

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 130 (2004)
Heft: 3-4: Energiezukunft

Artikel: Brennpunkt Energiequelle: ein Vergleich heutiger Stromversorgungssysteme
Autor: Hirschberg, Stefan / Dones, Roberto
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-108354>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Brennpunkt Energiequelle

Ein Vergleich heutiger Stromversorgungssysteme

In den letzten zehn Jahren entwickelte das Paul Scherrer Institut (PSI) eine systematische Methode zur Beurteilung von Energiesystemen bezüglich Nachhaltigkeit (Projekt GaBE, «Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen»). Die Ergebnisse dienen als Diskussionsgrundlage im Gespräch mit Interessengruppen und Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft.

Die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland Commission) definiert eine Entwicklung als nachhaltig, wenn sie die heutigen Bedürfnisse zu decken vermag, ohne für künftige Generationen die Möglichkeit zu schmälern, die eigenen Bedürfnisse zu befriedigen, wobei die Bedürfnisse vom sozialen Kontext abhängen. Das an der Rio-Konferenz 1992 ausgearbeitete Nachhaltigkeitskonzept betont darüber hinaus, dass die drei Bereiche Ökologie, Ökonomie und Soziales im Entwicklungsprozess gleichermassen zum Tragen kommen sollten. Auf dieser Definition baut auch das Bewertungssystem der GaBE-Studie auf. Analysiert wurden sowohl heutige als auch zukünftige Technologien für die Strom- und Wärmeversorgung. Der Rahmen der Analysen ist zudem nicht nur auf das jeweilige Kraftwerk beschränkt, sondern deckt die gesamte Energiekette ab, z.B. die Brennstoffförderung und -aufbereitung (siehe Abschnitt «Indikatoren»).

In diesem Artikel werden lediglich heutige Stromversorgungssysteme für das Referenzjahr 2000 betrachtet.¹ Die nachfolgenden Resultate basieren zudem auf mehr Technologien, Daten und Indikatoren, als in den hier wiedergegebenen Tabellen 1–4 aufgelistet sind.

Fazit der GaBE-Studie

Fossile Energiesysteme besitzen begrenzte energetische Ressourcen und relativ ungünstige ökologische Eigenschaften. Unter den fossilen Energieträgern ist Erdgas der deutlich umweltfreundlichste. Die Treibhausgas-Emissionen bei der Nutzung von Erdgas sind

Referenz-Technologien

Als Referenzanlagen dienen moderne europäische Kraftwerke, die auch im Datenbanksystem «Ecoinvent» enthalten sind (Tabellen 1 und 2). Als Referenz für Braunkohle- und Steinkohle-Kraftwerke wurden österreichische Anlagen gewählt, da sie hinsichtlich Luftemissionen europaweit die beste Umweltverträglichkeit aufweisen. Im Bereich der Erdgas-Kraftwerke dient eine deutsche Anlage (Kombikraftwerk) als Referenz. Beide erwähnten Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (Gas und Diesel) repräsentieren ebenfalls modernste Technologie. Die verwendeten Kernenergie-Daten basieren auf dem Schweizer Kernenergie-Mix, der aus 55 % Druckwasser-Reaktoren (DWR) und 45 % Siedewasser-Reaktoren (SWR) besteht. Im Fall der Wasserkraft nahm man Bezug auf Schweizer Speicher- und Flusskraftwerke. Bei der Photovoltaik wurden 3-kW_{peak}-Dach- und Fassadeneinheiten berücksichtigt (83 % monokristalline und 17 % polykristalline Solarzellen). Im Fall der Windenergie dienten als Referenz moderne Festland-Anlagen mit einer 800-kW-Turbine und einem Kapazitätsfaktor von 14 %. Schweizer Windbedingungen, wie sie auf dem Mont-Crosin (Jura) herrschen, wurden für die Studie herangezogen. Für nordeuropäische Offshore-Anlagen wurde mit 2-MW-Turbinen und einem Kapazitätsfaktor von 43 % gerechnet. Diese Daten beziehen sich auf den dänischen Küsten-Windpark «Horns Rev».

Die Energieketten, die zu den diversen Referenz-Technologien gehören, sind länderspezifisch oder spiegeln die durchschnittlichen europäischen Verhältnisse (Tabellen 1–4).

Forschungsinformationen

Das GaBE-Projekt am Paul Scherrer Institut befasst sich mit Energiesystemanalysen. Ziel ist eine umfassende Beurteilung heutiger und zukünftiger Energiesysteme. Dazu werden Lebenszyklusanalyse, Einschätzung von Umweltauswirkungen, Risikoanalyse sowie energieökonomische Modelle kombiniert. Darüber hinaus werden Aggregationsmethoden wie etwa Gesamtkostenanalyse (interne und externe Kosten) und Multi-Kriterien-Entscheidungsanalyse (MCDA) angewendet. Letztere basiert auf verschiedenen Nachhaltigkeitskriterien und den dazugehörigen Indikatoren und ermöglicht es, die Erkenntnisse aus den Analysen mit individuellen oder gruppenspezifischen Präferenzen zu kombinieren. Weitere Informationen erscheinen im Newsletter «Energie-Spiegel» (dreimal jährlich) oder unter www.psi.ch/gabe.

Technische Daten der Kraftwerke	Braunkohle (Österreich)	Steinkohle (Österreich)	Erdgas Kombi-kraftwerk (Europa)	Erdgas Wärme-Kraft-Kopplung (Europa)	Diesel Wärme-Kraft-Kopplung (Schweiz)	Kernenergie (Schweiz)
Elektrische Nennleistung [MW]	330	400	400	1	0,2	1000
Auslastungsfaktor	0,54	0,40	0,57	0,46	0,46	0,87
Jährliche Stromproduktion [GWh]	1550	1400	2000	4	0,8	7600
Jährliche Wärmeproduktion [GWh] (th)	–	–	–	4,6	0,9	–
Netto-Wirkungsgrad	0,38	0,42	0,58	0,38 (el) / 0,44 (th)	0,39 (el) / 0,43 (th)	0,32
DeSO _x Effizienz	0,85	0,91	–	–	–	–
DeNO _x Effizienz	0,89	0,80	–	–	0,93	–

(el) elektrisch; (th) thermisch; DeSO_x (Rauchgasentschwefelungsanlage); DeNO_x (Anlage zur Entfernung von Stickstoffoxiden)

Technische Daten der Kraftwerke	Wasser Speicher-kraftwerk (Schweiz)	Wasser Laufkraftwerk (Schweiz und Österreich)	Photovoltaik (Schweiz)	Photovoltaik (Südeuropa)	Wind-Turbine Onshore (auf dem Land) (Schweiz)	Wind-Turbine Offshore (im Meer) (Nordeuropa)
Nennleistung [MW] (Photovoltaik [MWp])	0,5–1200	23–237	0,003	0,003	0,8	2
Durchschnitt [MW]	120	80	–	–	–	–
Auslastungsfaktor	0,24	0,52	0,1	0,15	0,14	0,43
Jährliche Stromproduktion [GWh]	252	364	0,0027	0,0039	0,98	7,5
Netto-Wirkungsgrad	0,84	0,88	0,12	0,12	0,25	0,25

1 + 2

Technische Hauptmerkmale der im Artikel erwähnten Strom-erzeugungssysteme: fossile und nukleare Energieträger (oben) und erneuerbare Energiequellen (unten; Tabellen: PSI)

aber ein negativer Aspekt im Vergleich zur Kernenergie und den erneuerbaren Energieträgern.

Charakteristisch für die «Erneuerbaren» und Kernenergie sind tiefe externe Kosten. Letztere sind ein Mass für die Auswirkungen eines Energiesystems auf Umwelt und Gesundheit. Bezüglich Gesamtkosten – Produktionskosten und externe Kosten – erreichen unter Schweizer Bedingungen die Kernenergie und die Wasserkraft (insbesondere die Flusskraftwerke) die besten Resultate.

Dies bedeutet, dass die Kernenergie eine sehr gute Wirtschaftlichkeit und eine gute Umweltbilanz aufweist. In der westlichen Welt sind zudem ausgezeichnete Sicherheitsstandards vorhanden. Dies vermag dennoch die Ängste nicht zu lindern, die Teile der Bevölkerung gegenüber Unfällen mit sehr schweren Schadensfolgen und den Problemen bei der Lagerung des mittel- und hochradioaktiven Abfalls äussern.

Bei den erneuerbaren Energiequellen zeigt die Wasserkraft zwar ein äusserst vorteilhaftes Gesamtbild, lokal jedoch können negative Umwelteffekte dieses Bild trüben – etwa wenn Ökosysteme beeinträchtigt werden.

Auch die «neuen» erneuerbaren Energieträger (Sonne und Wind) sind den fossilen Energieträgern an Umweltfreundlichkeit meist stark überlegen. Ein Problem bei den «neuen Erneuerbaren» ist jedoch, dass sie teilweise noch grosse Mengen an Energie- und Materialressourcen benötigen. Schliesslich unterliegt die Erzeugung von Wind- und Solarstrom wechselnden Wetterbedingungen und muss durch andere Energie-

quellen ergänzt werden, um eine zuverlässige Stromversorgung zu gewährleisten. Windenergie schneidet generell gut ab, besonders bei guten Windverhältnissen, wie sie an den Küsten Nordeuropas herrschen (Offshore-Anlagen). Im Gegensatz dazu ist die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von photovoltaischen Systemen noch gering, hauptsächlich wegen der hohen Produktionskosten für Solarzellen.

Jedes Energiesystem besitzt seine spezifischen Vor- und Nachteile. Ein einzelnes Stromversorgungssystem, das alle Grundbedingungen der nachhaltigen Entwicklung erfüllt, in den wichtigsten technischen Kriterien deutlich besser abschneidet als alle anderen und zudem keine Risiken birgt, existiert nicht.

Die Indikatoren

Für eine umfassende Beurteilung müssen unter Umständen noch mehr Umweltfaktoren berücksichtigt werden, als in den Tabellen 3 und 4 aufgelistet sind. Darüber hinaus können sich Anzahl und Auswahl der Indikatoren ändern, je nachdem, welches System bewertet werden soll und was das Ziel der Bewertung ist.

Die Umweltfaktoren basieren auf einer Lebenszyklusanalyse (LCA).¹ Diese erlaubt die Berücksichtigung eines breiten Spektrums an Umwelteinflüssen, ohne Beschränkung auf Landesgrenzen. Ausserdem berücksichtigt sie nicht nur die Emissionen aus Kraftwerksbau, -betrieb und -abbruch, sondern auch die Umweltlasten, die aus allen vor- und nachgelagerten Prozessschritten innerhalb der Energieketten entstehen. Das schliesst die Gewinnung, Verarbeitung, den Transport der Brennstoffe und auch die Abfallbehandlung und -entsorgung mit ein. Neben den direkten Emissionen aus den einzelnen Abschnitten der Ener-

Indikatoren	Einheit	Braunkohle (Österreich)	Steinkohle (Österreich)	Erdgas Kombi- kraftwerk (Europa)	Erdgas Wärme- Kraft-Kopplung (Europa)	Diesel Wärme- Kraft-Kopplung (Schweiz)	Kernenergie (Schweiz)
Treibhausgase	kg (CO ₂ -Äq.) / kWh	1,06 E+00	9,68 E-01	4,23 E-01	5,63 E-01	7,29 E-01	7,88 E-03
SO ₂	kg / kWh	7,60 E-04	5,37 E-04	1,47 E-04	1,90 E-04	1,00 E-03	6,09 E-05
NO _x	kg / kWh	7,15 E-04	8,15 E-04	3,29 E-04	1,04 E-03	1,04 E-03	4,70 E-05
PM 10	kg / kWh	1,74 E-04	1,70 E-04	1,82 E-05	1,94 E-05	8,84 E-05	1,44 E-05
Input fossile Energie	MJ-Äq. / kWh	8,55 E+00	1,06 E+01	7,73 E+00	9,82 E+00	1,05 E+01	1,11 E-01
Eisenerz	kg / kWh	6,26 E-04	1,87 E-03	1,08 E-03	1,44 E-03	2,24 E-03	3,09 E-04
Nicht radioaktive Abfälle	kg / kWh	1,57 E-01	1,24 E-01	1,79 E-03	3,22 E-03	1,38 E-02	4,66 E-03
Radioaktive Abfälle	kg / kWh	8,28 E-05	2,25 E-04	1,48 E-05	2,39 E-05	2,33 E-04	1,16 E-02*
Interne Kosten*	Rp / kWh	n.v.	5,7-7,4	4,7-5,8	~9	~9-~13	4,1-6
Externe Kosten*	Rp / kWh	n.v.	3,1-15,8	0,8-5,5	n.v.	n.v.	0,2-1,3
Gesamtkosten*	Rp / kWh	n.v.	8,8-23,2	5,5-11,3	n.v.	n.v.	4,3-7,3

+ 99 % davon sind schwach radioaktive Abfälle aus der Uranerzaufbereitung, die nicht im geologischen Endlager entsorgt werden.

* Die dargestellten Bandbreiten beziehen sich auf verschiedene Technologien, wie sie in der Schweiz und/oder in westeuropäischen Ländern angewendet werden. Diese Technologien können schlechtere Leistungen aufweisen als die in den Tabellen 1 und 2 enthaltenen Referenztechnologien, wobei auch ihre geografische Lage mehr oder weniger vorteilhaft sein kann.

n.v. bedeutet Daten nicht vorhanden

Indikatoren	Einheit	Wasser Speicher- kraftwerk (Schweiz)	Wasser Laufkraftwerk (Schweiz und Österreich)	Photovoltaik (Schweiz)	Photovoltaik (Südeuropa)	Wind-Turbine Onshore (auf dem Land) (Schweiz)	Wind-Turbine Offshore (im Meer) (Nordeuropa)
Treibhausgase	kg (CO ₂ -Äq.) / kWh	4,22 E-03	3,03 E-03	7,91 E-02	5,38 E-02	2,01 E-02	9,56 E-03
SO ₂	kg / kWh	3,82 E-06	3,61 E-06	2,03 E-04	1,38 E-04	1,55 E-04	2,78 E-05
NO _x	kg / kWh	2,61 E-05	3,14 E-05	2,91 E-04	1,98 E-04	8,24 E-05	4,06 E-05
PM 10	kg / kWh	1,35 E-04	1,61 E-04	9,93 E-05	6,76 E-05	6,90 E-05	3,76 E-05
Input fossile Energie	MJ-Äq. / kWh	3,05 E-02	2,82 E-02	1,14 E+00	7,76 E-01	2,63 E-01	1,15 E-01
Eisenerz	kg / kWh	2,17 E-04	3,10 E-04	1,37 E-03	9,33 E-04	2,83 E-03	1,59 E-03
Nicht radioaktive Abfälle	kg / kWh	2,98 E-02	2,33 E-02	5,97 E-02	4,07 E-02	1,33 E-01	4,07 E-02
Radioaktive Abfälle	kg / kWh	1,04 E-05	6,51 E-06	2,39 E-04	1,62 E-04	6,24 E-05	1,62 E-04
Interne Kosten*	Rp / kWh	4,0-10	2,9-7,4	70-100	n.v.	20-50	~9-~13
Externe Kosten*	Rp / kWh	0-1,2	gering	0,1-1,5	gering	0,1-0,6	gering
Gesamtkosten*	Rp / kWh	4,0-11,2	2,9-~8,0	70,1-101,5	n.v.	20,1-50,6	~9-~13,5

* Die dargestellten Bandbreiten beziehen sich auf verschiedene Technologien, wie sie in der Schweiz und/oder in westeuropäischen Ländern angewendet werden. Diese Technologien können schlechtere Leistungen aufweisen als die in den Tabellen 1 und 2 enthaltenen Referenztechnologien, wobei auch ihre geografische Lage mehr oder weniger vorteilhaft sein kann.

n.v. bedeutet Daten nicht vorhanden

3 + 4

Ausgewählte Indikatoren der beschriebenen Stromerzeugungssysteme: fossile und nukleare Energieträger (oben) und erneuerbare Energiequellen (unten).
3 E+06 bedeutet 3 mal 10 hoch 6, also 3 Mio; 3 E-01 bedeutet 3 mal 10 hoch -1, also 0,3 (Tabellen: PSI)

gieketten deckt eine LCA auch indirekte Emissionen und den Energiebedarf bei der Materialproduktion ab. Beispielsweise stammen die radioaktiven Abfälle für Windenergiesysteme (Tabelle 4) aus dem Stromverbrauch, da die Elektrizität, die für die Herstellung von Windturbinen nötig ist, heute u. a. auch von Kernkraftwerken produziert wird.

Die internen Kosten (Produktionskosten) umfassen eine Bandbreite von Werten für vorhandene Schweizer Kraftwerke, oder sie schätzen die zu erwartenden Kosten für Neubauten ab. Bei der Abschätzung der externen Kosten dominieren die Auswirkungen auf die Gesundheit. Diese wiederum basieren auf den Emissionen der Hauptluftschadstoffe: SO₂, NO_x, PM 10 (lungengängige Partikel, die kleiner als zehn Mikrometer sind). Die Werte für die externen Kosten in Tabelle 3 und 4 widerspiegeln Bandbreiten für Westeuropa.^{2/3}

Die Gesamtkosten repräsentieren die ökonomischen und ökologischen Komponenten der Nachhaltigkeit. Die wichtigste Einschränkung bei dieser Bewertung ist aber, dass einige Elemente der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit in den Gesamtkosten nicht angemessen

wiedergegeben sind. Ein Beispiel dafür ist die Aversion gegenüber hypothetischen schweren Reaktorunfällen. Dies kann für die Akzeptanz eines Energiesystems essenziell sein.

Stefan Hirschberg, Dr. Ing., Leiter Ganzheitliche Systemanalysen, stefan.hirschberg@psi.ch
 Roberto Dones, dipl. Ing., Systemanalytiker, roberto.dones@psi.ch
 Paul Scherrer Institut (PSI), 5232 Villigen

Literatur

- 1 Dones R., Bauer C., Burger B., Faist M., Frischknecht R., Heck T., Jungbluth N. und Röder A.: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent 2000 No. 6. Paul Scherrer Institut, Villigen, 2003.
- 2 European Commission: ExternE, Externalities of Energy. European Commission, Brussels, 1999.
- 3 Hirschberg S. und Jakob M.: Cost Structure of the Swiss Electricity Generation under Consideration of External Costs, SAE Seminar «Strompreise zwischen Markt und Kosten: Führt der freie Strommarkt zur Kostenwahrheit?», Tagungsband, Bern, 1999.