

Universum Cleantech



FOSTER + PARTNERS

Das Modell von Masdar City ist zur Chiffre der Cleantech-Branche geworden. In den Vereinigten Arabischen Emiraten entsteht eine emissionsfreie Retortenstadt, in der umweltfreundliche Technologien erprobt werden können. Für die Schweizer Forschung und Industrie bietet Cleantech verlockende Chancen – nicht nur in Masdar, sondern auch überall dort, wo mit Hilfe von Wissen und Technologie ein Beitrag zur Lösung von Umweltproblemen geleistet wird.

Formen der Stromproduktion		Kernenergie ¹			Fossil									
		Generation II heute	Generation III 2030	Generation IV 2050	Erdgas GuD ²			Erdgas GuD ² , CCS ³		Steinkohle (D)			Steinkohle, CCS ⁴ (D)	
Treibhausgasemissionen	kg(CO ₂ -Äq.)/kWh ⁷	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
Schäden an Ökosystemen	PDF*m ² a/kWh ⁸	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
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	3,1	2,2-7,5	k.A.	1,4-2,6	
Stromkosten ⁹	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
Kapitalkosten	1000 CHF/kW _a	b	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
Brennstoffpreissensitivität ¹⁰	%	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
Gesundheitsschäden	YOLL ¹¹ /kWh	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
Schwere Unfälle	Todesfälle/GWa ¹²	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
Maximale Unfallfolgen ¹³	Todesfälle	10000 ^c	50000	3000	109	109	109	109	109	434	434	272	434	272
Abfälle, radioaktiv	m ³ /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
Abfälle, in Untertageponie ¹⁴	m ³ /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

		Erneuerbar											
		Wasserkraft, Speicher ⁵		Photovoltaik, Dachanlage ⁶			Wind, Festland ⁷		Wind, im Meer (Nordsee)			Biogas WKK ⁸	
Treibhausgasemissionen	kg(CO ₂ -Äq.)/kWh ⁷	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*m ² a/kWh ⁸	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	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 ⁹	Rp./kWh	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	1000 CHF/kW _a	b	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 ¹⁰	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	22
Gesundheitsschäden	YOLL ¹¹ /kWh	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 ¹²	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 ¹³	Todesfälle	276 ^a	285 ^a	10	10	5	5	10	10	10	10	5	5
Abfälle, radioaktiv	m ³ /kWh	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 Untertageponie ¹⁴	m ³ /kWh	6,6E-11	6,4E-11	4,4E-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: CO₂-Abscheidung und -Speicherung; 2030 und 2050: «post-combustion»
 4) CO₂-Abscheidung; 2030 «post-combustion»; 2050 «oxyfuel combustion»
 5) für 2050 keine bedeutenden Änderungen gegenüber 2030 zu erwarten
 6) 2010 und 2030: kristallines Silizium; 2050: Dünnschichtzellen
 7) CO₂-Äq.: CO₂-Äquivalent
 8) PDF: steht für den Verlust an Artenvielfalt
 9) Zinssatz: 6%; Kernenergie und Wasserkraft: für heute betriebene Anlagen, Kapitalkosten teilweise abgeschrieben; Biogas: Wärmeverkauf angerechnet
 10) Steigerung der Stromkosten bei Verdoppelung der Brennstoffkosten
 11) YOLL: Verlorene Lebensjahre durch vorzeitigen Tod (im «Normalbetrieb»)
 12) GWa: Giga-Watt-Jahr
 13) max. Unfallfolgen bei theoretisch möglichen Unfällen; für Kernenergie Werte gerundet
 14) 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
 Zahlendarstellungen – Lesbeispiel: 3,7E-3 = 3,7x10⁻³ = 3,7x0,001 = 0,0037

QUELLE: PAUL-SCHERRER-INSTITUT

NZZ-INFOGRAFIK/Inf.

Sauberkeit – auf mehrere Stellen hinter dem Komma genau

Ökobilanzen fassen die Umweltbelastung von Produkten und Technologien in Zahlen – und lösen sinnvolle Kontroversen aus

Ökobilanzen entlarven energieintensive Produktionswege von angeblich sauberen Geräten. Soziale Faktoren lassen sich ebenfalls einbeziehen. Doch über die Zahlen in solchen Aufstellungen herrscht nicht immer Einigkeit.

Davide Scruzzi

Was ist eine saubere Technologie? Stefan Hirschberg vom Paul-Scherrer-Institut (PSI) muss es wissen, fasst er sich doch seit Jahren mit Ökobilanzen, also der Bezifferung der Wirkungen von Produkten und Technologien auf die Umwelt. Es gebe keine absolute Definition dafür, was «clean» sei und was nicht, sagt Hirschberg. Im Zentrum ständen aber die negativen Auswirkungen auf das Ökosystem, das Klima und die Gesundheit, die alle möglichst klein sein sollten. Weil nicht nur der unmittelbare Betrieb von Kraftwerken und anderen Anlagen sowie Produkte, sondern auch die Herstellung und Entsorgung berücksichtigt werden, resultieren aus Ökobilanzen bisweilen Überraschungen. So auch, wenn es um die Kohlendioxidemissionen von Strom aus Solarzellen geht, die das PSI mit etwa 60 Gramm pro Kilowattstunde veranschlagt (siehe Tabelle). Seitens des Instituts wird beteuert, dass auch die Photovoltaik insbesondere im Vergleich mit fossilen Energieträgern als «fast CO₂-frei» bezeichnet werden könne, auch wenn der Wert tatsächlich etwas höher liege als bei der Atom-, Wasser- oder Windkraft.

Grundlage für Überlegungen

Die Herstellung von Silizium-Solarzellen sei «heute noch eher energie- und materialintensiv», formuliert es Hirschberg. Dabei basieren aber die Annahmen auf dem Szenario einer Produktion in Europa. Ginge man von Photovoltaik-Modulen aus, die in China produziert werden, dürften aufgrund der hohen Emissionen dortiger Kohlekraftwerke und des entsprechenden Einflusses auf die Bilanz höhere Werte resultieren. Es sei allerdings davon auszugehen, dass sich die Energie- und Materialintensität sowie die Effizienz der Solarzellen in den nächsten Jahrzehnten weiter verbessern werden – daher die in der Kalkulation optimistischen Annahmen für die Zukunft, so Hirschberg.

Obwohl die genauen Zahlen und Masseneinheiten dies suggerieren, liefern Ökobilanzen nicht immer allgemeingültige Werte und per se auch keine unumstösslichen Anleitungen für Entscheidungen. Dies teilweise weil aus den unterschiedlichen Ausprägungen der Technologien und Fertigungsarten jeweils verschiedene Werte resultieren. Vor allem aber darum, weil die Prämissen von Entscheidungsfindungen – beispielsweise bei der Wahl der Art der Stromproduktion – sehr unterschiedlich sein können.

Ungesunde Stromknappheit

Hirschberg erstellte für einen chinesischen Auftraggeber ein computergestütztes Entscheidungsprogramm zur Frage, wie der steigende Strombedarf künftig gedeckt werden soll. In diesen aufstrebenden Ländern spielten Faktoren eine Rolle, die in den hiesigen energiepolitischen Debatten an Brisanz verloren hätten, erzählt er. Die Verschmutzung von Luft, Wasser und Böden durch fossile Kraftwerke älteren Typs geniesse die höchste Priorität, während Aspekte des globalen Umweltschutzes, etwa die Klimaerwärmung, oft nicht zentral seien. Zum Teil gehen Ziele zum Klimawandel und zur Luftqualität freilich ohnehin Hand in Hand; so bringt ein Ersatz von Kohlekraftwerken durch Gas- oder Kernkraftwerke nicht nur eine Verminderung des Schwefeldioxid- und Stickoxidausstosses, sondern reduziert auch die CO₂-Emissionen.

Grundsätzlich gehe es in Entwicklungsländern aber nicht nur darum, die gesundheitlichen Schäden von Kohlekraftwerken mit denjenigen von erneuerbaren Energien zu vergleichen, sondern auch darum, das Risiko der Stromknappheit als negativen Gesundheitsfaktor einzubeziehen, sagt Hirschberg.

Größen des gesundheitlichen Einflusses sind natürlich auch als Folgen bei schweren Unfällen zu berücksichtigen. Dabei zeigt sich in den PSI-Statistiken, dass Erdgas- und vor allem – wegen der Unfälle in Minen – Kohlekraftwerke mehr Unfallopfer verursachen als AKW. Diese Kalkulation kann zum Hinterfragen eigener Positionen anregen, wird aber den hiesigen energiepolitischen Diskussionen selbstverständlich nicht gerecht. Daher versuchen die Wissenschaftler am PSI im Rahmen einer Multikriterienanalyse (englisch abgekürzt MCDA) in Zusammenarbeit mit Interessenvertretern, gesellschaftliche Faktoren, Umwelt und Wirtschaft zu

einer gemeinsamen Bewertung zu verschmelzen. Ausgangspunkt für die Beurteilung der gesellschaftlichen Akzeptanz sind dabei Fragen nach der persönlichen Wichtigkeit von Faktoren wie Konfliktpotenzial, Landschaftsschutz und – für die AKW-Frage besonders wichtig – Risikowahrnehmung.

Nur die Stromproduktion mittels Steinkohle schliesst aus dieser gesellschaftlichen Perspektive insgesamt schlechter ab als die Atomkraft, wenn man die Positionen jener Personen mit prononciertem Fokus in Wirtschaft, Umweltschutz oder Gesellschaft vergleicht (siehe Grafik).

Grenzen der Bilanzierung

Insgesamt zeigt sich, dass solche Analysen zwar die energiepolitische Debatte auf eine solidere Grundlage stellen können, die alten weltanschaulichen Gräben aber durch Rechnungen nicht überwunden werden. Wenn heute dominierende Faktoren wie der Klimawandel, die Energieproduktionskosten, die Gesundheits- und Ökosystemschäden, der Rohstoffverbrauch und Abfälle als wichtig angesehen werden, kann man laut dem PSI dennoch klare Muster erkennen: Am besten schneiden viele der erneuerbaren Energien ab, am schlechtesten meistens die Kraftwerke auf fossiler Basis. Die Atomenergie liegt oft dazwischen.

Schwierig in Zahlen zu fassen sind aber auch die Fragen nach dem Zusammenspiel der verschiedenen Energieformen in einem Gesamtsystem. Natürlich sei es beispielsweise nicht möglich, die Kernenergie allein mit einer unregelmässig auftretenden Produktionsform wie der Photovoltaik zu ersetzen,

ungeachtet des künftig besseren Kosten-Nutzen-Verhältnisses, das aus den Bilanzen hervorgeht, sagt Stefan Hirschberg. Er arbeitet derzeit an einem interdisziplinären Projekt der Akademien der Wissenschaften Schweiz, das sich mit der künftigen Energieversorgung unter sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten beschäftigt. Entsprechende Ergebnisse werden in der zweiten Jahreshälfte publiziert.

Wie sauber sind Elektroautos?

Auch die Bilanzierung eines einzelnen Produkts gestaltet sich nicht immer einfach, wie man es in den letzten Monaten bei den Elektromobilen erlebt hat. Das Team von Hirschberg hat im Auftrag der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) eine Ökobilanz für ein Elektromobil des Typs Renault Twingo erstellt. Dessen CO₂-Emissionen betragen mit etwa 70 Gramm demnach beim Schweizer Strommix nur ein Viertel des Ausstosses eines Benzin-Twingo im Stadtverkehr – Stromproduktion, Autoherstellung und Entsorgung eingeschlossen. Beim Bezug von Ökostrom verbessert sich dieser Wert, während bei einer Stromproduktion mit Kohle das Benzinauto besser dasteht.

Andere Analysen führen allerdings zu anderen Schlussfolgerungen. Für Aufsehen sorgte in den vergangenen Wochen insbesondere Rolf Frischknecht, Partner in der Firma ESU Services. Beim Kohlendioxidausstoss von Elektromobilen errechnete Frischknecht sogar beim CO₂-armen Schweizer Strommix einen Ausstoss von 100 bis 120 Gramm pro Personenkilometer; das entspricht den Werten von Dieselfahrzeugen der besten Kategorie.

Warum diese Unterschiede zwischen den Ökobilanzen? Seitens des PSI verweist man auf die im Vergleich mit Lithium-Ionen-Batterien weniger aufwendige Fertigung der beim Twingo berücksichtigten sogenannten Zebra-Batterien auf Natrium-Nickelchlorid-Basis, die noch dazu in der Schweiz erfolge. Die Batterietechnik bleibt neben der Art der Stromproduktion zentral, sowohl wegen der Herstellung und Entsorgung wie auch aufgrund des Einflusses des Gewichts auf das Fahren. Eine Analyse der Empa hat kürzlich aufgezeigt, wie Plug-in-Hybride unter allen Antriebsformen für Personenwagen die Ideallösung darstellen, wenn für Kurzstrecken unter 50 Kilometern immer auf Batteriebetrieb geschaltet und für seltene längere Fahrten dann der Strom von einem Benzinmotor produziert wird. Die Batterie kann auf diese Weise klein gehalten werden.

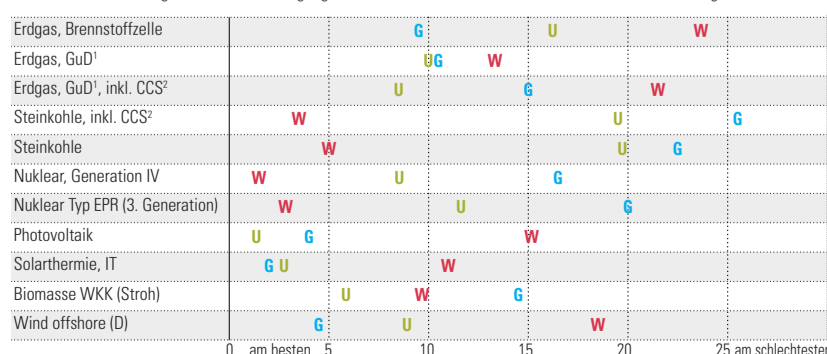
Just das Thema Batterie führt also rasch zur Frage, für welche Strecken welche Verkehrsmittel ideal sind – womit der Fokus vom Produkt auf das Mobilitätsverhalten gelenkt wird. Das PSI analysiert zusammen mit Partnern der ETH nun in einer breit angelegten Analyse verschiedene Antriebstypen und Mobilitätskonzepte mit Blick auf die Schweizer Verhältnisse. Dazu gehören auch Betrachtungen zur heutigen und künftigen Ausgestaltung des Stromnetzes und zur Integration von neuen erneuerbaren Energien in die Mobilität.

Licht in Uranlieferungen

Das Beispiel der Elektromobilität zeigt, wie auch Diskussionen über widersprüchliche Bilanzen das Problembewusstsein für ökologische Entscheidungen schärfen. Mit einer von einem Beratungsunternehmen erarbeiteten Umweltbilanz für den Strom aus dem AKW Beznau erreichte der Stromkonzern Axpo – unbeabsichtigt – gar, dass nun die Schweizer AKW-Betreiber – auch unter dem Druck parlamentarischer Vorstösse – die Herkunft und die Produktionsbedingungen ihrer Uranbrennstäbe unter die Lupe nehmen. Greenpeace hatte nämlich die allzu optimistischen Ausführungen zu den Produktionsketten bei der Herstellung der Brennstäbe in Russland erfolgreich in Frage gestellt. Die entsprechenden Abklärungen des Stromkonzerns Axpo bei den russischen Unterlieferanten sind noch im Gang. Sogar eine fehlerhafte Bilanz kann also am Schluss zu einem ökologischen Nutzen führen.

Soziale, ökonomische und ökologische Faktoren von Kraftwerken

Multikriterienbewertung für die Stromversorgung der Schweiz im Jahr 2030 mit drei verschiedenen Indikatorgewichten



G Fokus Gesellschaft W Fokus Wirtschaft U Fokus Umwelt
 QUELLE: PAUL-SCHERRER-INSTITUT ¹ Gas und Dampf; ² Kohlendioxiddeinlagerung
 NZZ-INFOGRAFIK/Inf.