologien schneiden im Vergleich schlechter ab. Die stärkere Präferenz von wirtschaftlichen Aspekten durch der Akteure geht zu Lasten der Erneuerbaren, die stärkere Gewichtung ökologischer Aspekte wiederum zu Lasten der fossilen Energieketten; stärker gewichtete soziale Aspekte sind nachteilig für die Kernenergie.

Keine der technologischen Optionen kann alle Nachhaltigkeitskriterien erfüllen, da sie sowohl Vorteile als auch – teilweise inhärente – Schwächen aufweisen. Dennoch ist zu erwarten, dass zukünftige technologische, langfristige Entwicklungen der Erneuerbaren, insbesondere der Solartechnologien, und der Nuklearenergie, einige der derzeitigen Schwachpunkte mindern und so ihre gesamte Nachhaltigkeitsleistung verbessern.

5.2.8 Literatur

- Bauer C., Dones R., Heck T., & Hirschberg S. (2008) Environmental assessment of current and future Swiss electricity supply options, Proceedings of International Conference on the Physics of Reactors, 14–19 September 2008, Interlaken, Switzerland, CD-ROM, 2008 (ISBN 978-3-9521409-5-6).
- Burgherr, P., & Hirschberg, S. (2008). A comparative analysis of accident risks in fossil, hydro and nuclear energy chains. *Human and Ecological Risk Assessment*, 14 (5) 945–973. www.proclim.ch/news?2509
- Burgherr, P., Hirschberg, S., & Schenler, W. (2008). Implementation, evaluation and reporting on the survey on criteria and indicators for assessment of future electricity supply options. NEEDS Deliverable n° D12.3 – Research Stream 2b. Brussels, Belgium: NEEDS project «New Energy Externalities Developments for Sustainability.» www.proclim.ch/news?2510
- Eckle, P., Burgherr, P., & Hirschberg, S. (2011). Final Report on Multi Criteria Decision Analysis (MCDA). SECURE Deliverable, 6.2. www.proclim.ch/news?2511
- Ecoinvent. (2011). The ecoinvent database v2.2. Dübendorf, Switzerland: The ecoinvent centre. Retrieved from www.ecoinvent.org
- Friedrich, R. et al. (2004). NewExt Final Report: New Elements for the Assessment of External Costs From Energy Technologies. Project. www.proclim.ch/news?2512
- Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr, P., Dones, R., Simons, A., Schenler, W., Bachmann, T., et al. (2008). Final set of sustainability criteria and indicators for assessment of electricity supply options. NEEDS deliverable n° D3.2 – Research Stream 2b. Brussels, Belgium: NEEDS project «New Energy Externalities Developments for Sustainability.» www.proclim.ch/news?2513
- Hirschberg S., Burgherr P., Spiekerman G., Cazzoli E., Vitazek J. and Cheng L. (2003) Assessment of Severe Accident Risks. In: Integrated Assessment of Sustainable Energy Systems in China – The China Energy Technology Program <<https://mail.psi.ch/exchange/stefan.hirschberg/Drafts/projects/cefp/index.html>> . Book Series: Alliance for Global Sustainability Series: Volume 4, pp. 587–660 (Ed. Eliasson B. and Lee Y.Y.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.
- Hirschberg, S., Bauer, C., Schenler, W., & Burgherr, P. (2010). Nachhaltige Elektrizität: Wunschdenken oder bald Realität? *Energie Spiegel* Nr. 20. Villigen PSI, Switzerland: Paul Scherrer Institut. www.proclim.ch/news?2390
- Hirschberg, S., Burgherr, P., Spiekerman, G. & Dones, R. (2004). Severe accidents in the energy sector: Comparative Perspective. *Journal of Hazardous Materials*, 111 (1-3) 57–65. Available at: www.elsevier.com/locate/jhazmat
- Rabl, A., & Spadaro, J. V. (2005). Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications. Version 2, EC EESD-Programme. www.proclim.ch/news?2514
- Renn, O., Hampel, J. & Brukmajster, D. (2006). Establishment of social criteria for energy systems. Updated report on social indicators accommodating Delphi results. NEEDS deliverable n° D2.3 – Research Stream 2b. Brussels, Belgium: NEEDS project «New Energy Externalities Developments for Sustainability.» www.proclim.ch/news?2516
- Ricci, A. et al. (2009). Policy use of the NEEDS results. www.proclim.ch/news?2515
- Roth, S., Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr, P., Dones, R., Heck, T., & Schenler, W. (2009). Sustainability of electricity supply technology portfolio. *Annals of Nuclear Energy*, 36(3), 409–416. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.anucene.2008.11.029 www.proclim.ch/news?2517
- Schenler, W., Hirschberg, S., Bauer, C., & Burgherr, P. (2008). Final report on indicator database for sustainability assessment of future electricity supply options. NEEDS deliverable n° D10.1 – Research Stream 2b. Brussels, Belgium: NEEDS project «New Energy Externalities Developments for Sustainability.» www.proclim.ch/news?2519
- Schenler, W., Hirschberg, S., Burgherr, P., & Makowski, M. (2009). Final report on sustainability assessment of advanced electricity supply options. NEEDS Deliverable n° D10.2 – Research Stream 2b. Brussels, Belgium: NEEDS project «New Energy Externalities Developments for Sustainability.» www.proclim.ch/news?2518

5.3 Risiken und Prozesse menschlicher Risikobewertung

Im Folgenden wird auf grundlegende Aspekte menschlicher Informationsverarbeitung eingegangen, weil sie eine entscheidende Rolle spielen, wie Risiken der Stromproduktionstechnologien eingeschätzt und bewertet werden und sich daraus entsprechende Präferenzen bilden.

Erfahrungsbasierte Verarbeitung von Information (System I)

Der direkte Pfad menschlicher Informationsaufnahme und -verarbeitung führt über die eigene Anschauung und Erfahrung. Mindestens ebenso wichtig sind heute indirekte, stellvertretende Anschauungen und Erfahrungen, die in der unmittelbaren Kommunikation mit Personen im sozialen Umfeld aufgenommen oder via die diversen Print- und elektronischen Medien vermittelt werden. Die sich daraus ergebenden individuellen Bedeutungen und Schlussfolgerungen sind Ergebnis mentaler Verarbeitung; Bedeutungen werden nicht einfach «mittransportiert» bzw. Schlussfolgerungen nicht einfach übernommen. So wird zunächst ein automatisierter, sehr rasch ablaufender Bewertungsprozess durchlaufen, aus dem eine unmittelbare erste bewertende Einschätzung resultiert. Dabei stehen Kriterien wie neu – vertraut, positiv – negativ oder relevant – irrelevant für momentan angestrebte Ziele im Vordergrund. Grundlage für diese Bewertungsprozesse sind bereits gespeicherte frühere Erfahrungen und Wissen.

Dieses erfahrungsbasierte Verarbeitungssystem (System I, Slovic et al. 2004) funktioniert automatisch und schnell, intuitiv-ganzheitlich, affektiv, lust-unlust-orientiert; es werden Bilder und Geschichten wachgerufen und Informationen in solchen abgelegt; Entscheidungen beruhen auf Selbstevidenz. Dieses stammesgeschichtlich sehr alte System dient primär der eigenen Sicherheit indem es hilft, Risiken zu meiden und aus Schaden zu lernen. Studien zeigen, dass wir Negativinformation stärker beachten, für glaubwürdiger halten und besser erinnern. Es wird deshalb gelegentlich auch Angstsystem genannt, da es Menschen bei

entsprechenden Ergebnissen des Informationsverarbeitungsprozesses Angst erleben lässt und somit eine evolutionär bevorzugte Flucht- oder Angriffsmotivation auslöst.

Die psychologische Risikoforschung hat sehr viele Merkmale von zu bewertenden Objekten bzw. Risiken identifiziert, denen ein negatives Affektauslösepotenzial zugeschrieben wird. So sind es Risiken, die

- plötzlich auftauchen;
- unerwartet, neu, unbekannt und unvertraut sind;
- wenig greifbar, wenig anschaulich sind (z.B. Gase, Strahlung);
- trotz geringer Eintrittswahrscheinlichkeit mit besonders schrecklichen Konsequenzen assoziiert werden (dread potential);
- unfreiwillig, von aussen auferlegt und unkontrollierbar erscheinen;
- uns selbst und nachfolgende Generationen treffen;
- letztlich von Menschen verursacht werden (nicht natürlichen Ursprungs sind);
- von fremden, als unzuverlässig eingestuftem Urhebern stammen;
- als unfair bzw. ungerecht angesehen werden;
- sich spektakulär auswirken und deshalb leicht von Medien vermarktbar und zum Gegenstand der Alltagskommunikation werden;
- deren Auswirkungen besonders bildhaft, vorstellbar und deshalb gut erinnerbar sind, was sie unserem Bewusstsein jederzeit leicht verfügbar macht;
- die uns gleichzeitig über viele sensorische Kanäle erreichen;
- Personen aus unserem persönlichen Umfeld gerade kürzlich betroffen haben.

Die Konsequenzen dieser Affektauslösepotenziale sind erheblich. Insbesondere dann, wenn die Ergebnisse von Entscheidungen affektiv sehr stark aufgeladene Bedeutungen zugewiesen erhalten, ist zu beobachten, dass Unterschiede bezüglich Wahrscheinlichkeiten (probability neglect) vernachlässigt werden. Es ist im Extremfall also egal, ob ein Ereignis, auf das einige der oben genannten

Merkmale zutrifft, eine Eintretenswahrscheinlichkeit von 1 oder 99% aufweist. Es tritt demnach tendenziell eine Alles-oder-Nichts-Haltung auf, bei der die Möglichkeit und Qualität eines Ergebnisses viel stärker gewichtet wird als die Eintretenswahrscheinlichkeit. Während Experten dazu tendieren, Trade-offs von eingegangenen Risiken zu berücksichtigen und potenzielle Schäden mit ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit zu gewichten, fokussieren Laien vor allem auf das Ausmass und die Schrecklichkeit potenzieller Schadensereignisse. Das erklärt, warum beispielsweise neuere Kernkrafttechnologien, die um Grössenordnungen sicherer sind, von der Bevölkerung nicht als sicherer bewertet werden als ältere Kernkrafttechnologien.

Der Wunsch der Bevölkerung nach «Null-Risiko» ist verständlich und nachvollziehbar. Da jedoch jede Energietechnologie mit Risiken verbunden bleibt, ist die Erwartung an eine hundertprozentig sichere Technologie unhaltbar. Der Wunsch nach Sicherheit vor bestimmten Risiken bestimmter Technologien lässt sich allerdings durch konsequenten Verzicht auf die betreffenden Technologien verwirklichen. Gleichzeitig erfordern derartige Entscheidungen eine gründliche, durch solide wissenschaftliche Daten gestützte Auseinandersetzung mit den Risiken der verfügbaren Alternativen und allenfalls schliesslich eine informierte Inkaufnahme dieser Risiken.

Analytische Verarbeitung von Information (System II)

Um solche Abwägungen leisten zu können, also zum Beispiel eben Trade-offs für die Zukunft rational abzuschätzen, hat sich im Zuge der Evolution ein weiteres Informationsverarbeitungssystem herausgebildet. Als eine stammesgeschichtlich wesentlich jüngere Errungenschaft verfügen Menschen auch über ein bewusst zu steuerndes, langsameres, analytisches Verarbeitungssystem (System II, Slovic et al. 2004): Es basiert auf systematischem Analysieren; es funktioniert logisch-argument- bzw. datenorientiert; Information wird in Symbolen, Zahlen etc. gespeichert; Entscheidungsalternativen werden bewusst gegeneinander abgewogen; es wird

auf der Basis von Logik und verfügbarer Evidenz entschieden. Im Gegensatz zum raschen, erfahrungsbasierten System I ist das analytische System nicht unmittelbar handlungsorientiert. Es erfordert Zeit und eine tragfähige Datengrundlage.

Rationale Entscheidungen

Rationalität ist nun aber nicht einseitig dem analytischen Verarbeitungsmodus (System II) zuzuschreiben. Entscheidend für rationales Entscheiden ist das Zusammenspiel von System I und System II, denn beim Bewerten und Abwägen von Alternativen braucht es auch die erfahrungs- und wissensbasierten Leistungen von System I.

Die evolutionären Vorteile der raschen System-I-Signalverarbeitung sind unübersehbar; sie waren und sind wichtig. Dennoch entstand offenbar ein evolutionärer Druck, ein zusätzliches, analytisches, vorausschauendes System auszubilden. Denn allein auf sich gestellt wäre dieses rasche, «alte» Gehirn in einer «neuen» Welt nicht immer funktional, obwohl es als «Bauchgefühl» nach wie vor bei vielen Bewertungen und Entscheidungen das langsamere analytische Verarbeitungssystem dominiert. So wird beispielsweise in der Schweiz kein Aufhebens gemacht um die verbreiteten Grenzwertüberschreitungen beim natürlichen radioaktiven Gas Radon, das für jährliche ca. 200 bis 300 Lungenkrebstodesfälle verantwortlich gemacht wird; sogar die direkt Gefährdeten sind nur schwer zu Sanierungen ihrer belasteten Liegenschaften zu bewegen. Im Gegensatz dazu ist im Falle von Radioaktivität aus künstlichen Quellen die Reaktionsbereitschaft ausserordentlich hoch und die Toleranz praktisch Null.

Die oben genannten Merkmale und die intuitiven Informationsverarbeitungsmechanismen bewirken, dass sich Menschen oft um die falschen Dinge sorgen. So fürchten sich viele Leute eher vor «Elektrosmog», «Gen-Tomaten», BSE oder Terroranschlägen als vor Autofahren oder Übergewicht. Letztere erscheinen trotz tödlicher Konsequenzen vertraut, alltäglich und tendenziell selbst kontrollierbar. Der dahinter stehende Verarbeitungsmechanismus sowie die menschliche Tendenz, die Gegenwart stärker und Dinge am fernen Horizont geringer zu

gewichten, behindern die Funktionsweise des analytischen Systems. Dies erklärt, warum manchmal rasch entschieden wird und die Konsequenzen zu wenig mitbedacht werden. Oder warum entfernte Risiken wie Klimawandel plötzlich zugunsten anderer Prioritäten weniger bedrohlich wirken. Allerdings wird in der Wissenschaft darüber diskutiert, in welchen Situationen analytisches Denken Vorzüge aufweist gegenüber intuitiven Entscheidungen und wo nicht. Der Trend geht dahin, zumindest anzuerkennen, dass intuitiv auch sehr komplexe Sachverhalte rasch und effektiv zu einem Urteil integriert werden können (Wilson & Schooler 1991).

Schliesslich ist aber zu berücksichtigen, dass auch sehr hohe Aktivierungen und die damit verbundenen negativen Affekte mit der Zeit wieder abklingen und die mentale Verfügbarkeit der Bedrohung abnimmt. Es wäre unerträglich, wenn sich Menschen in jeder Sekunde ihres Daseins immer sämtlicher potenzieller Risiken und Gefährdungen ihrer Existenz bewusst wären. Im normalen Abklingen, teilweisen Vergessen und Verdrängen bzw. Ersetzen durch neue medienvermittelte Hypes liegt der Grund, warum diese risikobewusstseinsfördernden Verarbeitungsmechanismen gezielt bewirtschaftet werden, sei es beispielsweise im Falle der nuklearen Technologien durch atomkritische Kreise oder im Falle von HIV-Infektionen durch Gesundheitsbehörden und besorgte Nichtregierungsorganisationen.

Welche Rolle kommt dabei den Wissenschaften zu? Keinesfalls ist es Sache der Wissenschaft, darüber zu entscheiden, welche Risiken in welchen gesellschaftlichen Feldern wie Verkehr, Ernährung, Kriminalität oder auch Energieversorgung zumutbar und in Kauf genommen werden sollen; dies ist Sache aller Bürgerinnen und Bürger. Aber es ist sehr wohl Aufgabe der Wissenschaft, Risiken zu identifizieren, zu qualifizieren, zu quantifizieren und ihre Befunde in verständlicher Form an Bevölkerung und Politik zu kommunizieren. Es ist – da ein Franken nur einmal ausgegeben werden kann – ausserdem Aufgabe der Wissenschaft, gegebenenfalls darauf hinzuweisen, dass mindestens im Falle von Konsens über anzustrebende Risikominimierungs-

kriterien pro investierter Franken allenfalls in einem anderen Handlungsfeld wesentlich mehr an Sicherheit gewonnen werden könnte. (Beispiel: Die extrem hohen Investitionen in Asbestsanierungen oder BSE-Tests mit extrem geringem Sicherheitszuwachs versus Krankenhausinfektionen, wo mit einem Bruchteil der investierten Mittel wesentlich mehr Menschenleben gerettet werden könnten.) In derartigen Trade-off-Diskussionen über Allokation bzw. Fehlallokation von Mitteln sollte und kann die Wissenschaft rationale Argumente liefern, auch wenn die Prioritäten in der Risikominimierung letztlich politisch zu entscheiden sind.

Zusätzlich spielt bei den meisten Technologien die Komplexität der Materie eine wichtige Rolle: Das gilt für unsere subjektive Abschätzung von Risiken der nuklearen Stromproduktion genauso wie für die Gen- oder die Nanotechnologie. In allen diesen Fällen sind Laien – und das sind mehr als 99% der Bevölkerung – darauf angewiesen, fehlendes Wissen und fehlende Beurteilungskompetenz durch Vertrauen zu ersetzen in die Wissenschaftler, die Hersteller, die Regulationsbehörden sowie die Politik. Ist dieses Vertrauen nicht vorhanden oder kommt es abhanden, fehlt eine entscheidende Grundbedingung für einen rationalen Risikodialog in der Bevölkerung.

5.3.1 Literatur

- Slovic, P.; Finucane, M. L.; Peters, E. & MacGregor, D. G. (2004). Risk as analysis and risk as feelings: Some thoughts about affect, reason, risk, and rationality. *Risk Analysis*, 24 (2), 311–322.
www.proclim.ch/news?2520
- Wilson, T. D. & Schooler, J. W. (1991). Thinking too much: Introspection can reduce the quality of preferences and decisions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 60, 449–457.

