

Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuk- learen, fossilen und erneuer- baren Strombereitstellung - Arbeitspapier -

erstellt von

Uwe R. Fritsche
Koordinator Bereich Energie & Klimaschutz
Öko-Institut, Büro Darmstadt

unter Mitarbeit von

Lothar Rausch und Klaus Schmidt

Darmstadt, März 2007

Öko-Institut e.V.

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
D-64295 Darmstadt
Tel.: (06151) 8191-0
Fax: (06151) 8191-33

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 6226
D-79038 Freiburg
Tel.: +49-(0)761-452950
Fax: +49-(0)761-475437

Büro Berlin
Novalisstraße 10
D-10115 Berlin
Tel.: +49-(0)30-280486-80
Fax: +49-(0)30-280486-88

www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabellenverzeichnis | ii |
| Abbildungsverzeichnis | ii |
| | |
| 1 Einleitung und Fragestellung..... | 1 |
| 2 Atomstrom: CO ₂ -frei? | 2 |
| 3 Lebenszyklusanalyse: Ergebnisse für Atomstrom | 5 |
| 4 Atomstrom im Vergleich: Treibhausgasbilanzen für fossile und erneuerbare Stromerzeugung | 7 |
| 5 „Brutto“-Betrachtung für Treibhausgasbilanzen der Strom- und Wärmeerzeugung | 9 |
| 6 Stromerzeugungskosten | 13 |
| 7 Treibhausgas-Vermeidungskosten | 14 |
| | |
| Literatur..... | 16 |
| Abkürzungsverzeichnis | 17 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabelle 1 | Treibhausgasbilanz der Bereitstellung von Uran-Brennelementen frei AKW in verschiedenen Ländern | 5 |
| Tabelle 2 | Treibhausgasbilanz der Bereitstellung von Strom aus AKW..... | 6 |
| Tabelle 3 | Gesamte Treibhausgas-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) | 7 |
| Tabelle 4 | Gesamte Treibhausgas-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung | 9 |
| Tabelle 5 | Bandbreiten für Stromerzeugungskosten (ohne externe Kosten) | 13 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------|---|----|
| Bild 1 | Struktur von Energie- und Stoff-Prozessketten | 3 |
| Bild 2 | Grundlegende Struktur der GEMIS-Datenbank..... | 4 |
| Bild 3 | Gesamte Treibhausgas-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) | 8 |
| Bild 4 | Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung; Restwärme aus Öl-Heizung..... | 10 |
| Bild 5 | CO ₂ -Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung; Restwärme aus Öl-Heizung | 11 |
| Bild 6 | Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung; Restwärme aus Gas-Heizung..... | 12 |
| Bild 7 | Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten für ausgewählte Stromsysteme | 14 |

1 Einleitung und Fragestellung

Die politische, gesellschaftliche und wissenschaftliche Debatte über die Atomenergie reicht bereits lange zurück: Sie hat ihren Ursprung in den frühen 1970er Jahren angesichts von Sorgen über Niedrigstrahlung, nuklearen Unfällen und der „Entsorgung“ abgebrannter Brennelemente. In den späteren 1970er Jahren richtete sich unter dem Eindruck der Ölpreiskrisen das Augenmerk auf begrenzte Energieressourcen, und die nukleare Option versprach durch die Kombination von Wiederaufarbeitung und Brüter-Technologie eine Entlastung. Auch Risiken der Proliferation wurden in dieser Phase diskutiert. In den 1980er Jahren wurde vor allem die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie und ihrer Alternativen thematisiert.

Sorgen über den globalen Treibhauseffekt kulminierten in der Rio-Konvention über Klimawandel in den 1990er Jahren sowie dem im Februar 2005 in Kraft getretenen Kyoto-Protokoll. Befürworter der Atomenergie argumentieren nunmehr vermehrt, dass nuklear erzeugter Strom aufgrund der „CO₂-Freiheit“ zu bevorzugen sei. Seit dem 11. September 2001 werden auch Gefahren von nuklearem Terrorismus debattiert.

Parallel zu dieser Debatte verlangsamte sich der Ausbau der Atomenergie aufgrund steigender Kosten und in OECD-Ländern gab es nach den Unfällen von Harrisburg (1981) und Tschernobyl (1986) ein *de facto*-Moratorium. Obwohl immer wieder Stimmen zu einer nuklearen „Renaissance“ zu hören sind, entschieden mehrere EU-Länder, die *Nutzung* der Atomenergie mittel- oder langfristige zu *beenden*. In anderen Teilen der (sich ökonomisch entwickelnden) Welt ist ein bestenfalls langsamer Ausbau der nuklearen Stromerzeugung zu beobachten¹.

Die Breite nuklearer Risiken zu diskutieren – vom Uranbergbau über schwere Reaktorunfälle und Freisetzung radioaktiver Stoffe in der Wiederaufarbeitung bis hin zur Lagerung nuklearer Abfälle – würde den Umfang dieses Arbeitspapiers sprengen. Vielmehr liegt der Schwerpunkt auf der Analyse von zwei Argumenten:

- Atomenergie sei *CO₂-frei* und
- Atomenergie sei *preiswert*

Dies geschieht durch die Untersuchung von Gesamtemissionen und Lebenszyklus-Kosten von nuklearen, fossilen und erneuerbaren Technologien zur Strombereitstellung. Die Resultate werden Ergebnissen in der aktuellen Literatur gegenüber gestellt und um Angaben zu den relativen Kosten der CO₂-Minderung im Stromsektor ergänzt.

Die verwendeten Daten beruhen auf Studien des Öko-Instituts, die von einer Reihe von Institutionen unterstützt wurden, u.a. vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie dem Umweltbundesamt (UBA).

¹ Für Details zu Status und Perspektiven der weltweiten Nuklearindustrie vgl. Schneider/Frogatt (2004) sowie Mez/Thomas/Schneider (2006).

2 Atomstrom: CO₂-frei?

Der scheinbare Vorteil von Atomkraftwerken basiert auf der Tatsache, dass sie im Betrieb *keine direkten* CO₂-Emissionen verursachen. Allerdings erfordert die nukleare Erzeugung von Elektrizität den Abbau und die Verarbeitung von Uranerz, die Anreicherung des Urans, die Brennelementherstellung usw. – dies ist die so genannte *vorgelagerte Prozesskette*².

Atomstrom benötigt nicht als einzige Energiequelle vorgelagerte Prozesse, bis im Kraftwerk Strom erzeugt werden kann: auch fossile Brennstoffe und Biomasse müssen gewonnen, verarbeitet, umgewandelt und transportiert werden.

Weiter sind für den *Bau* von Atomkraftwerken und Anlagen der Vor- und Folgestufen Beton, Kupfer, Stahl, und andere Materialien erforderlich. Werden diese mit einbezogen, umfasst die Analyse den vollständigen *Lebenszyklus* des nuklearen Systems³.

Die für diese Zwecke benötigte Energie wird teils mit fossilen Energieträgern erzeugt, wodurch Treibhausgasemissionen verursacht werden. Einige zusätzliche Treibhausgasemissionen resultieren direkt aus chemischen Reaktionen bei der Materialverarbeitung (z.B. der Herstellung von Zement).

Entsprechend emittieren Atomkraftwerke – ebenso wie andere Energieerzeugungsanlagen – *indirekt* CO₂ sowie andere Treibhausgase.

Da der Treibhauseffekt ein globales Phänomen ist und Treibhausgas-Emissionen unabhängig vom Ort ihrer Entstehung dazu beitragen, muss der *vollständige Lebenszyklus* von der Primärenergiegewinnung bis zum Energieertrag betrachtet werden, um Treibhausgasemissionen von Energieprozessen zu ermitteln und zu vergleichen.

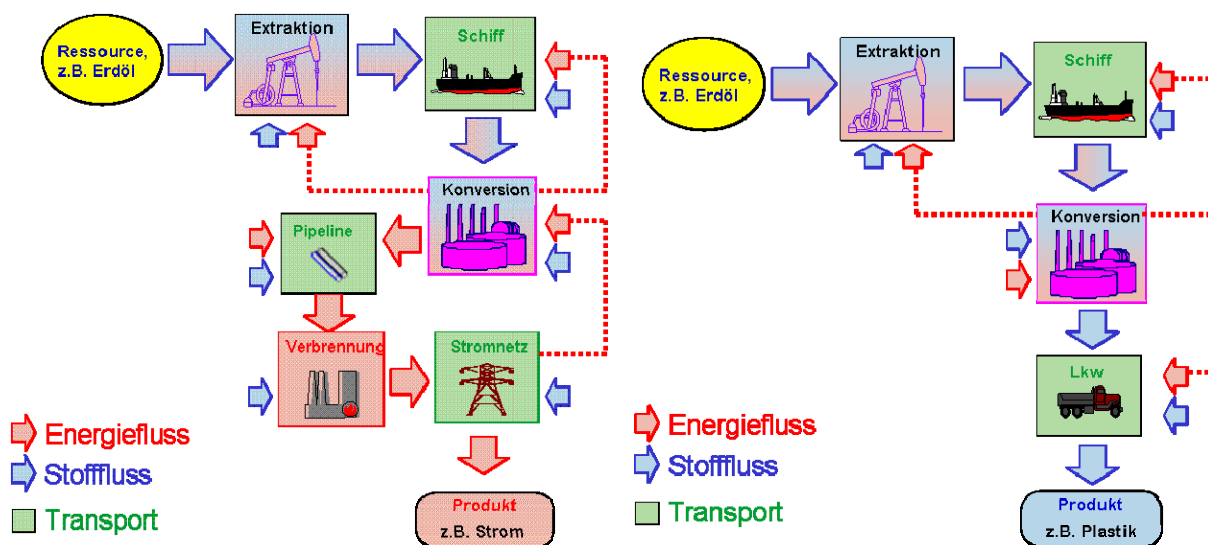
Dafür ist es erforderlich, allen relevanten Schritten des Lebenszyklus der Energietechnologien zu folgen und die Aktivitäten zu identifizieren, die direkt oder indirekt Treibhausgase emittieren.

Die folgende Abbildung zeigt die grundsätzliche Struktur von Energie-Prozessketten auf der linken Seite und Material-Prozessketten auf der rechten Seite.

² Zugleich sind nach dem Kraftwerkseinsatz *nachgelagerte* Prozesse notwendig, um (nukleare) Abfälle zu verarbeiten und zu lagern. Aufgrund der bisher weltweit fehlenden Lösung des Entsorgungsproblems liegen keine Daten vor, um mit einiger Sicherheit dafür Lebenswegbilanzen zu erstellen. Das Öko-Institut bemüht sich derzeit um eine Abschätzung zu den erwartbaren Größenordnungen und wird die Ergebnisse im Laufe des Jahres 2007 publizieren.

³ Dies gilt ebenso für fossile und erneuerbare Energiesysteme. Eine ganzheitliche Bilanzierung muss *alle* Aufwendungen für Brennstoff-Vorketten sowie den Bau und Betrieb aller beteiligten Anlagen einbeziehen.

Bild 1 Struktur von Energie- und Stoff-Prozessketten



Quelle: Öko-Institut

Je nach Technologie und Brennstoffcharakteristik können Emissionen und andere Umweltwirkungen in jedem Schritt („Prozess“) entlang des Energieflusses auftreten.

Zusätzlich zum direkten Energiefluss sind *Materialien* nötig, um die Energieanlagen zu errichten (z. B. Kraftwerke, Pipelines, Übertragungsleitungen). Für diesen Materialeinsatz müssen ähnliche Vorstufen betrachtet werden. Die *Kombination von Energie- und Materialprozessketten* ergibt den so genannten *Lebenszyklus*, in welchem Wirkungen auf drei Ebenen auftreten können:

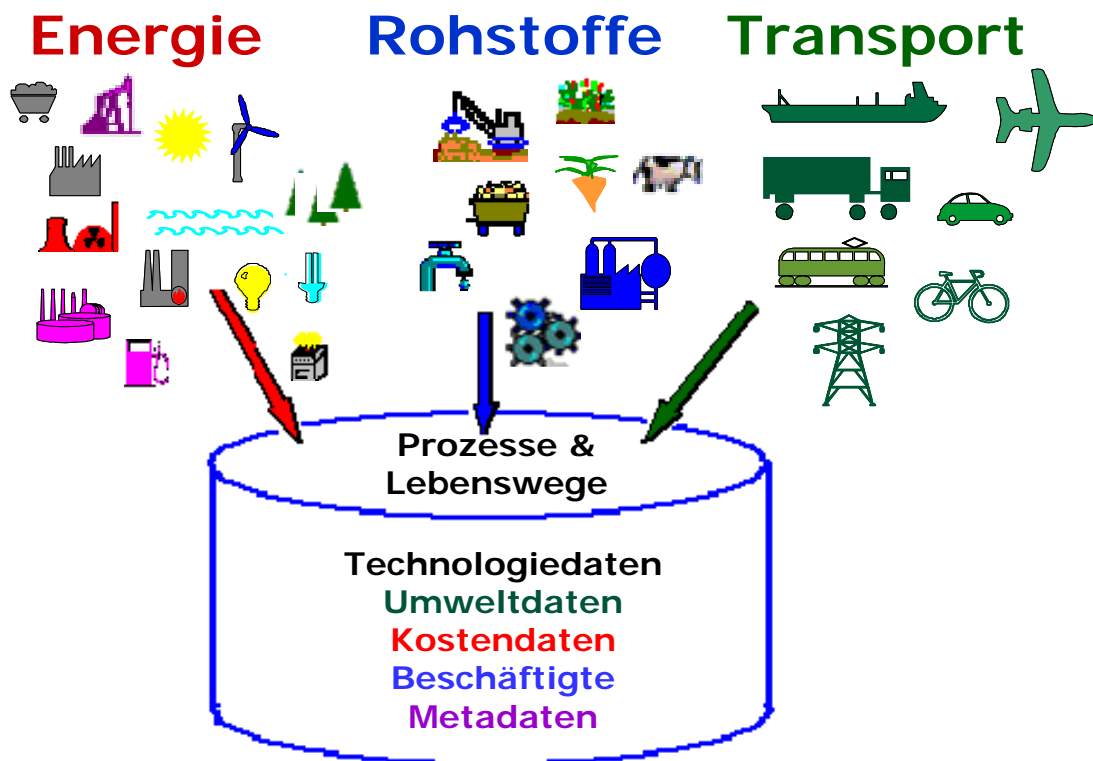
- direkte Wirkungen aus dem *Betrieb* von Prozessen
- indirekte Wirkungen von *Hilfsinputs* in diese Prozesse (inklusive Transporte), und
- indirekte Wirkungen durch die Herstellung von Materialien, die in allen Prozessen zum *Bau* verwendet werden.

In der Realität sind diese drei Ebenen miteinander *verknüpft* - zum Beispiel stammt Strom zur Stahlherstellung aus einem Kraftwerk, das teilweise aus Stahl besteht. Daher berücksichtigt die Lebenszyklusanalyse die *Interaktionen* zwischen allen Prozessen.

Um eine Lebenszyklusanalyse praktisch durchführen zu können, muss eine große Datenmenge erhoben und verarbeitet werden (inklusive der geographischen Variation von Energieprozessen, Brennstoffqualitäten, Transportentfernungen usw.).

Seit 1987 pflegt das Öko-Institut das Computermodell GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme), in welchem diese Daten gesammelt sind und kontinuierlich aktualisiert und erweitert werden.

Bild 2 Grundlegende Struktur der GEMIS-Datenbank



Quelle: Öko-Institut

Mit dieser Datenbank und einem integrierten Berechnungstool kann GEMIS die Lebensweganalyse schnell und transparent durchführen und so die Umwelteffekte ganzheitlich bilanzieren.

Parallel können damit auch die *Kosten* der Bereitstellung von Energie, Stoffen und Transportdienstleistungen ermittelt werden, und seit der Version 4.3 des Computermodells lassen sich zusätzlich auch die direkten und indirekten *Beschäftigungseffekte* berechnen (vgl. ÖKO 2007).

GEMIS ist mit allen Daten ein *kostenlos verfügbares* EDV-Werkzeug, das seit 20 Jahren vom Öko-Institut gepflegt und kontinuierlich weiterentwickelt wird. Der Datenbestand umfasst derzeit etwa 10.000 Prozesse und rund 1.000 Produkte aus über 50 Ländern.

Weitere Informationen zu GEMIS sowie die Möglichkeit zum Herunterladen der Software bieten die GEMIS-Internetseiten (www.gemis.de).

3 Lebenszyklusanalyse: Ergebnisse für Atomstrom

Die Atomenergie ist Teil von Energie-Lebenszyklen. Daher enthält GEMIS auch Daten zu Atomkraftwerken, ihren vorgelagerten Prozessketten und die für den Bau von Kraftwerken erforderliche Materialien.

Da Uran in verschiedenen Ländern mit unterschiedlichen Techniken abgebaut und die Anreicherung des spaltbaren Anteils ebenfalls in mehreren Ländern mit verschiedenen Technologien erfolgt, ist eine differenzierte Betrachtung der Lebenswege für Atomstrom erforderlich.

Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis der GEMIS-Bilanzen für die Bereitstellung von Brennelementen frei Atomkraftwerk (AKW), d.h. *ohne* ihre Nutzung und ohne die Herstellung des AKW.

Da neben CO₂ auch noch andere klimarelevante Emissionen in den vorgelagerten Prozessketten entstehen (vorwiegend CH₄ und N₂O), wurden alle Treibhausgase (THG) in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt⁴.

Tabelle 1 Treibhausgasbilanz der Bereitstellung von Uran-Brennelementen frei AKW in verschiedenen Ländern

| in g/kWh _{th} (input in AKW) | CO ₂ -Äquivalent | nur CO ₂ |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Uran-Brennelement frei AKW-DE | 8,9 | 8,5 |
| Uran-Brennelement frei AKW-FR | 1,3 | 1,3 |
| Uran-Brennelement frei AKW-UK | 13,9 | 12,8 |
| Uran-Brennelement frei AKW-RU | 19,7 | 18,7 |
| Uran-Brennelement frei AKW-US | 18,6 | 17,9 |

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts mit GEMIS 4.4

Die Uran-Vorkette für Brennelemente in Frankreich (FR) ist im Hinblick auf Treibhausgase emissionsarm, weil für die Anreicherung viel Atomstrom eingesetzt wird.

Demgegenüber wird in Russland (RU) und den Vereinigten Staaten von Amerika (US) vergleichsweise viel an Treibhausgasen freigesetzt, weil die Anreicherung über Diffusion erfolgt und der eingesetzte Strom zum Teil aus Kohlekraftwerken stammt. Im Ergebnis liegen sie etwa doppelt so hoch wie in Deutschland (DE), während Großbritannien (UK) dazwischen liegt.

Werden nun diese Vorketten mit dem Aufwand für Bau und Betrieb von AKW verknüpft und die Treibhausgase auf die erzeugte Strommenge umgerechnet, ergeben sich die in der folgenden Tabelle gezeigten Ergebnisse.

⁴ CO₂-Äquivalente wurden über die auf CO₂ bezogenen relativen Treibhauspotentiale für CH₄ und N₂O berechnet für einen Integrationszeitraum von 100 Jahren (vgl. IPCC 2007).

Tabelle 2 Treibhausgasbilanz der Bereitstellung von Strom aus AKW

| in g/kWh _{el} | CO ₂ -Äquivalent | nur CO ₂ |
|------------------------|-----------------------------|---------------------|
| AKW-DE | 32 | 31 |
| AKW-FR | 8 | 7 |
| AKW-UK | 32 | 30 |
| AKW-RU | 65 | 61 |
| AKW-US | 62 | 59 |

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts mit GEMIS 4.4; Werte gerundet

„Deutscher“ Atomstrom führt zu rund 32 g CO₂-Äquivalente je kWh_{el}, im Vergleich zu 65 g/kWh_{el} für AKW-Strom in Russland.

Diese Ergebnisse liegen in der Bandbreite anderer Studien für CO₂: 10 bis 60 g/kWh_{el} (IEA 1994; CRIEPI 1995) bis 120 g/kWh_{el} bei Urangehalte von 1% (van Leeuwen/Smith 2004).

Auch die Ergebnisse für die Teilschritte der nuklearen Prozessketten in GEMIS stimmen gut mit aktuellen anderen Studien überein, so z.B. für die Uranförderung Mudd/Diesendorf (2007) und die Anreicherung sowie Analysen von AKW-Betreibern (WNA 2006).

4 Atomstrom im Vergleich: Treibhausgasbilanzen für fossile und erneuerbare Stromerzeugung

Wie vergleicht sich nun Atomstrom mit den spezifischen Emissionen (je kWh) anderer Strombereitstellungssysteme, zum Beispiel aus fossiler Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbaren Energien oder auch der Einsparung von Elektrizität? Die Ergebnisse entsprechender GEMIS-Rechnungen zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 3 Gesamte Treibhausgas-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung)

| Strom aus: | Emissionen in g/kWh _{el} | |
|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| | CO ₂ -Äquivalente | nur CO ₂ |
| AKW (Uran nach Import-mix) | 32 | 31 |
| AKW (Uran nur aus Russland) | 65 | 61 |
| Import-Steinkohle-Kraftwerk | 949 | 897 |
| Import-Steinkohle-Heizkraftwerk | 622 | 508 |
| Braunkohle-Kraftwerk | 1.153 | 1.142 |
| Braunkohle-Heizkraftwerk | 729 | 703 |
| Erdgas-GuD-Kraftwerk | 428 | 398 |
| Erdgas-GuD-Heizkraftwerk | 148 | 116 |
| Erdgas-Blockheizkraftwerk | 49 | 5 |
| Biogas-Blockheizkraftwerk | -409 | -414 |
| Wind Park onshore | 24 | 23 |
| Wind Park offshore | 23 | 22 |
| Wasser-Kraftwerk | 40 | 39 |
| Solarzelle (multikristallin) | 101 | 89 |
| Solarstrom-Import (Spanien) | 27 | 25 |
| Strom-Effizienz (mittel) | 5 | 5 |

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.4

In der Tabelle wurde zwischen Atomstrom aus einem „typischen“ deutschen AKW mit angereichertem Uran aus einem Mix von Lieferländern und einer *oberen Grenze* für den Fall gerechnet, das Uran nur aus Russland stammt.

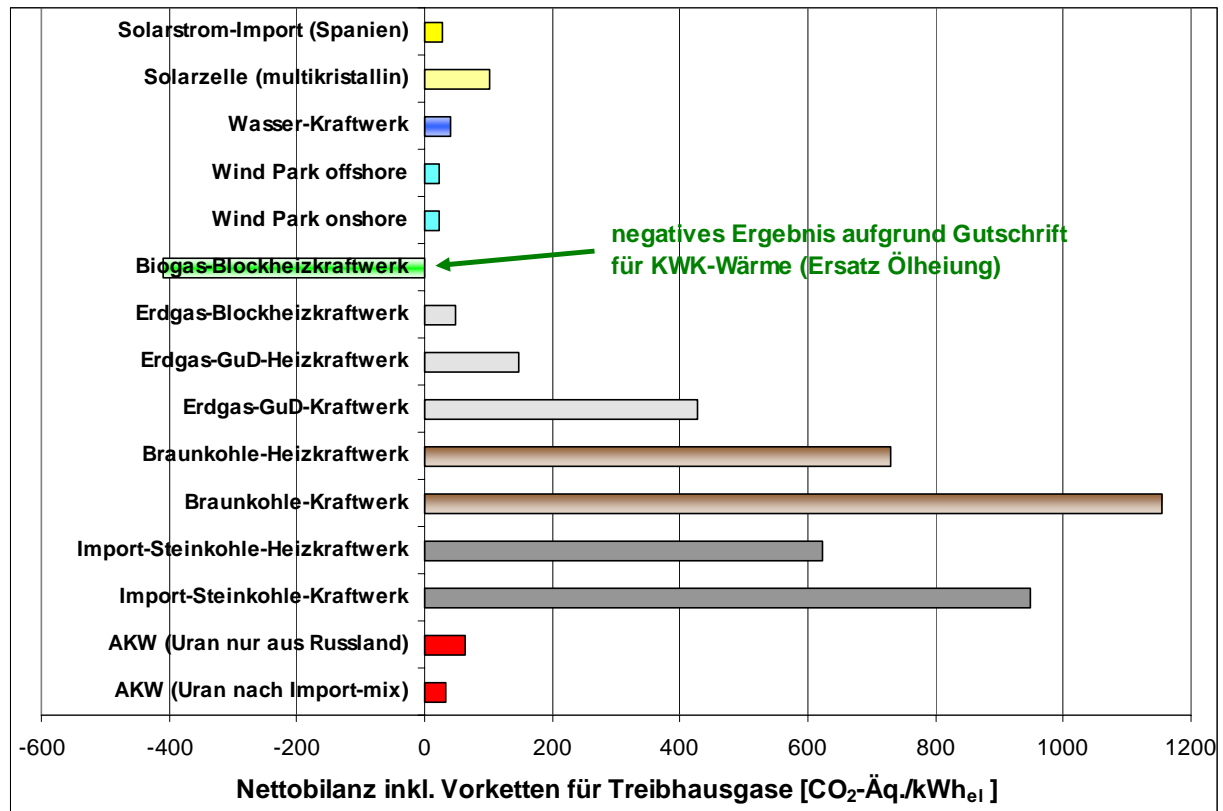
Bei den fossilen Kraft- und Heizkraftwerken wurden ebenfalls alle Vorketten – von der Erdgas-, Kohle- und Ölförderung über Aufbereitung und Transporte bis zum Bau der Anlagen – und die typischen Verhältnisse für Importe einbezogen.

Bei den erneuerbaren Energien wird die Treibhausgasbilanz, wie bei der Energieeffizienz auch, vorwiegend durch die Herstellung der Energiewandler (Solarzellen, Windrotoren usw.) bestimmt, einzig bei Biomasse gibt es noch andere vorgelagerte Prozesse.

Die *rechnerisch* negativen Emissionen des BHKW mit Biogas ergeben sich, weil die Gutschrift für die in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Wärme größer ist als die Ge-

samtemissionen des BHKW, das CO₂-neutrales Biogas einsetzt. Dies zeigt die folgende Abbildung nochmals grafisch.

Bild 3 Gesamte Treibhausgas-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung)



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.4

Beim Vergleich von *reinen* Strom-Optionen wie Atom- oder Windenergie mit der *kombinierten* Erzeugung von Wärme und Strom (Kraft-Wärme-Kopplung = KWK) ist der *nicht*-elektrische - aber nutzbare - Wärmeertrag aus dem KWK-System zu berücksichtigen: Hierfür werden die *gesamten* Emissionen des KWK-Prozesses ermittelt (Erzeugung von Strom *und* der Wärme), und davon die Emissionen eines Heizsystems abgezogen, das *dieselbe* Wärmemenge liefern würde. Die KWK-Abwärme ersetzt ja Wärmelieferungen aus anderen Systemen - etwa einer Ölheizung - und damit auch die entsprechenden Emissionen⁵.

Der Vergleich des Atomstroms mit anderen Optionen zeigt, dass die *Netto*-Treibhausgasemissionen von *biogas*betriebenen Blockheizkraftwerken *niedriger* sind als die von Atomstrom, und auch Erdgas-BHKW fast gleichauf mit AKW liegen. Günstig sind zudem die anderen erneuerbaren Energien und die Stromeffizienz.

⁵ Das nächste Kapteiler zeigt ergänzend die „Brutto“-Emissionsbilanz, die ohne Gutschriftenverfahren arbeitet.

5 „Brutto“-Betrachtung für Treibhausgasbilanzen der Strom- und Wärmeerzeugung

Anstelle der im vorigen Kapitel dargestellten Nettobilanzen für „Nur“-Strom aus KWK-Systemen, bei denen eine Gutschrift für nutzbare Abwärme verrechnet wird, kann durch eine Erweiterung der Vergleichsbasis auf Strom *und* Wärme auch eine so genannte „Brutto“-Bilanz erfolgen, bei der *keine* Gutschriften verwendet werden.

Da Heiz- und Blockheizkraftwerke unterschiedliche KWK-Wärmemengen bereitstellen, wurde für die folgende Betrachtung die nutzbare Abwärmemenge des kleinen BHKW als Basis gewählt, d.h. 2 kWh_{th} (Wärme) pro kWh_{el} (Strom) und bei den anderen KWK-Systemen die geringere nutzbare Abwärmemenge durch Teilbeiträge aus der fossilen Heizung ausgeglichen.

Der Vergleich von 1 kWh_{el} Atomstrom *plus* 2 kWh_{th} Wärme aus dezentraler Heizung mit der *gemeinsamen* Erzeugung von Strom *und* Wärme in Heizkraftwerken (Braun- und Steinkohle, Erdgas) der 100 MW_{el}-Klasse sowie kleinen (50 kW_{el}) und großen (500 kW_{el}) Blockheizkraftwerken (Erdgas, Biogas) ergibt die in der folgende Tabelle aufgeführten Ergebnisse.

Tabelle 4 Gesamte Treibhausgas-Emissionen von Stromerzeugungsoptionen (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung

| für 1 kWh _{el} + 2 kWh _{th} | CO ₂ -Äquivalente | | nur CO ₂ | |
|---|------------------------------|---------|---------------------|---------|
| | Restwärme aus | | Restwärme aus | |
| | Öl-Hzg | Gas-Hzg | Öl-Hzg | Gas-Hzg |
| AKW + Einzel-Hzg | 781 | 620 | 772 | 560 |
| Steinkohle-HKW | 1.370 | 1.344 | 1.248 | 1.213 |
| Braunkohle-HKW | 1.477 | 1.450 | 1.443 | 1.408 |
| Gas-GuD-HKW | 897 | 816 | 857 | 751 |
| Gas-BHKW klein | 798 | 798 | 747 | 747 |
| Gas-BHKW gross | 848 | 808 | 804 | 751 |
| Biogas (Gülle)-BHKW klein | 243 | 243 | 228 | 228 |
| Biogas (Gülle)-BHKW gross | 421 | 369 | 407 | 338 |
| Biogas (NaWaRo)-BHKW gross | 471 | 418 | 380 | 311 |

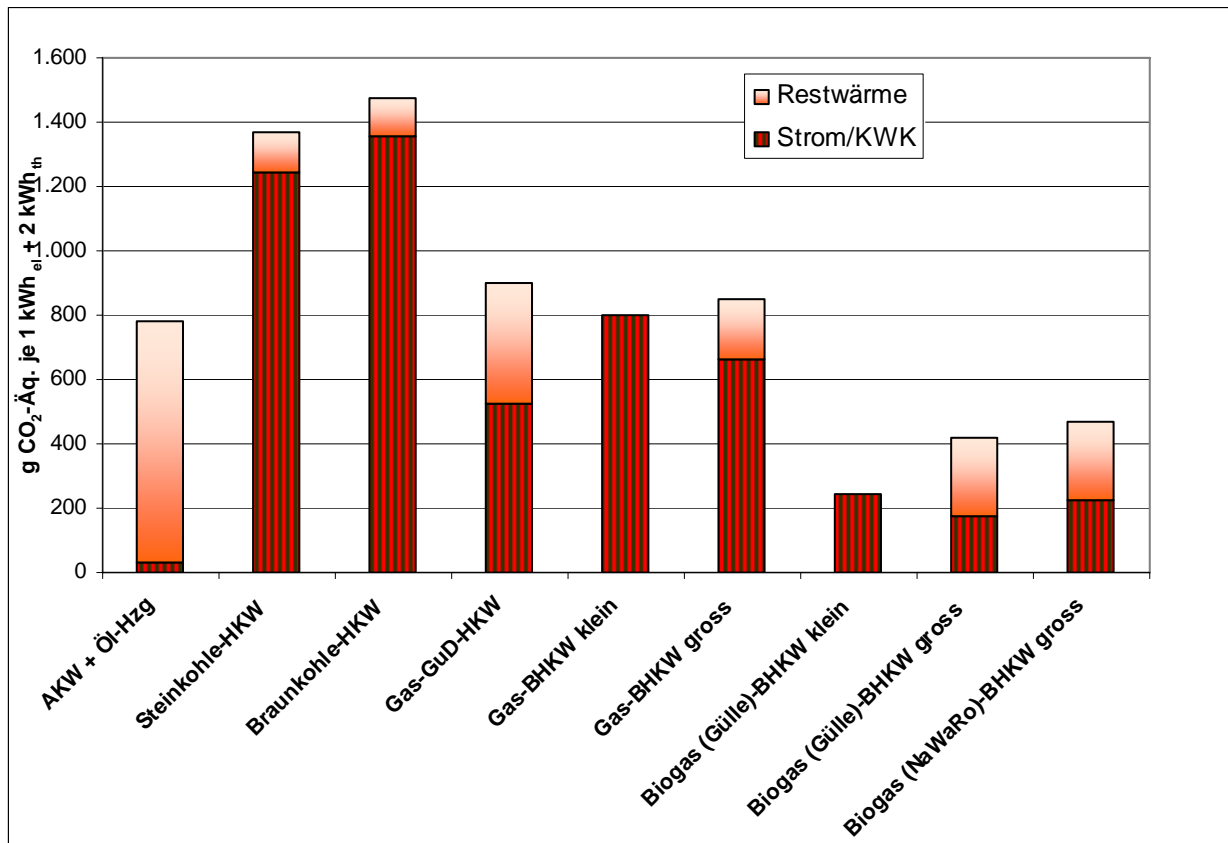
Quelle: eigene Berechnungen nach GEMIS 4.4; Angaben in g je 1 kWh_{el} + 2 kWh_{th}

Das kleine Erdgas-BHKW liegt bei den THG-Emissionen fast gleichauf mit der Variante "AKW + Öl-Heizung", bei *der alleinigen Betrachtung von CO₂ sogar darunter*.

Die Kohle-Varianten liegen etwa doppelt so hoch. Die Biogas-BHKW liegen demgegenüber deutlich darunter, d.h. sie sind wesentlich treibhausgasärmer als die AKW + Heizungs-Varianten.

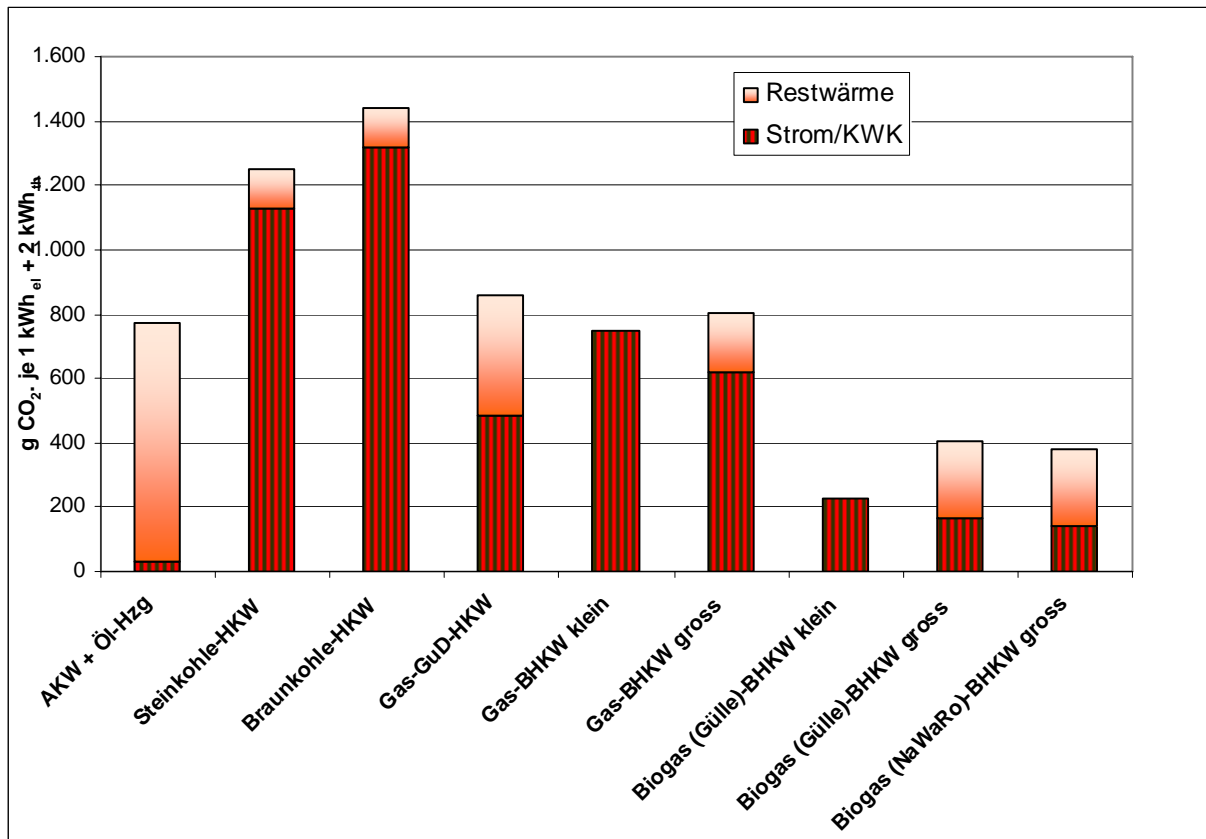
Die Anteile aus der (KWK-)Stromerzeugung und der (Rest-)Wärmebereitstellung zeigen die folgenden Grafiken, zuerst für die THG- und CO₂-Emissionen für den Fall, dass die Nicht-KWK-Wärme aus einer Öl-Heizung stammt.

Bild 4 Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung; Restwärme aus Öl-Heizung



Quelle: eigene Berechnungen nach GEMIS 4.4; Werte für 1 kWh_{el} + 2 kWh_{th}

Bild 5 CO₂-Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung; Restwärme aus Öl-Heizung

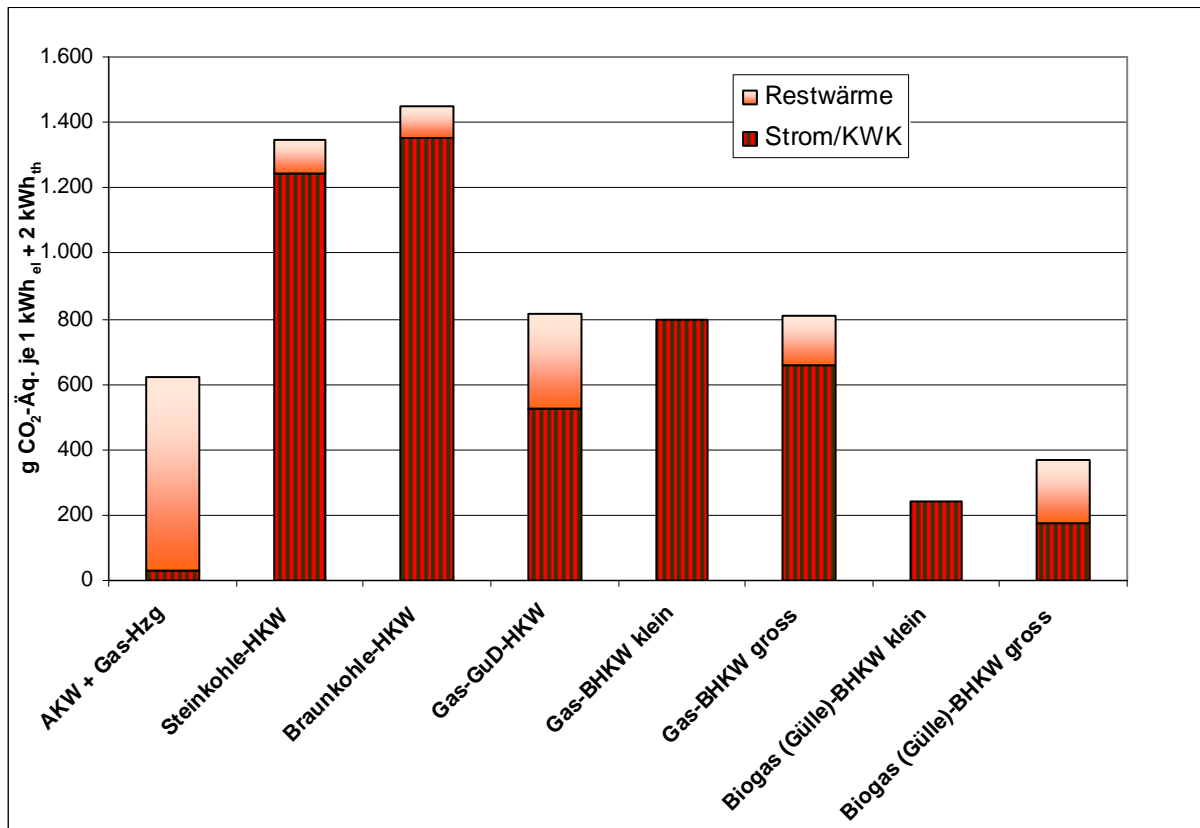


Quelle: eigene Berechnungen nach GEMIS 4.4; Werte für 1 kWh_{el} + 2 kWh_{th}

Hier ist nochmals sichtbar, dass die Gesamt-CO₂-Emissionen des kleinen Erdgas-BHKW *unter* den Gesamt-CO₂-Emissionen der Kombination AKW+Öl-Heizung liegen.

Die Ergebnisse zu den Anteilen aus der (KWK-)Stromerzeugung und der (Rest-)Wärmebereitstellung für die Variante, dass die Nicht-KWK-Wärme aus einer Gas-Heizung kommt, zeigt die folgende Grafik für die THG-Emissionen.

Bild 6 Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Strom- und Wärmeerzeugung (inkl. vorgelagerter Prozesse und Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung) bei der „Brutto“-Betrachtung; Restwärme aus Gas-Heizung



Quelle: eigene Berechnungen nach GEMIS 4.4; Werte für 1 kWh_{el} + 2 kWh_{th}

Die Gesamt-THG-Emissionen der Gas-HKW liegen etwas über den Gesamt-Emissionen der Kombination AKW + Gas-Heizung, während die Biogas-BHKW weiterhin deutlich weniger emittieren.

6 Stromerzeugungskosten

Ein wichtiger Aspekt bei der Debatte um die Atomenergie sind die Kosten zur Erzeugung einer kWh Strom. Für Atomkraftwerke existiert ein breites Spektrum von Daten über Investitions-, Betriebs- und Entsorgungskosten. Für *neue* AKW reicht die Bandbreite von 4,5 bis 5,5 €cent/kWh; der entsprechende GEMIS-Wert für Deutschland liegt in der Größenordnung von 5 €cent/kWh_{el}.

Für eine große Zahl anderer Stromerzeugungs-Technologien enthält GEMIS ebenfalls Datensätze für Kostenvergleiche, die im folgenden Bild dargestellt sind.

Tabelle 5 Bandbreiten für Stromerzeugungskosten (ohne externe Kosten)

| Strom aus: | Erzeugungskosten in €cent/kWh _{el} | |
|---------------------------------|---|------------|
| | von | bis |
| AKW | 4,5 | 5,5 |
| Import-Steinkohle-Kraftwerk | 4,0 | 5,0 |
| Import-Steinkohle-Heizkraftwerk | 2,5 | 3,5 |
| Braunkohle-Kraftwerk | 4,0 | 5,0 |
| Braunkohle-Heizkraftwerk | 2,5 | 3,5 |
| Erdgas-GuD-Kraftwerk | 4,0 | 5,0 |
| Erdgas-GuD-Heizkraftwerk | 3,5 | 4,5 |
| Erdgas-Blockheizkraftwerk | 7 | 8 |
| Biogas-Blockheizkraftwerk | 6 | 8 |
| Wind Park onshore | 8 | 9 |
| Wind Park offshore | 6 | 8 |
| Wasser-Kraftwerk | 5 | 10 |
| Solarzelle (PV-multikristallin) | 30 | 50 |
| Solarstrom-Import (Spanien) | 9 | 12 |
| Strom-Effizienz | 3 | 6 |

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.4; untere Grenze Solarstrom für südeuropäische Standorte

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, trifft die Annahme niedriger Erzeugungskosten für Strom aus Atomkraft keineswegs zu.

Die Kosten anderer Systeme *ohne* bestimmte Risiken (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung) liegen unter denen *neuer* Atomkraftwerke, und auch Strom aus erneuerbaren Energien kann unter günstigen Verhältnissen etwa gleich viel kosten wie Atomstrom.

Die obigen Stromerzeugungskosten wurden aus volkswirtschaftlicher Sicht für *alle* Erzeugungssysteme mit einem Kapitalzins von real 7% berechnet. Aus einzelwirtschaftlicher Sicht ist dies ein eher geringer Zinssatz – je nach Perspektive wird mit 8 bis über 12% gerechnet, womit sich für die kapitalintensiven AKW und auch die erneuerbaren Energien deutlich höhere Stromerzeugungskosten ergäben.

7 Treibhausgas-Vermeidungskosten

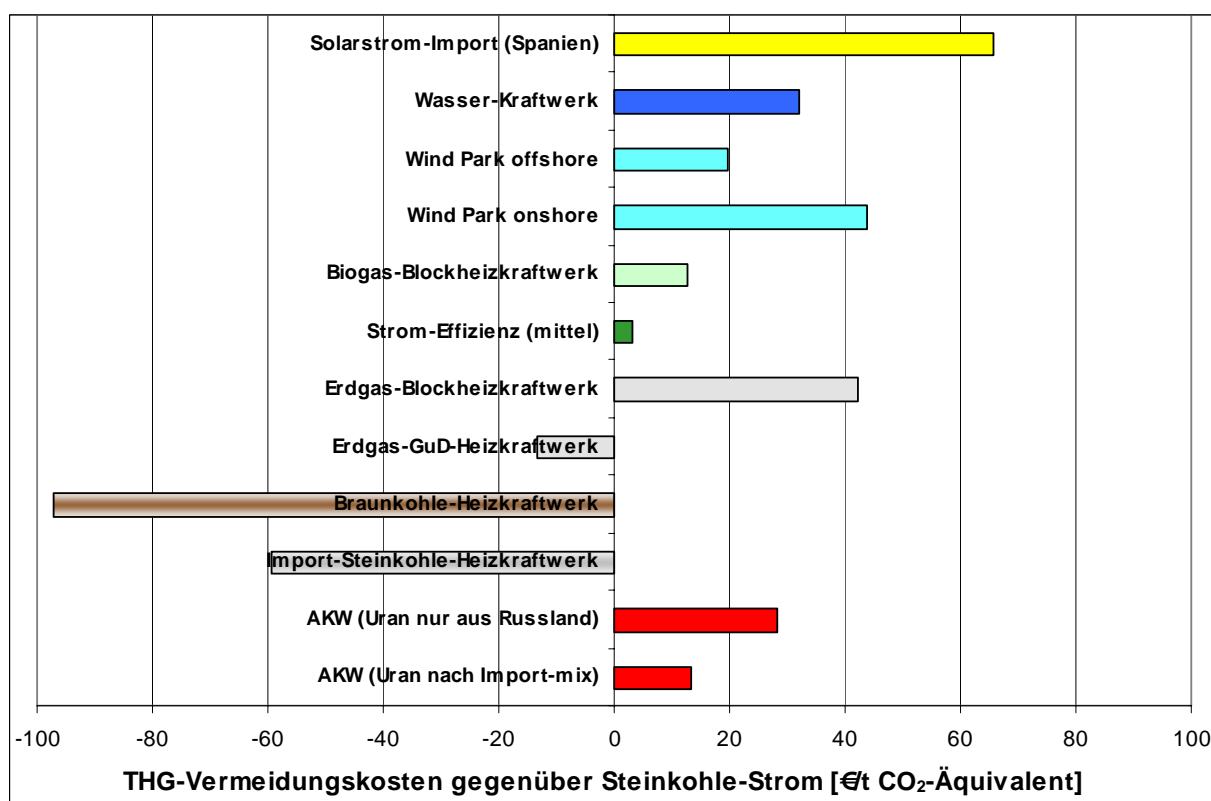
Um die Kosten der Vermeidung von CO₂ (bzw. allgemeiner: Treibhausgasen) durch z.B. Atomstrom zu bestimmen, muss zuerst eine Referenzoption gewählt werden, z.B. ein kohle- oder erdgasbetriebenes Kraftwerk. Anschließend werden die Emissions- und Kostendifferenzen dieser Referenzoption gegenüber alternativen Erzeugungstechnologien berechnet und die vermiedenen Emissionen durch die Kosten geteilt.

Die spezifischen Treibhausgas-Vermeidungskosten sind also das Verhältnis der Menge vermiedener Treibhausgasemissionen zur Kostendifferenz der Referenzoption.

Mit GEMIS können spezifische Vermeidungskosten einfach berechnet werden, da das Modell sowohl Lebenszyklus-Emissionen wie auch Lebenszyklus-Kosten bestimmt.

Im folgenden Bild 6 sind die Ergebnisse der entsprechenden Berechnung für ausgewählte Stromerzeugungssysteme dargestellt.

Bild 7 Spezifische Treibhausgas-Vermeidungskosten für ausgewählte Stromsysteme



Quelle: eigene Berechnungen nach GEMIS 4.4

Die THG-Vermeidungskosten für Atomstrom liegen bei 15 bis 30 €/t vermiedener CO₂-Äquivalente, je nachdem, welche Studie für die Bestimmung der Erzeugungskosten

herangezogen wird; bedeutsam sind auch die landesspezifischen Lebenszyklus-Emissionen.

Wie aus der Abbildung deutlich wird, liegen die THG-Vermeidungskosten von *kohlebetriebener* Kraft-Wärme-Kopplung und erdgasbetriebenen GuD-Kraftwerken im *negativen* Bereich, das heißt ihre *Kosten sind niedriger* als die der Referenzoption (neues Importkohlekraftwerk, Weltmarktpreise), und ebenso die Emissionen. Durch die Nutzung dieser Optionen anstelle eines Kohlekraftwerks können entsprechend sowohl Kosten gespart wie Treibhausgas-Emissionen reduziert werden.

THG-Vermeidungskosten für Stromeffizienz-Technologien und biogasbetriebene Blockheizkraftwerke sind ebenfalls niedriger als für Atomstrom, während die Werte für offshore-Windenergie etwa auf einem vergleichbaren Niveau liegen.

Kleinere erdgasbetriebene Blockheizkraftwerke, Windenergie (onshore) und neue Laufwasserkraftwerke haben höhere Erzeugungskosten als die Referenzoption, so dass ihre Treibhausgas-Vermeidungskosten zwischen 30 und 40 €/t vermiedener CO₂-Äquivalente liegen.

Dieser Vergleich zeigt, dass erneuerbare Energien und Effizienz-Optionen (inklusive erdgasbetriebener GuD in Kraft-Wärme-Kopplung) im Hinblick auf Treibhausgas-Vermeidungskosten *wettbewerbsfähiger sind als Atomstrom* - und dies selbst dann, wenn keine externen Kosten für nukleare Risiken veranschlagt werden.

Diese Resultate treffen nicht nur für Deutschland zu, sondern auch allgemeiner für andere Industrie- und Entwicklungsländer – die Lebenszyklen variieren nicht sehr stark und die Kosten werden wesentlich durch Weltmarkt-Daten bestimmt.

Literatur

- Chapman, P.F. (1975): Energy Analysis of Nuclear Power Stations, in: Energy Policy (Dez. 1975), S. 285-298
- CRIEPI (Central Research Institute of the Electric Power Industry) 1995: Comparison of CO₂ Emission Factors between Process Analysis and I/O-Analysis, Working Document prepared for IAEA, Tokyo
- Fritsche, Uwe R. u.a. 2004: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse; Endbericht zum BMU-Vorhaben von Öko-Institut und Partnern für das BMU, Darmstadt usw. www.oeko.de/service/bio
- IEA (International Energy Agency) 1994: Energy and the Environment, Transport Systems Responses in the OECD - Greenhouse Gas Emissions and Road Transport Technology, Paris
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Genf
- Metz, Lutz/Thomas, Steve/Schneider, Mycle 2006: Nuclear Power in the World 2006; Editorial in: Energy&Environment vol. 17 (2006) no. 3, Special Issue "Energy Policy and Nuclear Power - 20 Years after the Chernobyl Disaster", p. v - xx
- Mortimer, Nigel D. (1991): Nuclear power and carbon dioxide, the fallacy of the nuclear industry's new propaganda; in: The Ecologist vol. 21, Nr. 3
- Mudd, Gavin M./Diesendorf, Mark 2007: Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting?; presented at the 2nd International Conference on Sustainability Engineering & Science Auckland, New Zealand - 20-23 February 2007
- NEA (Nuclear Energy Agency)/IEA (International Energy Agency) 2005: Projected Costs of Generating Electricity – 2005 update, Paris
- ÖKO (Öko-Institut) 2007: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.4, Darmstadt usw. – siehe www.gemis.de
- Schneider, Mycle/Froggatt, Antony (2004): The World Nuclear Industry Status Report 2004, Brussels
- UBA (Umweltbundesamt)/ÖKO (Öko-Institut) 2006: ProBas - Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementinstrumente; Internet-Datenbank unter www.probas.umweltbundesamt.de
- van Leeuwen, J.W.S./Smith, Philip (2004): Can nuclear power provide energy for the future; would it solve the CO₂-emission problem?
- WNA (World Nuclear Association) 2006: Energy Analysis of Power Systems; London (www.world-nuclear.org/info/inf11.html)

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|---|
| AKW | Atomkraftwerk |
| BHKW | Block-Heizkraftwerk |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit |
| DT | Dampfturbine |
| el | elektrisch |
| GEMIS | <u>G</u> lobales <u>E</u> missions- <u>M</u> odell <u>I</u> ntegrierter <u>S</u> ysteme |
| GuD | Gas- und Dampfturbine (Kombiprozess) |
| GT | Gasturbine |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| KW | Kraftwerk |
| PV | Photovoltaik |
| th | thermisch |
| THP | Treibhauspotenzial |
| UBA | Umweltbundesamt |