

## Nachhaltige Elektrizität: Wunschdenken oder bald Realität?

**Nachhaltigkeit ist heute in aller Munde. Kaum ein Begriff wird so oft gebraucht wie auch missbraucht. Der Wunsch nach einer nachhaltigen Entwicklung ist wohl unbestritten, aber was bedeutet das konkret im Energie- und Stromsektor? Kann die Nachhaltigkeit von Energiesystemen objektiv gemessen werden? Welche Technologien schneiden dabei gut ab? Die jüngste Forschung am PSI zeigt, dass es derzeit keine optimale Lösung gibt und dass es darauf ankommt, wo wir unsere Prioritäten setzen.**

Klimafreundlich, umwelt- und ressourcenschonend, emissionsfrei, sicher und verlässlich, gesellschaftlich breit akzeptiert und natürlich kostengünstig – so stellen sich wahrscheinlich die meisten eine nachhaltige Stromversorgung vor. Leider ist das heute ein Wunschdenken. Wir werden noch lange Zeit ohne solche Technologien auskommen müssen.

Es bleibt uns also nicht erspart, bei unseren Entscheidungen die Vor- und Nachteile der verfügbaren Alternativen gegeneinander abzuwägen. Und zwar am besten anhand von messbaren Indikatoren, die ökologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigen müssen – also beispielsweise Schadstoffemissionen, Stromkosten, oder mögliche Unfallfolgen. In Zusammenarbeit mit Forschungspartnern entwickelte das PSI neue Methoden, die einen systematischen Vergleich verschiedener Optionen zur Stromversorgung erlauben. Mit der so genannten Multi-Kriterien-Analyse (MCDA) können die gemessenen Indikatoren mit subjektiven Wertvorstellungen kombiniert werden. Die Nachhaltigkeit der einzelnen Technologien im Vergleich hängt also auch davon ab, welchen Indikatoren grosses Gewicht gegeben wird.

Ist vor allem eine günstige Stromproduktion wichtig, können sich derzeit die Erneuerbaren Energien nicht durchsetzen. Will man eine Stromversorgung mit möglichst wenig Klima-, Umwelt- und Gesundheitsschäden, muss man auf Erdgas- und vor allem Kohlekraftwerke verzichten. Setzt man auf eine möglichst breite gesellschaftliche Akzeptanz, erhalten Kernenergie und andere thermische Grosskraftwerke heute wenig Pluspunkte. Wollen wir aber eine nachhaltige Energieversorgung für morgen entwerfen, dann müssen wir in solchen Abwägungen die langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten der Technologien berücksichtigen – und zwar immer in Zusammenhang mit unserer Volkswirtschaft und Gesellschaft.

### MIT EINLAGEBLATT

#### Inhalt

- 2 Definitionssache:  
**Wie misst man Nachhaltigkeit?**
- 3 Ansichtssache:  
**Und was kommt dabei heraus?**
- 4 Interview mit Stefan Hirschberg:  
**«Bei Entscheidungen helfen und Wissen vermitteln»**

# Wie misst man Nachhaltigkeit?

Wie heute und in Zukunft unsere Stromversorgung nachhaltig gestaltet werden kann, darüber gehen die Ansichten weit auseinander. Oft beginnen die Meinungsverschiedenheiten schon bei der Überlegung, was mit Nachhaltigkeit gemeint ist. Gefragt ist eine nachvollziehbare und auf Fakten gestützte Methode für den Vergleich verschiedener Technologien.

Knapp 700'000 Treffer: so viele Einträge findet google.ch, wenn man nach den Stichwörtern «Nachhaltigkeit» und «Strom» sucht. Darunter so verschiedene Dinge wie z.B. den Energie-Spiegel Nr. 3, Ökobilanzen von Photovoltaikanlagen, das Dossier Umwelt und Nachhaltigkeit des Kernkraftwerks Leibstadt, die Energie- und CO<sub>2</sub>-Vision der Supermarktkette Coop, aber auch Tipps für nachhaltige Finanzanlagen der Zürcher Kantonalbank. Aus dieser Vielfalt wird deutlich: Der Begriff Nachhaltigkeit ist in aller Munde. Klar ist aber auch, dass nicht alle das Gleiche darunter verstehen und einige dieses Thema auch für ihre Image- und PR-Kampagnen einsetzen.

## Ursprung & Konzept

Als weitgehend anerkannt gilt heute das «3-Säulen-Modell» der nachhaltigen Entwicklung, das auf den so genannten «Brundtland-Bericht» der UNO von 1987 zu einer gerechten Entwicklungs- und Umweltpolitik zurückgeht. In diesem Modell wird Nachhaltigkeit von den drei gleichberechtigten Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft getragen (siehe Kasten). Gleichzeitig gilt, dass globale Gerechtigkeit angestrebt werden muss und die heutige Generation nicht auf Kosten der zukünftigen leben darf.

### 3-Säulen-Modell: Nachhaltigkeit in aller Kürze

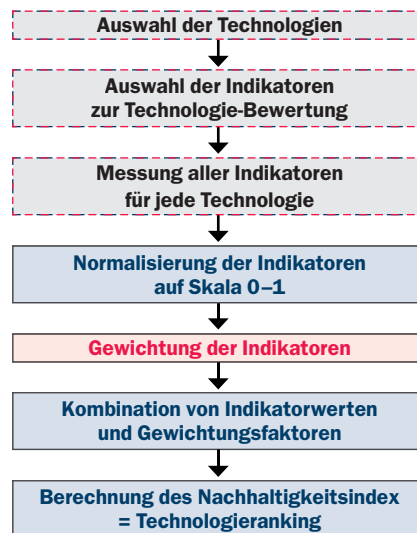
**Umwelt:** Natur und Umwelt müssen zukünftigen Generationen intakt hinterlassen werden.

**Wirtschaft:** Unsere Wirtschaftsweise muss eine dauerhafte Grundlage für Wohlstand bieten.

**Gesellschaft:** Alle Mitglieder einer Gemeinschaft müssen gleichberechtigt an gesellschaftlichen Prozessen teilnehmen können.

## Konkrete Umsetzung

Um anhand dieser Leitplanken beurteilen zu können, wie nachhaltig der Strom aus einzelnen Kraftwerken ist, muss die Nachhaltigkeit konkret gemessen werden. Nur so lassen sich verschie-



**Grafik 1:** Schema für den Ablauf einer Multi-Kriterien-Analyse (subjektive Elemente in rot, objektive Schritte in blau).

dene Systeme anhand von Zahlen vergleichen. Dazu wurde am PSI 1999 das Werkzeug der so genannten «Multi-Kriterien-Analyse» eingeführt und fortlaufend optimiert (siehe Einlageblatt).

Bei einer Multi-Kriterien-Analyse werden zuerst die Technologien definiert, die verglichen werden sollen (vgl. Grafik 1). Anschliessend werden Indikatoren festgelegt, die alle drei Bereiche

## Nachhaltigkeit muss konkret gemessen werden

des 3-Säulen-Modells abdecken und für jede einzelne Technologie gemessen werden (siehe Tabelle 1). Schon diese Einzelindikatoren können für einen Technologievergleich genutzt werden. Und daraus wird schlussendlich für jede Technologie ein einziger, zusammenfassender Indexwert errechnet. Dieser Index sagt aus, wie nachhaltig die einzelnen Technologien im Vergleich zueinander sind. Bei der Berechnung des Gesamtindex werden die Indikatoren jeweils einzeln gewichtet, und zwar individuell verschieden den Präferenzen der Anwender entsprechend. Die Ergebnisse für den Nachhaltigkeitsindex fallen deshalb je nach Gewichtung der Indikatoren unterschiedlich aus, d.h. es gibt keine «richtigen» und «falschen» Resultate.

Für die Messung der Indikatoren kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz: Die Umweltindikatoren stützen sich meist auf Ökobilanzen (vgl. Energie-Spiegel Nr.11). Ebenso die objektiven gesellschaftlichen Indikatoren

wie z.B. Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe, wobei hier zusätzlich der so genannte «Impact pathway approach» eingesetzt wird. Das heisst, je nach Standort der Emissionsquellen wird die Ausbreitung der Emissionen und die betroffene Zahl an Menschen berücksichtigt (vgl. Energie-Spiegel Nr. 19). Für ökonomische Indikatoren werden betriebs- und volkswirtschaftliche Daten herangezogen. Zur Messung subjektiver gesellschaftlicher Indikatoren wie z.B. der Wahrnehmung von Risiken werden oft Experten befragt, um die Haltung der Bevölkerung einzuschätzen. Damit ergibt sich ein wichtiger Unterschied: Während die Umweltindikatoren auf naturwissenschaftlichen Fakten basieren, stützen sich viele gesellschaftliche Indikatoren auf subjektiv wahrgenommene Faktoren, also auf ein «Bauchgefühl».

Umwelt	RESSOURCEN
	Energieträger Mineralische Erze
	KLIMAWANDEL
	SCHÄDEN an ÖKOSYSTEMEN
	aus dem Normalbetrieb aus schweren Unfällen
Umwelt	ABFÄLLE
	Chemische Abfälle für Untertageponen Radioaktive Abfälle für geologische Endlager
	AUSWIRKUNGEN auf KUNDEN
Wirtschaft	Strompreis
	AUSWIRKUNGEN auf die VOLKSWIRTSCHAFT
	Beschäftigung/Arbeitsplätze Unabhängigkeit in der Stromproduktion
	AUSWIRKUNGEN auf die BETRIEBSWIRTSCHAFT
Gesellschaft	Finanzielle Risiken Betriebscharakteristika der Anlagen
	SICHERHEIT & VERLÄSSLICHKEIT der STROMVERSORGUNG
	Politische Konfliktfelder Flexibilität und Anpassungsfähigkeit
	POLITISCHE STABILITÄT
	Konfliktpotential, ausgelöst durch Energietechnologie Notwendigkeit konsensorientierter Entscheidungsprozesse
	GESELLSCHAFTLICHE & INDIVIDUELLE RISIKEN
	Expertenschätzung für Risiken im Normalbetrieb Expertenschätzung für Unfallrisiken Allgemein wahrgenommene Risiken Gefahr von Terrorismus
QUALITÄT der WOHNUMGEBUNG	
Beeinträchtigung der Landschaftsqualität Lärmbelastung	

**Tabelle 1:** Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren (PSI/NEEDS; Hirschberg et al. 2008). Bei deren Festlegung wurden europaweit Akteure miteinbezogen, zwischen denen weitgehend Übereinstimmung erzielt wurde.

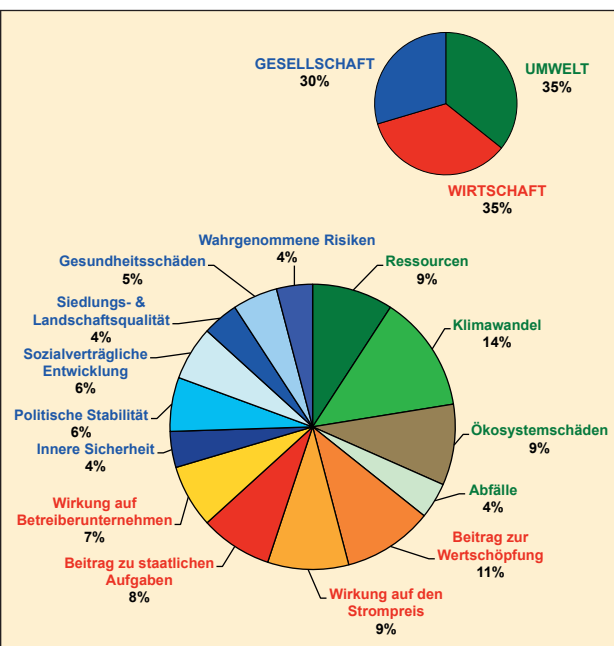
# Und was kommt dabei heraus?

Die optimale Stromversorgung für alle – billig, umweltfreundlich und sicher jederzeit verfügbar – gibt es nicht. Weder heute noch morgen. Je nach persönlichen Präferenzen stehen in einem Nachhaltigkeitsvergleich andere Technologien an der Spitze. Wichtig ist aber, dass die Indikatoren und deren individuelle Gewichtung nachvollziehbar sind: Nur so können die gewonnenen Erkenntnisse in der energiepolitischen Diskussion als Entscheidungshilfe dienen.

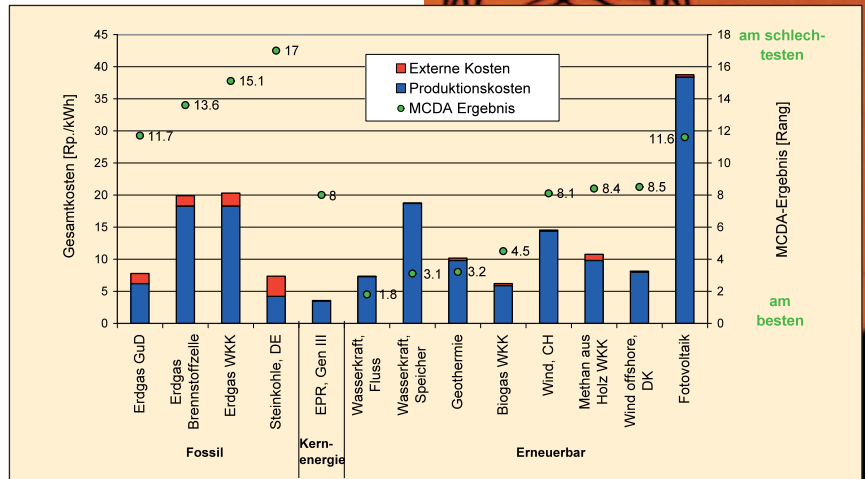
Möglichst wenig für den Strom bezahlen oder geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen? Oder doch eher eine risikoarme Stromversorgung – was ist wichtiger? Wie können solche Faktoren gegeneinander abgewogen werden und welche Kompromisse muss man eingehen? Solche Fragen stellen sich bei der Realisierung einer nachhaltigen Stromversorgung. Die Antworten werden unterschiedlich sein: je nachdem, welcher Interessensvertreter – ob Produzent, Konsument, Politiker, oder Umweltschützer – sie gibt. Und von diesen Antworten hängt es ab, welche Technologien zur Stromversorgung eingesetzt werden. Wie diese Güterabwägung in zwei Projekten

## Die für alle optimale Stromversorgung gibt es nicht

gelöst wurde, welches Bild sich daraus in der Nachhaltigkeitsbewertung ergibt und wie sich im Vergleich dazu die Gesamtkosten der Stromerzeugung verhalten, wird im Folgenden und im Einlageblatt beleuchtet.



**Grafik 2:** Gewichtungsschema für die Indikatoren zur Technologienbewertung (Roth et al., 2009), ermittelt als Durchschnitt einer Befragung von 85 MitarbeiterInnen eines grossen Energieunternehmens (nicht repräsentativ für den Bevölkerungsschnitt).



**Grafik 3:** Ergebnisse aus dem Projekt Nachhaltigkeitsbewertung für ein grosses Energieunternehmen. Gesamtkosten der Stromerzeugung (Säulen) vs. MCDA-Ergebnisse (Punkte) für die Versorgung der Schweiz im Jahr 2030 (Roth et al., 2009). Die Grafik zeigt eine Auswahl der insgesamt 18 bewerteten Systeme. GuD: Gas- und Dampfkraftwerk, WKK: Wärme-Kraft-Kopplung, EPR: Europäischer Druckwasserreaktor

### Blick auf die Schweiz...

Grafik 2 zeigt das Gewichtungsschema für ein Anwendungsbeispiel in der Schweiz, Grafik 3 das sich damit ergebende Abschneiden der einzelnen Technologien im Nachhaltigkeitsvergleich und bei den Gesamtkosten für das Jahr 2030. Das Technologiespektrum umfasst erneuerbare und fossile Energieträger sowie Kernenergie. Strom aus Kraftwerken im Ausland wird importiert.

Die Nachhaltigkeitsbewertung der fossilen Systeme (MCDA-Ergebnis) fällt schlecht aus, auch wenn die Gesamtkosten gering sind. Dazu tragen die relativ schlechten Werte bei den Umweltindikatoren bei, die Auslandsabhängigkeit bei den Ressourcen und die vor allem von Kohle verursachten Gesundheitsschäden. Die erneuerbaren Energien liegen im MCDA-Ranking im Vorder- und Mittelfeld, da sie vor allem bei den Umwelt- und Gesellschaftsindikatoren gut abschneiden. Die hohen Stromproduktionskosten der Fotovoltaik zeigen aber auch bei der MCDA-Bewertung Wirkung. Kernenergie weist die niedrigsten Gesamtkosten auf, liegt bei der Nachhaltigkeitsbewertung aber im Mittelfeld: Grund ist, dass einige Faktoren, deren Monetarisierung umstritten ist – z. B. die Folgen möglicher Unfälle oder die Entsorgungsfrage (siehe Kosten) – als negativ wahrgenommen und relativ hoch gewichtet werden.

### Gesamtkosten und Externe Kosten der Stromerzeugung

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

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

Externe Kosten sind trotz dieser Einschränkungen für *Kosten-Nutzen-Analysen* sehr wertvoll.

Die *Gesamtkosten* setzen sich aus Produktions- und externen Kosten der Elektrizität zusammen und werden manchmal auch als *Mass für die Nachhaltigkeit* verwendet, was allerdings umstritten ist. Nicht monetarisierte Aspekte sind naturgemäss jedoch nicht berücksichtigt.

# «Bei Entscheidungen helfen und Wissen vermitteln»

## Warum eignet sich die Multi-Kriterien Analyse (MCDA) so gut für die Nachhaltigkeitsbewertung?

Weil es damit möglich ist, auf Fakten basierendes Wissen mit den Wertvorstellungen ganz unterschiedlicher Interessensvertreter zu kombinieren. Und zwar in einem transparenten Prozess. Die Stärken und Schwächen einzelner Technologien werden dabei klar aufgezeigt. Deutlich wird auch, welche Technologien robust sind, d.h. gut abschneiden bei verschiedenen Gewichtungen der Indikatoren. Damit können solche Analysen bei Entscheidungen helfen und Wissen vermitteln.

## Sind die Ergebnisse robust genug, um Entscheidungen zu unterstützen?

Ja, auch wenn es Unsicherheiten gibt. Je länger der Zeithorizont, desto grösser sind diese. Das betrifft etwa die erwartete Technologieentwicklung, Kosten, etc. Die Unsicherheiten von Indikatoren wie etwa Gesundheitsrisiken sind grundsätzlich messbar. Manche gesellschaftliche Indikatoren beinhalten jedoch subjektive Elemente, sind also aus naturwissenschaftlicher Sicht «weniger genau», und diese Ungenauigkeit ist auch schwieriger abzuschätzen. Unsicherheiten bei den Indikatorwerten haben im Vergleich zur Änderung der individuellen Gewichtung aber weniger Einfluss auf die Ergebnisse der MCDA. Dies klar zu machen, ist ein wichtiger Teil der MCDA.

## Wo sind heute die Grenzen der Nachhaltigkeitsbewertung?

Mit der MCDA wird momentan jede Kilowattstunde Strom als gleich wertvoll betrachtet. Unabhängig davon, ob sie regelmässig bereitgestellt wird oder nicht und davon, wie gross die Potenziale der Technologien sind. In Wirklichkeit braucht es aber das Zusammenspiel verschiedener Systeme: Für die Bewertung verschiedener Optionen für die Stromversorgung insgesamt mittels MCDA müssten also verschiedene Strommixe gegenübergestellt werden, in denen solche Rahmenbedingungen Platz finden. Teil davon wäre auch, Stromsparmassnahmen zu berücksichtigen. Es gibt also noch genug zu tun in den kommenden Jahren.

## Wie wichtig ist die Charakterisierung der Technologien für die Ergebnisse der MCDA?

Sehr wichtig. Von Beginn einer MCDA an sollte klar sein, ob die Bewertung heutige oder zukünftige Technologien betrifft und wo sie eingesetzt werden.

Strittig ist häufig, wie positiv die zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten von Systemen beurteilt werden, die heute noch nicht auf dem Markt sind.

## Seitdem Sie vor mehr als 10 Jahren mit Ihrer Arbeit in der Nachhaltigkeitsbewertung begonnen haben: Was waren die wichtigsten Fortschritte?

Seit den Anfängen konnten wir viel mehr Indikatoren berücksichtigen, die mittlerweile alle relevanten Bereiche abdecken und dank der Zusammenarbeit mit Sozialwissenschaftlern die gesellschaftlichen Aspekte deutlich besser behandeln. Das Technologiespektrum wurde erweitert – mit einem Zeithorizont bis 2050 – und neue MCDA-Methoden und zugehörige Benutzerwerkzeuge entwickelt. Nicht zuletzt konnten wir verschiedene Interessensvertreter direkt miteinbeziehen.

## Welche Interessensvertreter? Konnte Übereinstimmung zur Bedeutung der einzelnen Kriterien erzielt werden?

Das hängt vom Projekt ab. Wenn die Interessen der Akteure ähnlich sind, ist in einem moderierten Prozess Übereinstimmung möglich. Wenn aber wie im EU-Forschungsprojekt NEEDS so unterschiedliche Gruppen wie Industrie, Politik, Wissenschaft und NGOs beteiligt sind, ist Konsens im Detail so gut wie unmöglich. Immerhin herrscht teils Übereinstimmung, dass Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft gleichberechtigt sein sollen.

## Ist die Multi-Kriterien Analyse ein Ersatz für die Gesamtkosten?

Nein. Die beiden Methoden ergänzen einander und haben unterschiedliche



**Dr. Stefan Hirschberg** leitet das Labor für Energiesystem-Analysen seit dessen Einrichtung 2006. Seit 1992 am PSI, war er davor für System- und Sicherheitsanalysen verantwortlich. Das Thema Nachhaltigkeit in der Energieversorgung ist somit seit fast 20 Jahren Teil seiner Arbeit.

Zwecke. Die MCDA gibt keine eindeutige Antwort, da die Ergebnisse von der Gewichtung der Indikatoren abhängen. Für die Gesamtkosten ergibt sich im Gegensatz dazu ein einziges Resultat, das für Kosten-Nutzen Überlegungen relevant ist. Das Konzept der externen Kosten, die meisten Ergebnisse und vor allem die Notwendigkeit, die externen Kosten zu internalisieren, sind breit akzeptiert. Strittig ist aber die Behandlung der Kernenergie. Das zeigt sich auch im Vergleich der Ergebnisse für die Gesamtkosten und die MCDA.

## Wie geht es weiter mit der Nachhaltigkeitsbewertung?

Wir sind dabei, die Nachhaltigkeitsbewertung auf den Verkehrssektor auszuweiten. Es werden in den nächsten Jahren viele innovative Fahrzeuge auf den Markt kommen, z.B. Elektro- und Wasserstoffautos, zusammen mit der nötigen Infrastruktur. Wir werden diese neuen Konzepte, zentrale und dezentrale Stromversorgung der Elektroautos und die Anforderungen an das Stromnetz in der Bewertung integrieren.

## Impressum

**Energie-Spiegel** ist der Newsletter des PSI zur ganzheitlichen Betrachtung von Energiesystemen (Projekt GaBE). Beiträge zu dieser Ausgabe stammen von S. Hirschberg, C. Bauer, W. Schenler, P. Burgherr.

**ISSN-Nr.:** 1661-5093

**Auflage:** 15 000 Ex. Deutsch, 4000 Ex. Französisch, 800 Ex. Englisch  
Bisherige Ausgaben als Pdf (D, F, E):  
<http://gabe.web.psi.ch/>

### Verantwortlich für den Inhalt:

Paul Scherrer Institut  
Dr. Stefan Hirschberg  
5232 Villigen PSI, Schweiz  
Tel. 056 310 29 56, Fax 056 310 44 11  
[stefan.hirschberg@psi.ch](mailto:stefan.hirschberg@psi.ch)  
[www.psi.ch/GaBE](http://www.psi.ch/GaBE)

**Redaktion:** Christian Bauer

**Verteilung und Subskription:**  
[energiespiegel@psi.ch](mailto:energiespiegel@psi.ch)

**Layout:** Paul Scherrer Institut

**Energiesystem-Analysen am PSI:** Ziel der Energiesystem-Analysen am Paul Scherrer Institut, Villigen, ist eine umfassende und detaillierte Beurteilung heutiger und zukünftiger Energiesysteme. Betrachtet werden neben Technologien insbesondere ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Kriterien. Auf der Basis von Life Cycle Assessment (LCA), energiewirtschaftlichen Modellen, Risikoanalysen, Schadstoff-Ausbreitungsmodellen und Multikriterien-Analysen ist es möglich, unterschiedliche Szenarien zu vergleichen, um Grundlagen für politische Entscheidungen zu schaffen.

### Zusammenarbeiten mit:

ETH Zürich; EPF Lausanne; EMPA; Massachusetts Institute of Technology (MIT); University of Tokyo; Europäische Union (EU); International Energy Agency (IEA); Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD); Organisation der Vereinten Nationen (UNO)

# Verschiedene Schwerpunkte

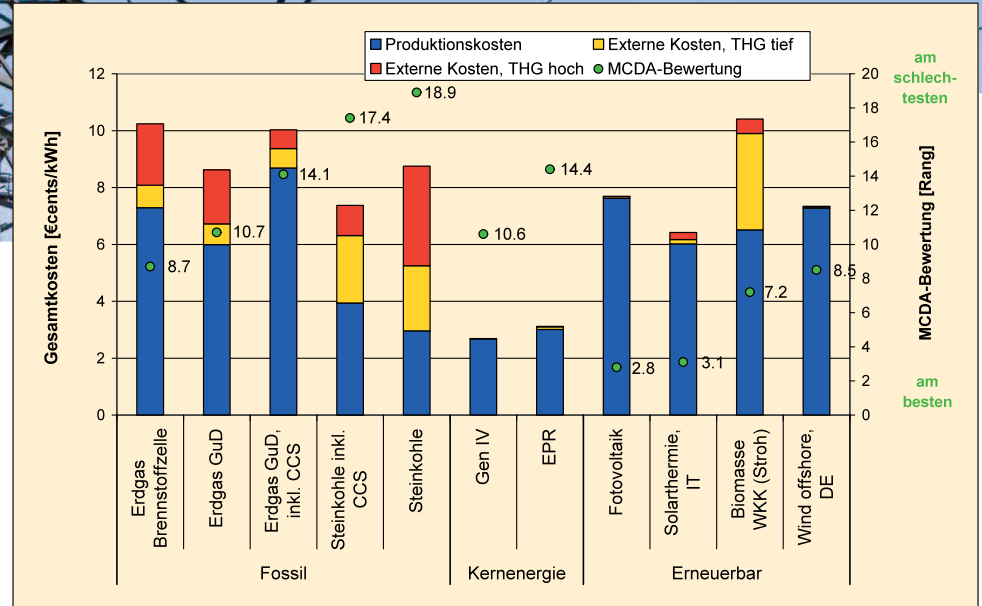
Es kommt darauf an, wo die Schwerpunkte gesetzt werden: Einzelne Technologien schneiden ganz unterschiedlich ab, je nachdem, ob ökologischen, wirtschaftlichen, oder gesellschaftlichen Indikatoren der Vorzug gegeben wird.

## Blick auf Europa

Die Bewertung für Europa (Schweiz, Deutschland, Frankreich, Italien) im Jahr 2050 fokussiert auf Zukunftstechnologien, bei denen deutliche Fortschritte zu erwarten sind. Vor allem bei Fotovoltaik und Kernreaktoren der übernächsten Generation IV wird die Entwicklung sehr optimistisch eingeschätzt.



Auffallend ist bei der vorliegenden Gewichtung (Grafik 4) wieder die Diskrepanz zwischen den geringsten Gesamtkosten und der durchschnittlichen MCDA-Bewertung der Kernenergie (Grafik 5). Deutlich wird auch, dass die Nutzung fossiler Energieträger mit vergleichsweise hohen externen Kosten verbunden ist und gleichzeitig die MCDA-Bewertung wieder fast durchwegs schlecht ausfällt. Die erneuerbaren Energien schneiden im Gegensatz dazu bei der MCDA-Bewertung durchwegs gut ab: Sie profitieren von meist geringen Umwelt- und Gesundheitsschäden, von gesellschaftlicher Akzeptanz und nicht zuletzt von der Annahme, dass die Kosten in den kommenden 40 Jahren drastisch abnehmen werden.

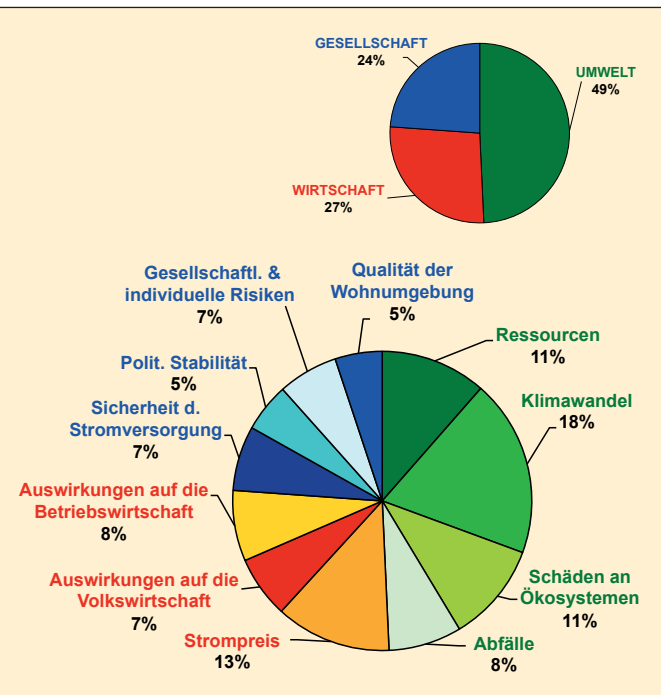


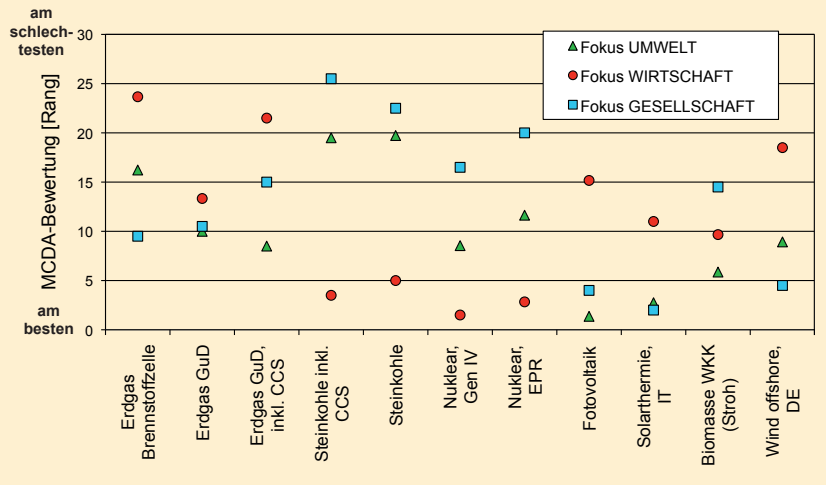
**Grafik 5:** Ergebnisse aus dem Projekt NEEDS: Gesamtkosten der Stromerzeugung (Säulen) vs. MCDA-Ergebnisse (Punkte) für die Versorgung der Schweiz im Jahr 2050 (PSI/NEEDS; Schenler et al. 2009). Die Grafik zeigt eine Auswahl der insgesamt 26 bewerteten Systeme. THG hoch/tief: hohe bzw. tiefe Schadenskosten durch den Klimawandel (Treibhausgasemissionen); Abk. s. Grafik 3 und Tabelle 2.

Grafik 6 zeigt das Nachhaltigkeitsranking für drei sehr einseitige Gewichtungsprofile (siehe Grafik 7) mit Schwerpunkten auf ökologischen, wirtschaftlichen, oder gesellschaftlichen Indikatoren. Zählt vor allem der Strompreis, so sind Kernenergie und Steinkohle die Systeme der Wahl. Erneuerbare und Erdgassystemen schneiden dann schlechter ab. Genau umgekehrt, wenn nur gesellschaft-

liche Indikatoren zählen: Dann liegen die meisten Erneuerbaren an der Spitze, während Steinkohle und Kernenergie am schlechtesten abschneiden. Ähnlich beim Schwerpunkt Umwelt: Erneuerbare schneiden am besten ab, gefolgt von Kernenergie und Erdgassystemen, und das schlechteste Ergebnis wiederum für Steinkohle.

**Grafik 4:** Durchschnittliche Gewichtung der Indikatoren zur Technologienbewertung (PSI/NEEDS; Schenler et al. 2009), ermittelt mit einer Online-Umfrage unter Akteuren in der Energieversorgung in Europa (nicht repräsentativ für den Bevölkerungsschnitt).



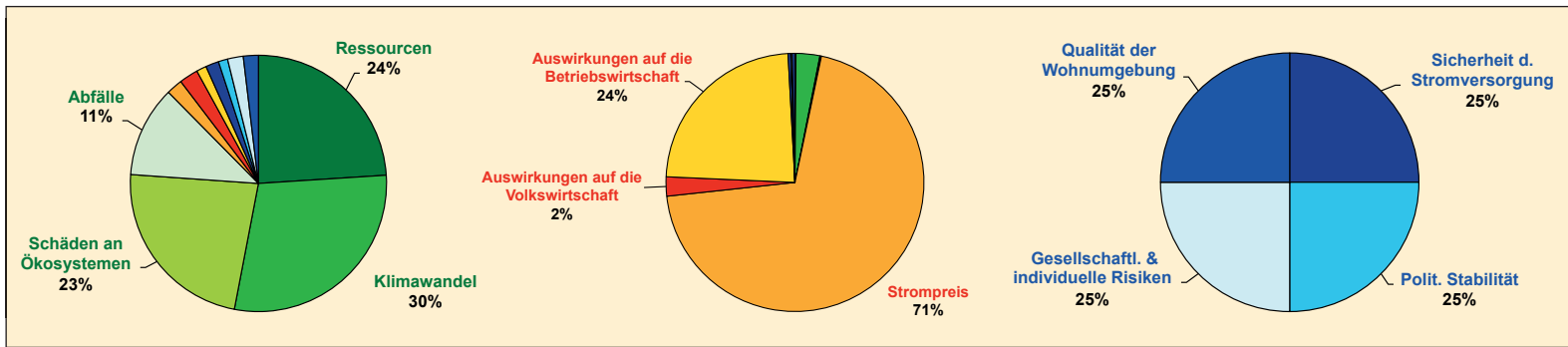


**Grafik 6:** Ergebnisse aus dem Projekt NEEDS: MCDA-Bewertung für die Stromversorgung der Schweiz im Jahr 2050 mit drei verschiedenen Indikatorgewichtungen, s. Grafik 7 (PSI/NEEDS; Schenler et al. 2009); Abk. s. Grafik 3 und Tabelle 2.

**Grafik 7:** Gewichtung der Indikatoren zur Technologienbewertung für sehr einseitige Gewichtungsprofile (kleine Teilmengen der befragten Akteure). Links: Schwerpunkt Umwelt, Mitte: Schwerpunkt Wirtschaft, Rechts: Schwerpunkt Gesellschaft (PSI/NEEDS; Schenler et al. 2009).

**Entwicklung der Nachhaltigkeitsbewertung am PSI**

- 1999–2000:** Erste Multi-Kriterien-Analyse für die Schweizer Stromerzeugung (vgl. Energie-Spiegel Nr. 3).
- 1999–2003:** China Energy Technology Program – MCDA-Anwendung für China inkl. eines interaktiven Werkzeugs (vgl. Energie-Spiegel Nr. 17).
- 2002–2004:** MCDA-Anwendung für das Fallbeispiel Deutschland (ILK).
- 2004–2006:** Bewertungsmodell zur Nachhaltigkeit für die Schweizer Stromversorgung zusammen mit einem grossen Energieunternehmen und anderen Partnern (für 2000 und 2030).
- 2005–2009:** EU-Projekt NEEDS – Nachhaltigkeitsbewertung innovativer Stromproduktionstechnologien bis 2050 unter Leitung des PSI und Mitwirkung von Industrie und NGOs.
- 2010–2014:** Projekt THELMA – Nachhaltigkeitsbewertung von Personenzugehen.



	Einheit	Kernenergie <sup>1</sup>			Fossil								Erneuerbar													
		Gen II	Gen III	Gen IV	Erdgas GuD <sup>2</sup>		Erdgas GuD <sup>2</sup> , CCS <sup>3</sup>		Steinkohle (DE)		Steinkohle, CCS <sup>4</sup> (DE)		Wasserkraft, Speicher <sup>5</sup>		Fotovoltaik, Dachanlage <sup>6</sup>		Wind, onshore <sup>5</sup>		Wind, offshore (Nordsee)		Biogas WKK <sup>5</sup>					
		heute	2030	2050	heute	2030	2050	heute	2030 <sup>a</sup>	2050	heute	2030	2050	heute	2030	2050	heute	2030	2050	heute	2030	2050	heute	2030		
Treibhausgasemissionen	kg(CO <sub>2</sub> -Äq.)/kWh	0.008	0.004	0.001	0.426	0.388	0.385	0.120	0.119	0.912	0.753	0.685	0.205	0.084	0.004	0.004	0.062	0.030	0.003	0.017	0.016	0.010	0.010	0.003	0.077	0.037
Schäden an Ökosystemen	PDF*m2*a/kWh <sup>7</sup>	1.2E-03	8.3E-04	3.6E-04	3.6E-03	3.3E-03	3.3E-03	4.5E-03	4.5E-03	1.4E-02	1.3E-02	1.3E-02	2.0E-02	4.5E-03	3.1E-04	3.1E-04	6.9E-03	5.4E-03	1.2E-03	6.1E-03	3.4E-03	3.2E-03	3.4E-03	1.1E-03	4.9E-02	3.7E-02
Externe Kosten	Rp./kWh	0.08	0.07	0.07-0.11	1.6	1.6	0.6-3.3	k.A.	0.5-1.3	3.5	3.1	2.2-7.5	k.A.	1.4-2.6	2.6	2.7	0.5	0.3	0.06-0.09	0.2	0.1	0.1	0.1	0.04-0.06	1.6	0.3
Stromkosten <sup>8</sup>	Rp./kWh	4-5	5.8-7.2	3.9-8.4	10.8-11.4	11.8-12.5	13.8-14.4	15.5-16.2	14.7-15.4	6.0-6.7	6.0-6.7	6.0-6.7	7.8-8.8	7.5-8.3	10.5	11.9-28.0	42-66	15-34	8-25	21.4-26.5	16.2-19.8	11-13	9-11	8-11	10.4	6.3
Kapitalkosten	1'000 CHF/kW <sub>el</sub>	<sup>b</sup>	3.5-5.0	2.5-7.0	0.9-1.4	0.8-1.3	0.8-1.3	1.400-2.0	1.2-1.8	2.0-2.7	1.8-2.5	1.7-2.4	2.7-3.7	2.5-3.3	<sup>b</sup>	4.0-10	5.0-8.0	1.7-4.0	0.9-3.0	1.8-2.5	1.5-2.0	2.7-4.0	1.7-3.0	1.5-2.7	6	4.2
Brennstoffpreissensitivität <sup>9</sup>	%	5-6	4-5	0	63-67	67-71	72-75	54-56	53-56	47-52	50-56	51-57	44-50	45-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	22
Gesundheitsschäden	YOLL/kWh <sup>10</sup>	5.2E-09	4.7E-09	2.7E-09	2.8E-08	3.3E-08	7.4E-08	k.A.	8.7E-08	6.5E-08	7.3E-08	2.7E-07	k.A.	2.3E-07	1.2E-09	1.4E-09	1.8E-08	1.2E-08	8.4E-09	7.0E-09	6.6E-09	4.6E-09	5.9E-09	6.3E-09	1.2E-07	1.5E-08
Schwere Unfälle	Todesfälle/GWa	7.3E-03	1.1E-05	1.6E-04	4.5E-02	3.1E-02	6.9E-02	7.5E-02	7.4E-02	1.8E-01	1.0E-01	1.2E-01	1.9E-01	1.4E-01	3.7E-03	3.7E-03	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-04	1.5E-02	4.3E-03	6.8E-03	1.0E-03	2.7E-03	1.5E-02	2.1E-03
Maximale Unfallfolgen <sup>11</sup>	Todesfälle	10'000 <sup>c</sup>	50'000	3'000	109	109	109	109	109	434	434	272	434	272	276 <sup>d</sup>	285 <sup>d</sup>	10	10	5	5	5	10	10	10	5	5
Abfälle, radioaktiv	m <sup>3</sup> /kWh	5.6E-08	2.3E-08	1.7E-08	6.2E-11	3.5E-11	1.1E-10	8.6E-10	3.5E-10	6.1E-10	3.4E-10	2.0E-10	1.40E-09	4.4E-10	5.3E-11	4.0E-11	8.3E-10	2.7E-10	4.3E-11	1.6E-10	8.4E-11	1.3E-10	6.3E-11	2.2E-11	9.3E-10	6.2E-10
Abfälle, in Untertage deponie <sup>12</sup>	m <sup>3</sup> /kWh	9.6E-10	6.3E-10	2.2E-10	4.9E-09	4.5E-09	4.4E-09	1.7E-08	5.2E-09	1.7E-08	1.1E-09	1.4E-08	3.8E-08	7.3E-09	6.6E-11	6.4E-11	4.8E-08	2.9E-08	1.8E-09	7.2E-09	5.7E-09	5.6E-09	7.5E-09	1.9E-09	1.1E-09	9.7E-10

1) 2030: EPR – European Pressurized Reactor; 2050: EFR – European Fast Reactor  
 2) GuD: Gas- und Dampfkraftwerk  
 3) CCS: CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung; 2030 & 2050: "post-combustion"  
 4) CO<sub>2</sub>-Abscheidung; 2030 "post-combustion"; 2050 "oxyfuel combustion"  
 5) für 2050 keine bedeutenden Änderungen gegenüber 2030 zu erwarten  
 6) 2010 & 2030: kristallines Silizium; 2050: Dünnschichtzellen  
 7) PDF: steht für den Verlust an Artenvielfalt  
 8) Zinssatz: 6%; Kernenergie & Wasserkraft: für heute betriebene Anlagen, Kapitalkosten tlws. abgeschrieben; Biogas: Wärmeverkauf angerechnet  
 9) Steigerung der Stromkosten bei Verdoppelung der Brennstoffkosten  
 10) YOLL: Verlorene Lebensjahre durch vorzeitigen Tod (im "Normalbetrieb")  
 11) max. Unfallfolgen bei theoretisch möglichen Unfällen; für Kernenergie Werte gerundet  
 12) Sonderabfälle, nicht radioaktiv  
 a) Kostendaten für herkömmliches Kraftwerk; andere Indikatoren: integrierte Kohlevergasung  
 b) kein Neubau berücksichtigt  
 c) ca. 400 MW-Kraftwerk  
 d) für ein reales 50 MW-Kraftwerk; max. Unfallfolgen für grosse Speicher, Schweiz: 11'000 ohne Vorwarnung

**Tabelle 2:** Indikatoren zu Technologiecharakterisierung; teilweise unterschiedliche Datengrundlagen für 2030/2050; Anlagen in der Schweiz bzw. für Stromimporte.