

**Universität Stuttgart**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Prof. Dr.-Ing. A. Voß

**IER**

Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy · Institut d'Economie Energétique et d'Utilisation Rationnelle de l'Énergie

Arbeitsbericht

**Lebenszyklusanalyse  
ausgewählter  
Stromerzeugungs-  
techniken**

**- Stand 2005 -**

O. Mayer-Spohn, S. Wissel, A. Voß,  
U. Fahl, M. Blesl

Nr. 1

November 2005, aktualisiert: Juli 2007

**Inhalt**

1 Einleitung ..... 1

2 Methodik der Hybrid-Bilanzierung..... 1

3 Ausgewählte Stromerzeugungstechniken ..... 2

4 Ergebnisse ..... 4

    4.1 Kumulierter Energieaufwand..... 4

    4.2 Materialaufwand (Rohstoffaufwand)..... 5

    4.3 Kumulierte Emissionen ..... 5

    4.4 Gesundheitsrisiken..... 7

5 Bewertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen ..... 8

Literaturverzeichnis: ..... 9

## **1 Einleitung**

Der Ressourcenbedarf und die Emissionen verschiedener Techniken zur Stromerzeugung stellen wichtige Beurteilungskriterien hinsichtlich einer nachhaltigen Energieversorgung dar. Diese Umweltinanspruchnahme lässt sich über Material-, Energie- und Emissionsbilanzen ermitteln, die sämtliche mit der Stromerzeugung verbundenen Prozesse erfassen. Eine solche Bilanzierung erfolgt über den gesamten Lebensweg und erfasst neben der direkten Umweltbelastung bei der Energieumwandlung auch die Einflüsse von vor- und nachgelagerten Prozessstufen wie Brennstoffbereitstellung, Kraftwerksbau, -entsorgung sowie Transportaufwendungen. Dies entspricht einer Betrachtung von der Wiege bis zu Bahre, einer sogenannten Lebenszyklusanalyse. Dieser Ansatz ist besonders bei der Betrachtung von Stromerzeugungstechniken von Bedeutung, bei denen der Prozess der Stromerzeugung quasi emissionsfrei ist (Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie sowie Wasser- und Kernkraft).

Im Folgenden wird zunächst die am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) zur Lebenszyklusanalyse angewandte Methodik der Hybrid-Bilanzierung kurz erläutert. Anschließend werden Ergebnisse von Material-, Energie- und Emissionsbilanzen von ausgewählten Stromerzeugungstechniken dargestellt, die dem heutigen in Deutschland eingesetzten Stand der Technik entsprechen.

## **2 Methodik der Hybrid-Bilanzierung**

Eine Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 besteht aus folgenden vier Schritten: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. Im Rahmen der Sachbilanz werden die einzelnen Prozessstufen der Prozesskette für die untersuchten Stromerzeugungstechniken ermittelt und die jeweiligen In- und Outputs der einzelnen Prozesse bestimmt.

Mit dieser Prozesskettenanalyse nach ISO 14040 lässt sich das reale Prozessnetzwerk einer Nutzenbereitstellung in einem sehr hohen Detaillierungsgrad abbilden. Jeder Prozess eines derartigen Prozessnetzwerkes benötigt wiederum Vorleistungen, die von anderen Prozessen bereitgestellt werden. Diese Unterteilung in Prozessschritte wird prinzipiell so lange weitergeführt, bis die Vorleistungen eines Prozesses nur noch aus natürlichen Rohstoffen bestehen. Dies führt bei einer detaillierten Prozesskettenanalyse zu einem erheblichen Bilanzierungsaufwand. Am Ende einer Bilanzierung stellt sich jedoch oft heraus, dass nur ein Teil des betrachteten Prozessnetzwerkes relevante Beiträge zu den Endergebnissen der Bilanzierung liefert. Bei der Durchführung von Prozesskettenanalysen werden daher Abschneidekriterien definiert, mit denen die Anzahl der zu betrachteten Prozessschritte auf ein sachgerechtes und operationales Maß reduziert und dennoch keine wichtigen Beiträge zu den Ergebnisgrößen vernachlässigt werden. Neben der generellen Schwierigkeit, diese

Abschneidekriterien konsistent festzulegen, führen die Abschneidekriterien dazu, dass die mittels der Prozesskettenanalyse ermittelten Bilanzergebnisse die tatsächlichen Umwelteinwirkungen grundsätzlich unterschätzen.

Um diese Fehlbeträge sowie unvollständige Datengerüste aus der Prozesskettenanalyse nach ISO 14040 zu ergänzen, wird der Ansatz der sogenannten Hybridbilanzierung angewendet. Mit Hilfe von sektoral aufgelösten Input-/Output-Tabellen sowie Informationen aus der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) werden Daten für fehlende Material- und Energieflüsse sowie Emissionen erhoben. Diese werden zu den Ergebnissen der Prozesskettenanalyse addiert. (Eine Beschreibung der Hybridbilanzierung findet sich in /Marheineke 2001/ sowie /Marheineke et al. 2000/1999/).

### **3 Ausgewählte Stromerzeugungstechniken**

Das vorliegende Kapitel beschreibt die technischen Parameter der untersuchten Stromerzeugungstechniken. Die betrachteten Referenzanlagen entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik.

#### ***Kohlekraftwerke***

Die Stromerzeugung bei der Kohle erfolgt heutzutage vorwiegend in Kraftwerken mit Staubfeuerung. Als Referenzanlagen werden Kohle-Dampfkraftwerke mit einer Leistung von 700 MW<sub>el</sub> für Steinkohle und 800 MW<sub>el</sub> für Braunkohle betrachtet. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt für das Steinkohlekraftwerk 45,5 % und für das Braunkohlekraftwerk 43 %. Für beide Kohlekraftwerke wird eine Lebensdauer von 35 Jahren angenommen.

#### ***Erdgas GuD-Kraftwerk***

Bei den erdgasbefeuerten Kraftwerken ist der kombinierte Einsatz von Gas- und Dampfturbinen (GuD) Stand der Technik. Eine GuD-Anlage mit einer Leistung von 777,5 MW<sub>el</sub> und einem Jahresnutzungsgrad von 57,5 % wird als Referenzkraftwerk betrachtet. Die Lebensdauer für das GuD-Kraftwerk beträgt 35 Jahre.

#### ***Kernkraftwerk***

Bei der Kernenergie wird ein Druckwasserreaktor mit einer Leistung von 1375 MW<sub>el</sub>, einem Wirkungsgrad von 33 % und einer Lebensdauer von 40 Jahren als Referenzkraftwerk betrachtet.

#### ***Holz-Heizkraftwerk (Holz-HKW)***

Als Referenzanlage für die Verstromung von biogenen Festbrennstoffen (hier ausschließlich Restholz) wird eine Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) betrachtet. Die KWK-Anlage hat eine Leistung von 20 MW<sub>el</sub>, wobei der elektrische Wirkungsgrad 24 % beträgt und die Lebensdauer mit 35 Jahren angenommen wird. Die Allokation zwischen den Zielprodukten Strom und Wärme erfolgt durch eine exergetische Bewertung.

**Photovoltaik (PV)**

Die Nutzung der solaren Strahlung erfolgt durch eine Photovoltaik-Anlage mit einer Leistung von 5 kW<sub>el</sub>. Die Photovoltaik-Anlage besteht aus multi-kristallinen Silizium-Solarzellen. Für die Vollbenutzungsstunden wird ein Wert von 880 Stunden pro Jahr (h/a) angesetzt und die Lebensdauer der gesamten Anlage auf 25 Jahre abgeschätzt.

**Windkraftanlagen**

Als Referenz-Windkraftwerk wird ein auf dem Festland installierter Windkonverter mit Stahlrohrturm und Getriebe mit einer Leistung von 1,5 MW<sub>el</sub> gewählt. Die Bilanz bezieht sich auf zwei unterschiedliche Standorte mit über das Jahr gemittelten Windgeschwindigkeiten von 5,5 m/s bzw. 4,5 m/s, jeweils bezogen auf 10 m Höhe. Die Lebensdauer wird mit 20 Jahren angenommen. Die Volllastbenutzungsstunden betragen bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5,5 m/s 2450 h/a und bei 4,5 m/s 1680 h/a.

**Wasserkraftanlage**

Die Bilanz für die Stromerzeugung aus Wasserkraft bezieht sich auf eine Laufwasser-Anlage mit einer Leistung von 3,1 MW<sub>el</sub>. Bei dieser Anlage ist das Krafthaus in ein bereits bestehendes Wehr eingebaut. Es wird davon ausgegangen, dass das Wehr vorrangig aus Gründen der Schifffahrt und des Hochwasserschutzes errichtet wurde. In die Bilanz gehen daher Bau, Rückbau, Betrieb des Wasserkraftwerks ein, jedoch nicht der Bau, Rückbau und Betrieb des Wehres. Es wird eine Volllastbenutzungsstundenzahl von 5100 h/a und eine Lebensdauer der Anlage von 60 Jahren angenommen.

**Tab. 3.1: Technische Parameter der ausgewählten Stromerzeugungstechnologien**

Referenzkraftwerk	Technik	Anlagenleistung el (netto) [MW]	Wirkungsgrad el [%]	Lebensdauer [Jahre]
Steinkohle-Kraftwerk	Staubfeuerung	700	45,5	35
Braunkohle-Kraftwerk	Staubfeuerung	800	43	35
Erdgas GuD-Kraftwerk	GuD	777,5	57,5	35
Kernkraftwerk	Druckwasserreaktor	1375	33	40
Holz-HKW	Hackschnitzelfeuerung	20	24	35
Photovoltaik 5kW	polykristallines PV-Modul	0,005	12,5 <sup>1)</sup>	25
Wind 1500 kW (5,5) <sup>3)</sup>	Horizontalachsenkonverter	1,5	2450 h/a <sup>2)</sup>	20
Wind 1500 kW (4,5) <sup>3)</sup>		1,5	1680 h/a <sup>2)</sup>	20
Wasserkraftwerk 3,1 MW	Laufwasserkraft	3,1	90	60

<sup>1)</sup> Systemwirkungsgrad; Vollbenutzungsstunden: 880h/a    <sup>2)</sup> Vollbenutzungsstunden  
<sup>3)</sup> mittlere Windgeschwindigkeit m/s (in 10 m Höhe)

## 4 Ergebnisse

Die in diesem Abschnitt enthaltenen Tabellen und Abbildungen fassen Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die zuvor beschriebenen Stromerzeugungstechniken auf fossiler, regenerativer und nuklearer Energieträgerbasis zusammen. Diese Berechnungen nach dem Ansatz der Hybridbilanzierung sind jeweils auf 1 kWh elektrische Energie bezogen. Als Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse werden der Kumulierte Energieaufwand (KEA), der Materialaufwand (Rohstoffaufwand), Kumulierte Emissionen und Gesundheitsrisiken beschrieben. Diese Ergebnisse sind als spezifische Größen für die betrachteten Stromerzeugungstechniken in den Tabellen und Abbildungen der folgenden Kapitel dargestellt.

### 4.1 Kumulierter Energieaufwand

Die Stromerzeugung ist mit Energieaufwand für die Errichtung, den Betrieb und die Entsorgung der Kraftwerksanlagen verbunden. Im Fall der Verstromung fossiler und nuklearer Energieträger sowie Biomasse kommt der Energieaufwand für die Bereitstellung des Brennstoffs hinzu. Der spezifische kumulierte Energieaufwand (KEA), der in Tabelle 4.1 dargestellt ist, erfasst den Aufwand an Primärenergie für die Herstellung und Entsorgung des Kraftwerks, sowie den KEA für die Nutzung, um eine Kilowattstunden (kWh) Elektrizität bereit zu stellen. Der  $KEA_{\text{Nutzung, ohne Brennstoff}}$  beinhaltet den KEA für die Brennstoffbereitstellung (hier ohne den Energiegehalt des Brennstoffes) sowie den KEA für den Betrieb des Kraftwerks. Bei der Kernenergie ist auch die Entsorgung des genutzten Brennstoffes beinhaltet.

**Tab. 4.1: Spezifischer kumulierter Energieaufwand (KEA) ohne Brennstoff**

	$KEA_{\text{Herstellung+Entsorgung}}$ kWh <sub>Prim</sub> / kWh <sub>el</sub>	$KEA_{\text{Nutzung, ohne Brennstoff}}$ kWh <sub>Prim</sub> / kWh <sub>el</sub>	$KEA_{\text{gesamt, ohne Brennstoff}}$ kWh <sub>Prim</sub> / kWh <sub>el</sub>
Steinkohle-Kraftwerk	0,0176	0,2519	0,2695
Braunkohle-Kraftwerk	0,0190	0,1415	0,1606
Erdgas GuD	0,0044	0,1655	0,1699
Kernkraftwerk	0,0151	0,0578	0,0730
Holz-HKW	0,0827	0,0003	0,0830
Photovoltaik 5 kW	0,5740	0,0350	0,6090
Wind 1500 kW (5,5)	0,0540	0,0040	0,0580
Wind 1500 kW (4,5)	0,0784	0,0065	0,0849
Laufwasser 3,1 MW	0,0401	0,0045	0,0445

## 4.2 Materialaufwand (Rohstoffaufwand)

Tabelle 4.2 zeigt die Rohstoffintensität der betrachteten Stromerzeugungstechniken für ausgewählte Materialien. Erfasst ist der jeweilige Rohstoffaufwand über den gesamten Lebenszyklus der Stromerzeugung, der jedoch im Wesentlichen beim Bau des Kraftwerks anfällt.

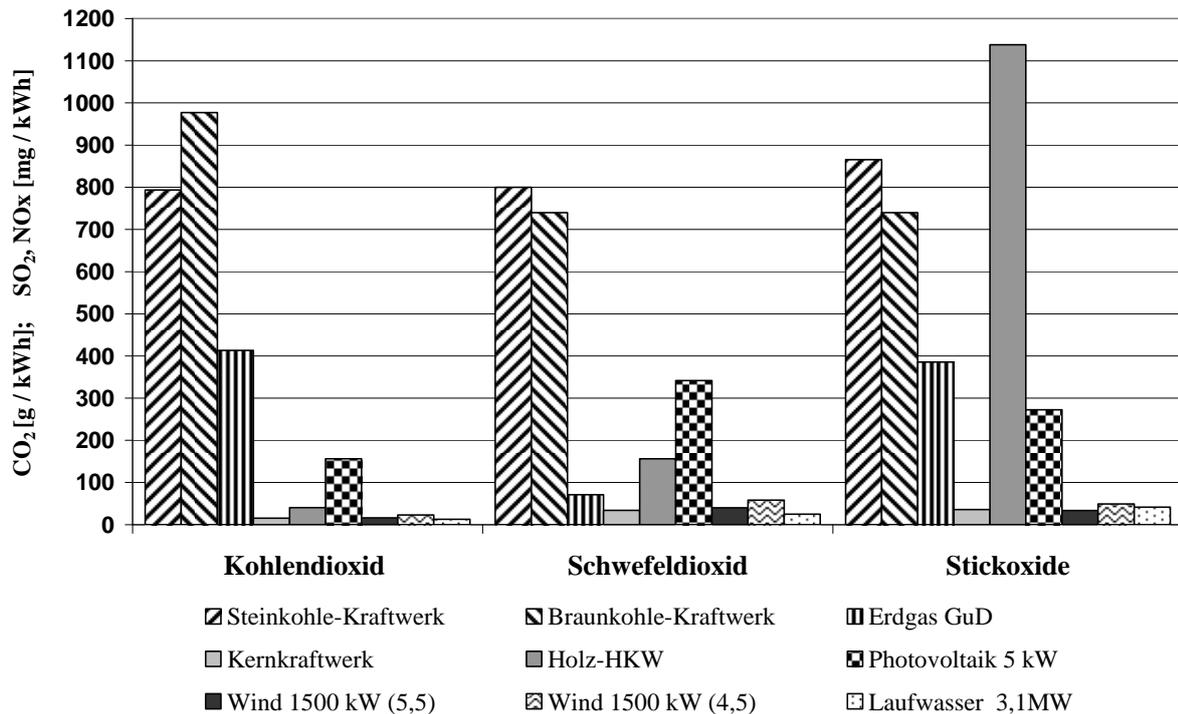
Diese Materialbilanz lässt erkennen, dass die geringe Energiedichte der solaren Strahlung und die Umwandlung der Solarstrahlung in Strom durch Photovoltaikanlagen über vergleichsweise große Energiesammlungsflächen zu einem relativ hohen Materialeinsatz an Kupfer, Eisen und Bauxit führt. Bei photovoltaischer Stromerzeugung beträgt der spezifische Kupfereinsatz rund das Vierzigfache, der Bauxiteinsatz etwa das Siebzigfache und der Eiseneinsatz ca. das Drei- bis Zehnfache im Vergleich zu den Werten der fossilen oder nuklearen Stromerzeugung. Auch bei Strom aus Windenergie ist ein deutlich höherer spezifischer Einsatz an Rohstoffen gegenüber der fossilen und nuklearen Stromerzeugung erkennbar.

**Tab. 4.2: Spezifischer Rohstoff- und Materialaufwand in kg/GWh<sub>el</sub>**

	<b>Eisen</b> [kg/GWh <sub>el</sub> ]	<b>Kupfer</b> [kg/GWh <sub>el</sub> ]	<b>Bauxit</b> [kg/GWh <sub>el</sub> ]
<b>Steinkohle-Kraftwerk</b>	<b>1.700</b>	<b>8</b>	<b>30</b>
<b>Braunkohle-Kraftwerk</b>	<b>2.134</b>	<b>8</b>	<b>19</b>
<b>Erdgas GuD</b>	<b>1.239</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Kernkraftwerk</b>	<b>457</b>	<b>6</b>	<b>27</b>
<b>Holz-HKW</b>	<b>934</b>	<b>4</b>	<b>18</b>
<b>Photovoltaik 5 kW</b>	<b>4.969</b>	<b>281</b>	<b>2.189</b>
<b>Wind 1500 kW (5,5)</b>	<b>3.066</b>	<b>52</b>	<b>35</b>
<b>Wind 1500 kW (4,5)</b>	<b>4.471</b>	<b>75</b>	<b>51</b>
<b>Laufwasser 3,1 MW</b>	<b>2.057</b>	<b>5</b>	<b>7</b>

## 4.3 Kumulierte Emissionen

Abbildung 4.1 veranschaulicht die für die ausgewählten Stromerzeugungstechniken ermittelten kumulierten Emissionen für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>), jeweils bezogen auf die über die Lebensdauer erzeugte Strommenge.



**Abbildung 4-1: Spezifische kumulierte Emissionen (aktualisiert, Juni 2007)**

Die Stromerzeugung auf Braunkohlebasis verursacht die bei weitem größten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die um mehr als das Vierzigfache höher sind als die Emissionen der Stromerzeugung aus Kern-, Laufwasser- oder Windkraft. Auch bezüglich der spezifischen SO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Stromerzeugung auf Kohlebasis trotz Rauchgasentschwefelung der höchste Wert anzulasten. Dies resultiert daher, dass zusätzlich zu den direkten Emissionen auch die indirekten Emissionen des Kohleabbaus in der Mine sowie im Fall der Steinkohle der Transport von mehr als 50 % der Kohle aus Importländern erfasst sind. Da die betrachtete Braunkohle in unmittelbarer Umgebung der Mine verstromt wird, weist die Braunkohle-verstromung nur geringe SO<sub>2</sub>-Transportemissionen für die Brennstoffbereitstellung auf und zeigt im direkten Vergleich zu Steinkohle geringere spezifische Emissionen. Bei dem erdgasbefeuerten GuD-Kraftwerk fallen die spezifischen Emissionen jeweils bedeutend geringer aus als bei den kohlebefeueten Kraftwerken. Dies resultiert zum einen aus dem höheren Kraftwerkswirkungsgrad, zum anderen aus dem weitgehend schwefelfreien Brennstoff Erdgas.

Die photovoltaische Stromerzeugung weist, bedingt durch ihre geringe Strommengen-erzeugung, vergleichsweise hohe Werte hinsichtlich der SO<sub>2</sub>- und der NO<sub>x</sub>-Emissionen auf. Die Stromerzeugung aus Wind-, Wasser- und Kernkraft ist mit den geringsten spezifischen Emissionen verbunden. Dabei sind die Effekte bei der Windkraft von den angenommenen standortabhängigen Windgeschwindigkeiten abhängig. Beim Kernkraftwerk sind die spezifischen Emissionen sehr gering. Sie entstehen nicht durch den Prozess der nuklearen

Stromerzeugung im Kraftwerk, sondern werden in den Vorleistungsketten beim Bau des Kraftwerks und bei der Brennstoffbereitstellung emittiert.

Das Holz-HKW führt die Rangliste bei den spezifischen Stickoxidemissionen an. Die für diesen Effekt verantwortlichen Emissionen sind zum großen Teil dem Brennstoff Waldrestholz und dessen Bereitstellung zuzurechnen.

#### **4.4 Gesundheitsrisiken**

Die Lebenszyklusanalyse ergibt, dass die Stromerzeugung mittels fossiler, nuklearer oder erneuerbarer Energien mit direkten bzw. indirekten Emissionen von Luftschadstoffen verbunden ist, die zu gesundheitlichen Schäden führen können. Ausgehend von den aus der Emissionsbelastung zu erwartenden Gesundheitsschäden können so genannte „verlorene Lebensjahre“ ermittelt werden, ausgedrückt in der Einheit YOLL = Years of Life Lost. In Abbildung 4.2 sind die spezifischen Gesundheitsrisiken der Stromerzeugung basierend auf den ermittelten spezifischen Emissionen des Anlagenbetriebs sowie den Emissionen der vor- und nachgelagerten Prozessstufen der Kraftwerke abgebildet.

Neben der Kohleverstromung weisen die Stromerzeugung im Holz-HKW und Photovoltaik-Strom vergleichsweise große gesundheitliche Auswirkungen auf, wobei bei der Photovoltaik diese ausschließlich der Anlagenherstellung zuzuordnen sind. Die Ursachen für die Gesundheitsrisiken bei der Photovoltaik liegen im Wesentlichen in der Bereitstellung von Materialien und sonstigen Vorleistungen für die Wafer-, Zell- und Modulfertigung. Bei der Verstromung von Holz und Kohle dominieren die Gesundheitsrisiken aus dem Kraftwerksbetrieb. Dies erklärt sich aus den relativ hohen  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen, die bei der Stromerzeugung im Kraftwerk freigesetzt werden. Die Einflüsse aus den vor- und nachgelagerten Prozessstufen tragen bei diesen Stromerzeugungstechniken zu weniger als einem Drittel der gesamten Auswirkungen bei. Aufgrund der höheren Transportaufwendungen für den Energieträger Steinkohle, weist die Steinkohleverstromung höhere Gesundheitsrisiken auf als die Stromerzeugung aus Braunkohle.

Die geringsten gesundheitlichen Auswirkungen bei einer Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen ergeben sich bei der Verstromung von Erdgas.

In derselben Größenordnung wie beim Kernenergiestrom bewegen sich die Gesundheitsrisiken der Stromerzeugung aus Wind- oder Wasserkraft.

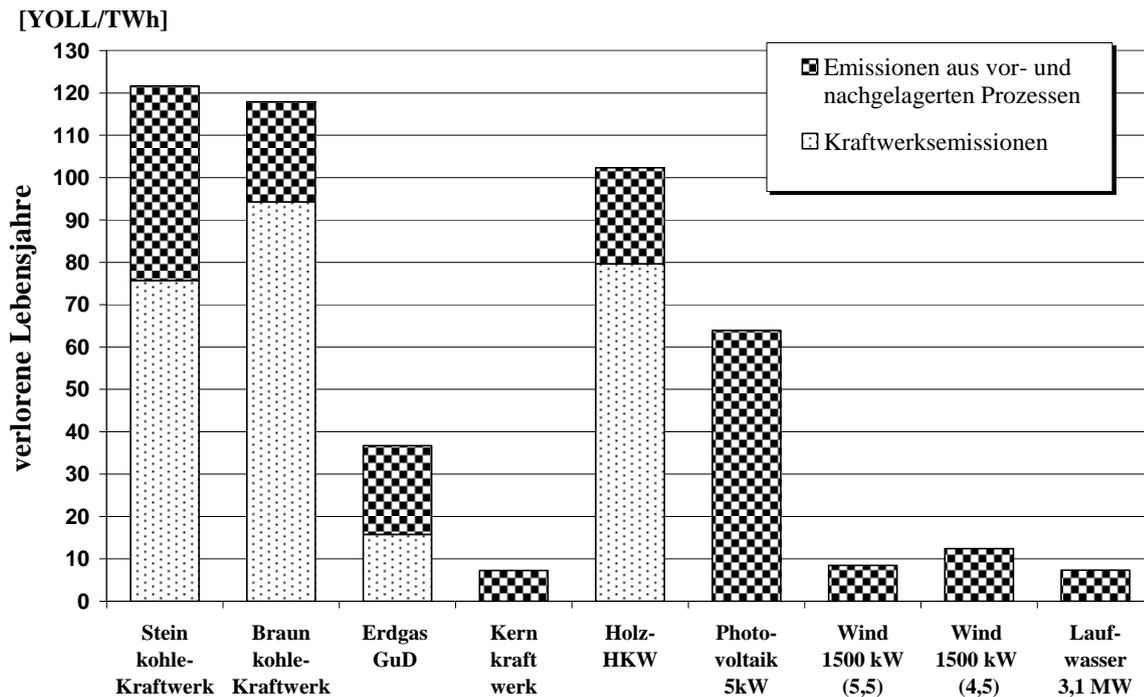


Abbildung 4-2: Spezifische Gesundheitsrisiken (aktualisiert, Juni 2007)

## 5 Bewertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit den vorliegenden Ergebnissen aus der ganzheitlichen Bilanzierung wird ein Vergleich von Stromerzeugungstechniken ermöglicht. Die qualitative Einordnung der ausgewählten Referenztechnologien erfolgt hinsichtlich Material- und Energiebedarf, Emissionen sowie Gesundheitsrisiken. Für eine Optimierung in Richtung geringerer Werte der genannten Beurteilungskriterien sind Verbesserungen entlang des gesamten Lebenszyklus notwendig. Im Vordergrund muss dabei sicherlich der technische Fortschritt bei der Stromerzeugung stehen, da von Effizienzsteigerungen und Weiterentwicklungen der Stromerzeugungstechniken der größte Einfluss auf den Ressourcenbedarf und auf die Umweltwirkungen der Stromerzeugung ausgeht. Jedoch sind auch die vorgelagerten Prozesse der Brennstoffbereitstellung und des Kraftwerksbaus weiter zu verbessern, da auch von diesen nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf Ressourcen, Klima, Umwelt und Gesundheit ausgehen.

**Literaturverzeichnis:**

/Marheineke 2001/

Marheineke T.; Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken; Dissertation. IER-Forschungsbericht Band 87; Universität Stuttgart; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; Stuttgart, 2000

/Marheineke et. al. 2000/

Marheineke T.; Friedrich, R.; Krewitt W.; Neubarth, J.; Voß, A.: Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken; IER-Forschungsbericht Band 74; Universität Stuttgart; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; Stuttgart, 2000

/Marheineke et. al. 1999/

Marheineke T.; Friedrich, R.; Krewitt W.: Application of a Hybrid-Approach to the Life Cycle Inventory Analysis of a Freight Transport Task. In SAE 1998 Transactions – Journal of Passenger Cars, Section 6 – Volume 107. Society of Automotive Engineers (SAE). Warrendale PA. USA 1999.