



Originally published as:

Frick, S., Kaltschmitt, M. (2009): Ökologische Aspekte einer geothermischen Stromerzeugung - Analyse und Bewertung der Umwelteffekte im Lebensweg. - Erdöl, Erdgas, Kohle, 125, 1, 37-42.

Ökologische Aspekte einer geothermischen Stromerzeugung - Analyse und Bewertung der Umwelteffekte im Lebensweg -

Environmental Aspects of Geothermal Power Generation – Analysis and Evaluation of Environmental Impacts in the Life Cycle

Stephanie Frick^a, Martin Kaltschmitt^b

^a GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam, frick@gfz-potsdam.de

^b Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg-Harburg,
kaltschmitt@tu-harburg.de

Abstract

Die geothermische Stromerzeugung soll – so der politische Wille – zukünftig einen deutlich höheren Anteil der Energienachfrage in Deutschland decken. Wesentliche Voraussetzung dafür ist aber, dass Strom aus Erdwärme auch signifikant zum Umwelt- und insbesondere zum Klimaschutz beitragen kann. Dies zu untersuchen ist das Ziel der folgenden Ausführungen. Dabei wird der gesamte Lebensweg betrachtet, da es nicht nur im Betrieb, sondern auch durch die Anlagenerrichtung und die -entsorgung zur Freisetzung klimarelevanter und anderer Stoffe sowie zum Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen kommen kann. Im Rahmen einer derartigen Lebenswegbetrachtung bzw. mit der Erstellung von solchen Ökobilanzen kann dabei gezeigt werden, dass eine geothermische Stromerzeugung im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsoptionen merklich zur Entlastung der Umwelt und des Klimas beitragen kann.

Geothermal power generation should make a larger contribution to meet the future energy demand in Germany – according to the current political goals. However, this is based on the precondition that geothermal power can also significantly contribute to the protection of the environment and especially the global climate. On this background the objective of this paper is it to analyse this prerequisite. Therefore the overall geothermal life cycle needs to be investigated because emissions harmful to the climate and the environment as well as the use of finite energy resources occur not only during plant operation. They might also be caused due to plant construction and deconstruction. For geothermal power plants this is important because the reservoir development needs large amounts of energy and material such as fuel to run the drilling rig and steel for the completion of the wells. Based on the methodology of a life cycle assessment it can thereby be shown that geothermal power generation can contribute to environment and climate protection compared to other options for the provision of electricity. Due to the relatively early stage of development of the technology there is also room for improvement in terms of increasing the net-power output through the use of improved system components and a better system design. Another important aspect is to maximise the use of the energy contained in the thermal water e.g. by providing additionally heat.

1 Einleitung

Zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stellt neben der Wasserkraft, der Biomasse, der Windenergie und der Fotovoltaik die Geothermie eine Option dar, die in der letzten Zeit

in der energiewirtschaftlichen und -politischen Diskussion merklich an Bedeutung gewonnen hat. Dies gilt insbesondere auch deshalb, weil Strom aus Erdwärme zur Verbesserung der Versorgungssicherheit beiträgt und im Gegensatz zu Wind und Fotovoltaik kontinuierlich zur Verfügung steht. Außerdem kann bei der Gewinnung geothermischer Energie zur Stromerzeugung auch Wärme bereitgestellt und damit parallel zur Deckung der Wärmenachfrage beigetragen werden.

Nachdem mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) die Rahmenbedingungen geschaffen waren, wurde 2003 das erste geothermische Kraftwerk in Neustadt-Glewe durch Erweiterung der bereits bestehenden geothermischen Heizzentrale mit einer elektrischen Leistung von 230 kW in Betrieb genommen [1]. Das zweite geothermische Kraftwerk mit einer Ausleistungsleistung von 2,9 MW hat Ende 2007 in Landau den Probebetrieb aufgenommen [2]. Die bislang größte Anlage mit einer Ausleistungsleistung von 3,3 MW wurde Mitte Mai diesen Jahres in Unterhaching in Betrieb genommen [3], [4]. Auch in Bruchsal wird voraussichtlich noch dieses Jahr zum ersten Mal Strom eingespeist [5]. Daneben befinden sich noch eine Reihe weiterer Projekte in der Entwicklung (Abb. 1), so dass in den kommenden Jahren eine installierte geothermische Stromerzeugungsleistung im zweistelligen MW-Bereich zu erwarten ist [6], [7].

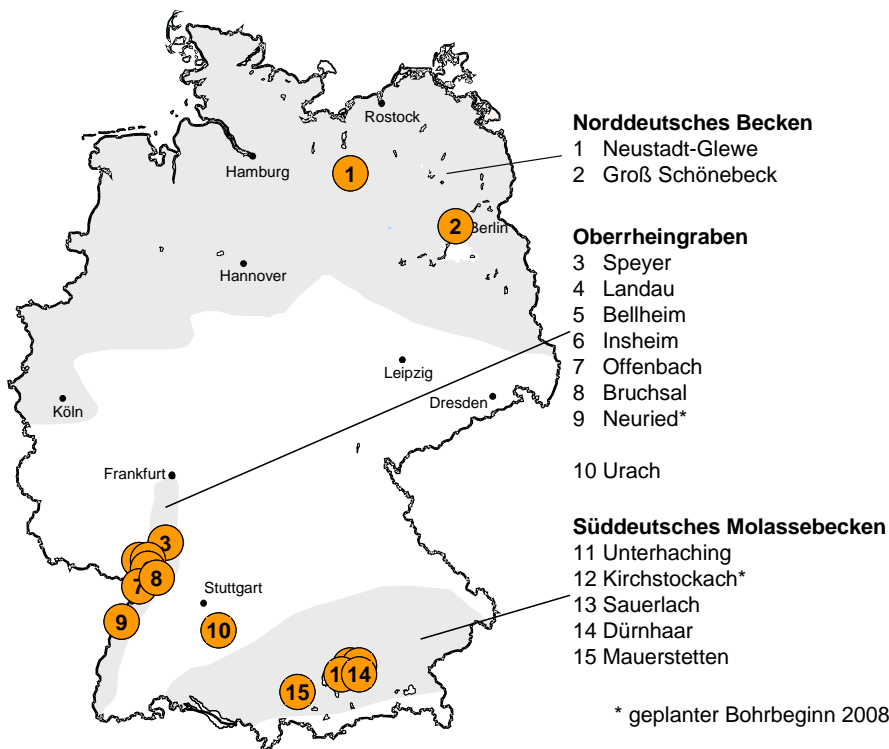


Abb. 1 Geothermische Stromerzeugungsprojekte mit bestehenden Bohrungen (Stand Anfang 2008)

Die geothermische Stromerzeugung zeichnet sich dabei i. Allg. durch geringe lokale Umwelteffekte aus [8]. Damit stellt sich aber immer noch die Frage, ob auch die globalen Umweltauswirkungen z. B. bedingt durch klimaschädliche Emissionen oder den Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen gering sind. Erfahrungen aus bestehenden Projekten haben nämlich gezeigt, dass beispielsweise die Abteufung der Bohrungen sehr energieintensiv ist. Zudem werden u. a. zur Verrohrung der Bohrung erhebliche Materialmengen benötigt, die ebenfalls nur mit einem hohen Energieaufwand – und damit verbunden auch den entsprechenden Emissionen – herzustellen sind. Deshalb ist die Frage nach den mit dieser Stromer-

zeugungsoption verbundenen Stofffreisetzungen und Ressourcenaufwendungen nicht ohne weiteres zu beantworten. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der folgenden Ausführungen, die geothermische Stromerzeugung hinsichtlich der Umweltauswirkungen im Lebensweg zu untersuchen.

2 Methodik

Mit einer Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz können beliebige Produkte oder Dienstleistungen hinsichtlich potenzieller Wirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit gesamtökologisch bewertet und verglichen werden.

Dabei wird der gesamte Lebenszyklus des untersuchten Produktes oder der betrachteten Dienstleistung von der Rohstofferschließung und -gewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert ("von der Wiege bis zur Bahre"). Damit können alle mit diesem Produkt oder dieser Dienstleistung in der Gesamtheit des jeweiligen Lebensweges verbundenen Effekte und Stoffströme erfasst werden. Dies gilt ebenso für alle in diesem Lebensweg verwendeten anderen Produkte, Einsatzstoffe und Dienstleistungen.

Eine derartige Analyse basiert auf einer weitgehend genormten Vorgehensweise gemäß ISO 14040 und ISO 14044. Demnach besteht eine Lebensweganalyse aus (1) der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, (2) der Sachbilanz, (3) der Wirkungsabschätzung und (4) der Auswertung (Abb. 2).

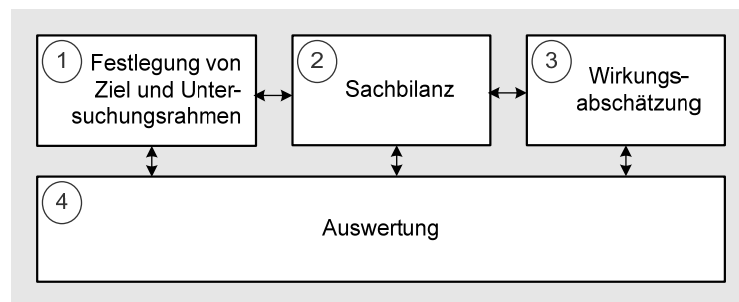


Abb. 2 Aufbau einer Lebensweganalyse (nach ISO 14040 und ISO 14044)

Im ersten Schritt, der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, wird definiert, welches Produkt bzw. welche Dienstleistung in welchem Umfang mit welcher Genauigkeit und welcher konkreten ökologischen Fragestellung betrachtet werden soll. Das Ziel der hier realisierten Lebensweganalyse ist eine vergleichende Bewertung ökologischer Kenngrößen verschiedener Optionen zur geothermischen Stromerzeugung und deren Vergleich mit anderen Stromerzeugungsoptionen auf der Basis regenerativer Energien und fossiler Energieträger. Zentrale Bezugs- und Vergleichsgröße (d. h. funktionelle Einheit) ist die Erzeugung einer MWh_{netto} Strom. Die Netto-Stromerzeugung resultiert dabei aus dem von der jeweiligen Anlage produzierten Strom und dem Stromeigenbedarf, der z. B. für die Thermalwasserzirkulation und die Kühlung des Kraftwerks benötigt wird. Wird zusätzlich zum Strom Nutzwärme bereitgestellt (d. h. Koppelproduktion), werden die durch die Wärmebereitstellung vermiedenen Umwelteffekte der Stromerzeugung gutgeschrieben (Äquivalenzprozess-Prinzip). Die Bereitstellung dieser MWh_{netto} Strom wird im Folgenden im Hinblick auf den Einsatz erschöpflicher Energieressourcen (d. h. Erdöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle, Uran) und ausgewählter luftgetragener Schadstoffe (hier Klimagasemissionen und Emissionen mit versauernder Wirkung) betrachtet. Dazu werden die in Deutschland vorliegenden Gegebenheiten

(z. B. Geologie, Stand der Erschließungs- und Konversionstechnik, Strommix) im Jahr 2006 zugrunde gelegt.

Der zweite Schritt, die Sachbilanz, umfasst die Quantifizierung der Massen- und Energieströme aller verschiedenen Prozesse im Verlauf des gesamten Lebenswegs, die zur Erzeugung dieser MWh_{netto} Strom nötig sind. Dazu wird hier die Prozesskettenanalyse (Abb. 3) verwendet, bei der ein zu untersuchendes komplexes System (z. B. Anlage zur geothermischen Stromerzeugung) in geeignete transparente Teilsysteme bzw. Prozesse untergliedert wird. Jeder dieser Einzelprozess wird durch Ein- und Ausgangsgrößen gekennzeichnet, die selbst wiederum mit entsprechenden vor- bzw. nachgelagerten Prozessen gekoppelt sind (z. B. geht dem Einsatz von Stahl eine entsprechende Produktionskette voraus).

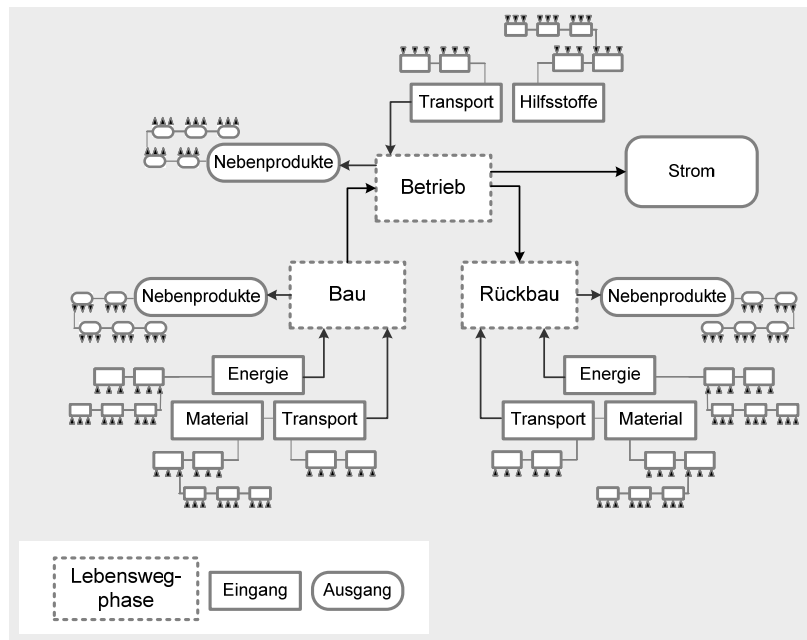


Abb. 3 Schema einer Prozesskettenanalyse

Die Wirkungsabschätzung, als dritter Schritt, umfasst die Bestimmung der untersuchten potenziellen Umweltwirkungen aus den in der Sachbilanz erhobenen Stoffströmen. Dazu werden die Ergebnisse der Sachbilanz verschiedenen Wirkungskategorien zugeordnet, welche sich direkt auf ein konkretes Umweltproblem beziehen und so eine direkte Interpretation der Daten ermöglichen. Tabelle 1 zeigt die hier untersuchten Wirkungskategorien und die ihnen zugeordneten Indikatoren.

Tabelle 1 Zusammenstellung der bilanzierten Wirkungsgrößen

| Wirkungskategorie | Wirkungsindikator | Substanzen |
|--|-------------------------------|---|
| Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen | Fossiler Primärenergieaufwand | Erdöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Uran |
| Anthropogener Treibhauseffekt | CO ₂ -Äquivalente | CO ₂ (1) ^a , CH ₄ (23) ^a , N ₂ O (296) ^a , SF ₆ (22.200) ^a , CF ₄ (5.700) ^a , C ₂ F ₆ (11.900) ^a |
| Versauerung natürlicher Ökosysteme | SO ₂ -Äquivalente | SO _x als SO ₂ (1) ^b , NO _x als NO ₂ (0,7) ^b , NH ₃ (1,88) ^b , HCl (0,88) ^b , HF (1,6) ^b , H ₂ S (1,88) ^b |

^a Wichtungsfaktoren wichtiger Treibhausgase bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren in kg CO₂-Äquivalenten je kg Schadstoff; ^b Wichtungsfaktoren in kg SO₂-Äquivalenten je kg Schadstoff

Als vierter und abschließender Schritt der Lebensweganalyse folgt die Auswertung in Bezug auf das Ziel der Untersuchung. Hierbei werden die Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung zusammengeführt und vergleichend diskutiert. Für die Bewertung, welche der untersuchten Optionen im Vergleich zu den möglichen Alternativen mit den geringsten Umweltwirkungen verbunden ist, müssen die Ergebnisse aller Wirkungsindikatoren zusammengeführt werden. Hier wird aus Gründen der Nachvollziehbarkeit auf eine derartige Gesamttaggregation aller Wirkungsindikatoren zu einer einzigen Kennzahl verzichtet, um eine vorgetäuschte Objektivität zu vermeiden [9]. Vielmehr wird jede Umweltwirkung singulär diskutiert.

3 Untersuchte Referenzanlagen

Die Erschließung geothermischer Ressourcen mit dem Ziel der Stromerzeugung ist an zwei Bedingungen geknüpft. Zum einen sollte eine Reservoirtemperatur von mindestens 100 °C erschlossen werden und zum anderen muss eine ausreichende Menge an Thermalwasser aus dem Untergrund gefördert werden können. Während die erste Voraussetzung bei einer entsprechenden Bohrtiefe in der Regel zu erreichen ist, grenzt die zweite Bedingung mögliche Standorte deutlich stärker ein. Deshalb konzentrieren sich in Deutschland derartige Aktivitäten momentan auf den Malmkarst des Süddeutschen Molassebeckens, den Muschelkalk und Buntsandstein des Oberrheingrabens und die Rotliegend-Sandsteine des Norddeutschen Beckens [10], [11].

Ausgehend davon und der derzeitigen Marktentwicklung werden gegenwärtig repräsentative geothermische Anlagen für die anschließende Lebensweganalyse definiert. Diese Referenzanlagen bestehen aus zwei Tiefbohrungen, einer Thermalwasserleitung und einer Konversionsanlage. In der Förderbohrung wird das Thermalwasser mit Hilfe einer Tiefpumpen aus dem Reservoir zu Tage gefördert. Das Thermalwasser wird – von der Umgebung vollständig abgeschlossen – in einer Thermalwasserleitung transportiert und überträgt seine Wärme an den Konversionskreislauf der Wärme-Kraft-Maschine. In dieser zirkuliert ein Arbeitsmittel (organischer Stoff beim ORC oder ein Ammoniak-Wasser-Gemisch beim Kalina-Cycle), welches verdampft wird und anschließend in einer Turbine Arbeit leistet. Das abgekühlte Thermalwasser wird in der Thermalwasserleitung zu der Injektionsbohrung geführt und an das Reservoir zurück gegeben.

Aufgrund der zu erwartenden Temperaturen und Durchlässigkeiten wird für den Oberrheingraben und das Süddeutsche Molassebecken jeweils eine Anlage mit einer elektrischen Auslegungsleistung von 3 MW und für das Norddeutsche Becken eine 1 MW-Anlage zu Grunde gelegt (Tabelle 2). Alle Anlagen werden mit 7 500 Volllaststunden pro Jahr betrieben. Die technische Lebensdauer wird mit 30 Jahren angesetzt. Ersatzbeschaffungen von Anlagenkomponenten mit einer geringeren Lebensdauer (z. B. Austausch der Förderpumpe alle 4 Jahre) werden berücksichtigt. Die für die Sachbilanz notwendigen Daten für Material- und Energieströme (z. B. Stahl-, Bohrspülungs- und Dieselbedarf pro Bohrung, Energiebedarf für Tiefpumpenbetrieb und Kühlung) wurden der Fachliteratur, den laufenden Projekten und/oder entsprechenden Gutachten entnommen [15].

Tabelle 2 Definition geothermischer Referenzkonzepte

| | Oberrhingraben | Süddeutsches Molassebecken | Norddeutsches Becken |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <i>Reservoirparameter</i> | | | |
| Bohrlochkonzept | Aquifer-Dublette ^a | Aquifer-Dublette ^a | Aquifer-Dublette ^a |
| Bohrlochtiefe in km | 3,0 | 3,4 | 4,4 |
| Fördertemperatur in °C | 150 | 120 | 150 |
| Gesamtförderrate in m ³ /h | 300 ^b | 550 ^c | 100 ^b |
| PI ^c bzw. II ^d in m ³ /(h MPa) | 60 ^b | 200 ^c | 20 ^b |
| Technische Lebensdauer in a | 30 ^e | 30 ^e | 30 ^e |
| <i>Konversionsanlage</i> | | | |
| Elektrische Leistung ^f in MW _{el} | 3 | 3 | 1 |
| Wirkungsgrad ^g in % | 12 | 10 | 12 |
| Elek. Volllaststunden in h/a | 7 500 | 7 500 | 7 500 |

^a saigere Bohrungen mit 1.000 m Abstand; ^b hydraulisch stimuliert [12]; ^c chemisch stimuliert [12], [13]; ^c Produktivitätsindex; ^d Injektivitätsindex; ^e Förderpumpe 4 a, Konversionsanlage und Wärmetauscher 15 a; ^f Auslegungsleistung einer einfachen ORC-Anlage mit zwangsbelüftetem Nasskühlturm; ^g Wirkungsgrad im Auslegungspunkt [14];

Um diese zu untersuchenden geothermischen Stromerzeugungsoptionen einordnen zu können, werden zusätzlich typische nicht-geothermische Vergleichskonzepte bzw. Anlagenkonfigurationen definiert (Tabelle 3; vgl. [16], [17]).

Tabelle 3 Definition nicht-geothermischer Vergleichskonzepte

| | Elektr. Leistung in MW _{el} | Elektr. Volllaststunden in h/a | Elektr. Wirkungsgrad in % | Technische Lebensdauer in a |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| <i>Feste Biomasse</i> | | | | |
| Biomassevergasung ^a GuD ^b | 20 | 7 500 | 42 | 15 |
| Wirbelschichtfeuerung ^c D ^d | 20 | 7 500 | 30 | 15 |
| <i>Fotovoltaik</i> | | | | |
| Einfamilienhaus-Dachanlage ^e | 0,05 | 800 | | 20 |
| Freiflächenanlage ^e | 1 | 1 000 | | 20 |
| <i>Windkraft</i> | | | | |
| Onshore-Windenergieanlage | 2,5 | 1 400 | | 20 |
| Onshore-Windenergieanlage | 5 | 2 000 | | 20 |
| Offshore-Windenergieanlage | 5 | 4 500 | | 15 |
| <i>Wasserkraft</i> | | | | |
| "Kleine" Wasserkraftanlage | 0,3 | 4 300 | | 45 |
| "Große" Wasserkraftanlage | 30 | 4 500 | | 45 |
| <i>Fossile Energieträger</i> | | | | |
| Erdgas GuD ^b | 800 | 5 000 | 58 | 25 |
| Steinkohlestaubfeuerung D ^c | 800 | 7 000 | 45 | 30 |
| Braunkohlestaubfeuerung D ^c | 800 | 8 000 | 42 | 30 |

^a 100 % Waldholz; ^b Gas- und Dampfkraftprozess; ^c 50 % Altholz, 50 % Waldholz; ^d Dampfkraftprozess; ^e polykristalline Module

4 Bilanzergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der erarbeiteten Lebenswegbilanzen zunächst für die Systeme auf Basis der Geothermie und anschließend für die untersuchten Vergleichssysteme dargestellt und diskutiert.

4.1 Geothermische Referenzkonzepte

Das Beispiel der untersuchten geothermischen Stromerzeugungsanlage im Süddeutschen Molassebecken zeigt, dass beim Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen (d. h. fossiler Energieträger) der Großteil aus dem untertägigen Anlagenbau resultiert (Abb. 4). Dabei werden die Aufwendungen an erschöpflichen Energieressourcen maßgeblich durch die Antriebsenergie für die Bohrungsniederbringung (ca. 50 %), die Verrohrung der Tiefbohrung mit Stahl (ca. 30 %) und den Einsatz der Bohrspülung (ca. 15 %) verursacht; demgegenüber haben die Stimulation und die Zementierung nur einen untergeordneten Einfluss. In der Summe entspricht dies unter den hier zugrunde gelegten Rahmenannahmen einem Verbrauch von etwa 80 MJ bzw. 22 kWh je Meter abgeteufter Bohrung.

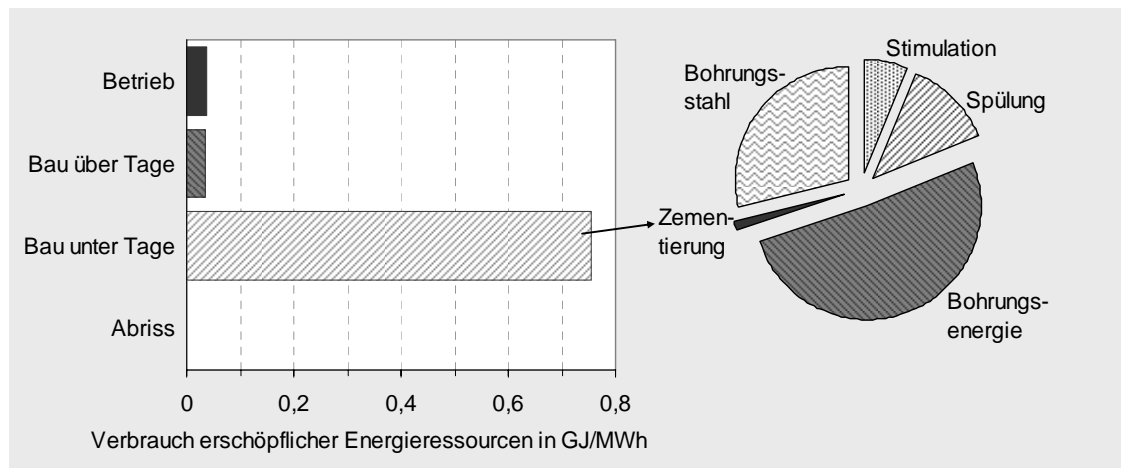


Abb. 4 Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen am Beispiel der Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken (links: Gesamtanlage; rechts: Bau unter Tage)

Erschöpfliche Energieressourcen durch den Bau der überirdigen Kraftwerksinstallationen werden überwiegend durch den Bau der Konversionsanlage und der Thermalwasserleitung verbraucht. Beim Anlagenbetrieb müssen u. a. Aufwendungen für die Kühlwasseraufbereitung oder Ersatzbeschaffungen bestimmter Anlagenkomponenten, deren technische Lebensdauer überschritten wird und die ersetzt werden müssen (z. B. Förderpumpe), berücksichtigt werden. Hinzu kommen noch vergleichsweise geringe Aufwendungen für den Abriss und die Entsorgung der Anlage. Zusammengenommen ist der Verbrauch an erschöpflichen Energieressourcen dieser Lebenswegabschnitte im Vergleich zum Bau unter Tage allerdings gering.

Der spezifische Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen wird damit mit 91 % bzw. 0,75 GJ/MWh durch den Bau unter Tage dominiert (zum Vergleich: Bau über Tage 4 % bzw. 0,03 GJ/MWh, Betrieb 4,5 % bzw. 0,04 GJ/MWh, Abriss <1 % bzw. 0,001 GJ/MWh).

Ein Vergleich der unterschiedlichen geothermischen Referenzanlagen zeigt, dass die für die Anlage im Süddeutschen Molassebecken beschriebenen Zusammenhänge tendenziell auf die untersuchten geothermischen Kraftwerke im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken übertragen werden können. Aber es zeigen sich deutliche Unterschiede in Bezug auf den Höhe des spezifischen Verbrauchs erschöpflicher Energieträger (Abb. 5). Unter den definierten Bedingungen ist der geringste Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen je MWh_{netto} bei der Anlage im Oberrheingraben und der größte bei der Anlage im Norddeutschen Becken gegeben.

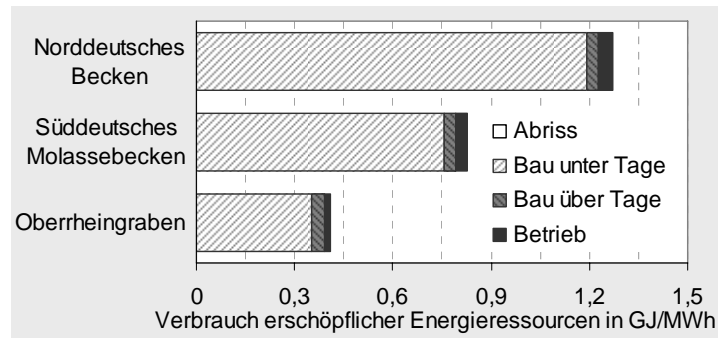


Abb. 5 Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen der untersuchten geothermischen Systeme

Da die Erstellung der Bohrungen den größten Einfluss auf den Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen hat, resultieren die in Abb. 5 deutlich werdenden Unterschiede primär aus den unterschiedlichen zugrunde gelegten Standortgegebenheiten. Während die üblicherweise genutzten Reservoirs im Oberrheingraben in vergleichsweise geringer Tiefe liegen und das Reservoir aufgrund der Förderrate mit einem kleineren Bohrungsdurchmesser im Vergleich zum Süddeutschen Molassebecken erschlossen werden kann, ist hier der Aufwand für die Lagerstättenerschließung deutlich geringer. Verglichen mit der Anlage im Norddeutschen Becken, die durch die tiefste Bohrung gekennzeichnet ist, liegt der Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen je $\text{MWh}_{\text{netto}}$ deshalb bei rund einem Drittel. Und verglichen mit dem Geothermiekraftwerk im Süddeutschen Molassebecken werden rund halb so viel erschöpfliche Energieressourcen je $\text{MWh}_{\text{netto}}$ verbraucht.

Auch beeinflusst die jeweils eingespeiste Netto-Strommenge das Ergebnis. Aufgrund der kleineren Kraftwerksgröße der Referenzanlage im Norddeutschen Becken kann der höhere Verbrauch erschöpflicher Ressourcen aufgrund der tieferen Bohrung auch nur auf einen geringeren Netto-Strom bezogen werden. Im Vergleich zur Referenzanlage im Oberrheingraben werden daher ca. 60 % weniger $\text{MWh}_{\text{netto}}$ bereit gestellt. Bei der Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass im Vergleich zur Anlage im Oberrheingraben trotz gleicher installierter Anlagenleistung weniger Strom netto eingespeist werden kann. Der Grund dafür ist das kühlere Thermalwasser, welches einen niedrigeren Stromwirkungsgrad und dadurch einen vergleichsweise größeren spezifischen Aufwand für die Kühlung zur Folge hat. Außerdem ist die höhere Förderrate mit einem Mehraufwand für die Thermalwasserzirkulation verbunden. Insgesamt führt das dazu, dass die Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken im Vergleich zur Anlage im Oberrheingraben unter den getroffenen Annahmen ca. 40 % weniger Strom netto einspeisen kann.

Zusammengenommen wird der spezifische Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen damit zwar maßgeblich durch die Reservoirerschließung bestimmt. Er kann aber auch durch den übertägigen Anlagenteil, durch den die letztendlich netto frei Anlage bereitstellbare Energiemenge definiert wird, merklich beeinflusst werden. Ist durch den Einsatz verbesserter Anlagentechnik (z. B. mehrstufige ORC-Anlage, Kalina-Anlage, effizientere Tiefpumpe) eine Steigerung des Netto-Energieertrags möglich, kann auch der spezifische Verbrauch erschöpflicher Energieträger merklich reduziert werden.

Eine weitere Möglichkeit, den spezifischen Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen zu reduzieren, ist zusätzlich Wärme bereit zu stellen, indem die im Thermalwasser nach der Stromerzeugung noch enthaltene Restwärme nutzbar gemacht wird. Die bereitstellbare Niedertemperaturwärme kann beispielsweise mit einem Nahwärmenetz an Haushaltskunden geliefert werden und so die Wärmemenge ersetzen, die sonst mit einer Erdgasfeuerung hätte bereitgestellt werden müssen. Unter diesen Bedingungen würden bei einer Wärmebereitstel-

lung mit einem Niedertemperatur-Wärmenetz mit 70 °C Vorlauf- und 50 °C Rücklauf-temperatur im Oberrheingraben 7 MW, im Süddeutschen Molassebecken 13 MW und im Norddeutschen Becken 2 MW thermische Leistung zusätzlich zur Verfügung stehen. Bei jährlich 1 800 Wärmevolllaststunden für durchschnittliche Haushaltskunden wird der Verbrauch an erschöpflichen Energieressourcen, der nun auf eine größere netto bereitgestellte Energiemenge (d. h. die erzeugte elektrische Energie und die substituierbare thermische Energie) bezogen werden muss, nicht nur reduziert; unter den hier zu Grunde gelegten Bedingungen können erschöpfliche Energieressourcen sogar eingespart werden (Abb. 6). Dieser maßgebliche Einfluss der Wärmegutschrift liegt dabei an der dem Thermalwasserstrom entziehbaren großen thermischen Leistung, welche – aufgrund der geringen Stromwirkungsgrade – die elektrische Leistung um ein Vielfaches übersteigt; und dieser Effekt kann noch deutlich gesteigert werden, wenn Wärme nicht mit rund 1 800 h/a an Haushaltskunden, sondern mit 7 500 h/a an Industriekunden verkauft werden kann. Bei einem Vergleich der betrachteten Anlagen zeigt sich, dass aufgrund des jeweils geförderten Thermalwassermassenstroms und der entsprechenden Wärmeleistung die größte Einsparung an erschöpflichen Energieressourcen im Süddeutschen Molassebecken zu erzielen ist.

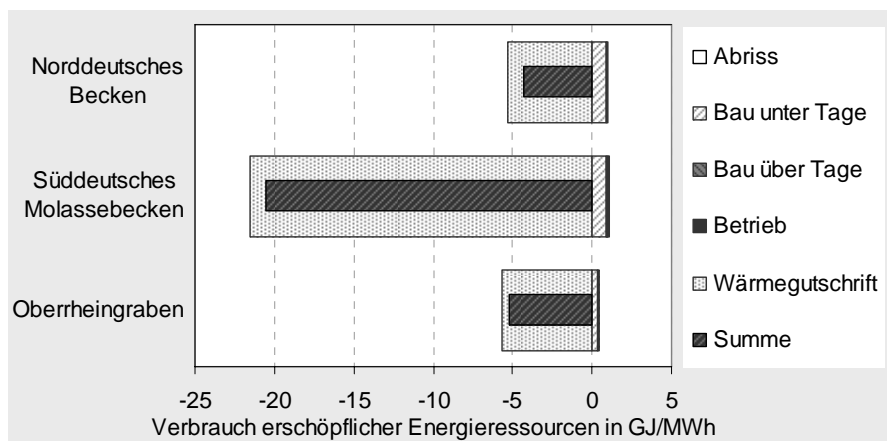


Abb. 6 Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen der untersuchten geothermischen Systeme mit zusätzlicher Wärmebereitstellung an ein Niedertemperatur-Wärmenetz

Die bisher exemplarisch für den Verbrauch erschöpflicher Ressourcen untersuchten Zusammenhänge lassen sich für die definierten Referenzanlagen qualitativ auch auf die untersuchten luftgetragenen Schadstofffreisetzung übertragen (Abb. 7). Lediglich bei der Einsparung von Emissionen mit versauernder Wirkung durch eine zusätzliche Wärmebereitstellung zeigen sich Unterschiede. Die Wärmegutschrift hat hier einen geringeren Einfluss, da das hier substituierte Erdgas ein nahezu schwefelfreier Brennstoff ist und deshalb bei dessen Verbrennung nur sehr geringe Mengen an SO₂-Äquivalenten freigesetzt werden.

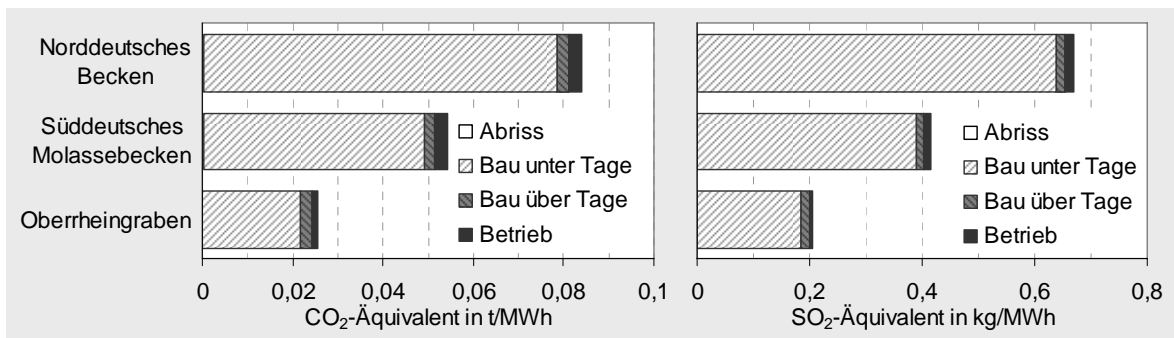


Abb. 7 Luftgetragene Schadstoffe der untersuchten geothermischen Systeme

4.2 Andere Stromerzeugungsoptionen

Bei vergleichbaren Untersuchungen unter gleichen Rahmenannahmen für die zuvor definierten weiteren Stromerzeugungsoptionen zeigt sich, dass der spezifische Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen bei einer Stromerzeugung aus Wasser und Wind in einer ähnlichen Größenordnung liegt (Abb. 8). Er resultiert überwiegend aus dem Bau der Anlagen. Die Stromerzeugung auf Basis von Biomasse liegt ebenfalls in einer ähnlichen Größenordnung. Im Unterschied zu einer Wasser- oder Windstromerzeugung resultiert der größere Anteil des Verbrauchs an erschöpflichen Energieressourcen aber aus der Brennstoffbereitstellung frei Kraftwerk. Im Vergleich dazu werden für den Bau von Fotovoltaik-Anlagen spezifisch deutlich mehr energetische Ressourcen benötigt. Der Abriss ist bei allen Konzepten vernachlässigbar.

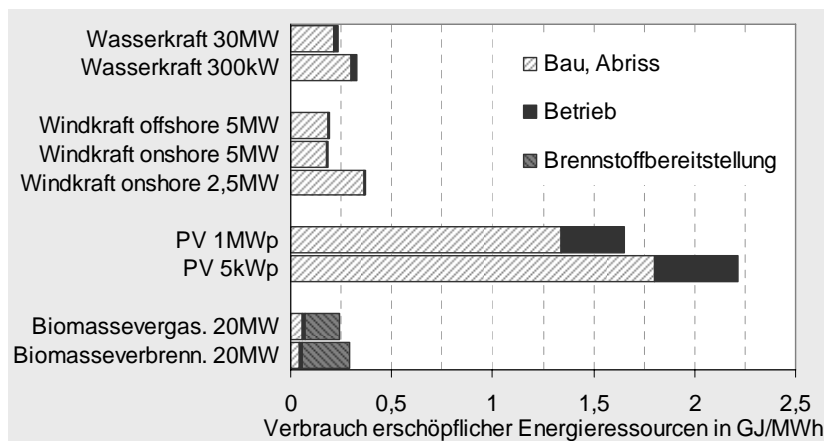


Abb. 8 Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen der untersuchten weiteren Stromerzeugungsanlagen auf der Basis regenerativer Energien

Die untersuchten luftgetragenen Schadstoffe der definierten Wasser-, Wind- und Fotovoltaik-Anlagen zeigen ähnliche Tendenzen wie der Verbrauch an erschöpflichen Energieressourcen (Abb. 9). Nur für die Stromerzeugung aus Biomasse fällt die Betriebsphase aufgrund der direkten Emissionen bei der thermo-chemischen Umwandlung bei den Klimagasemissionen stärker ins Gewicht und stellt in Bezug auf die Stofffreisetzungen mit versauernder Wirkung den maßgeblichen Einfluss dar.

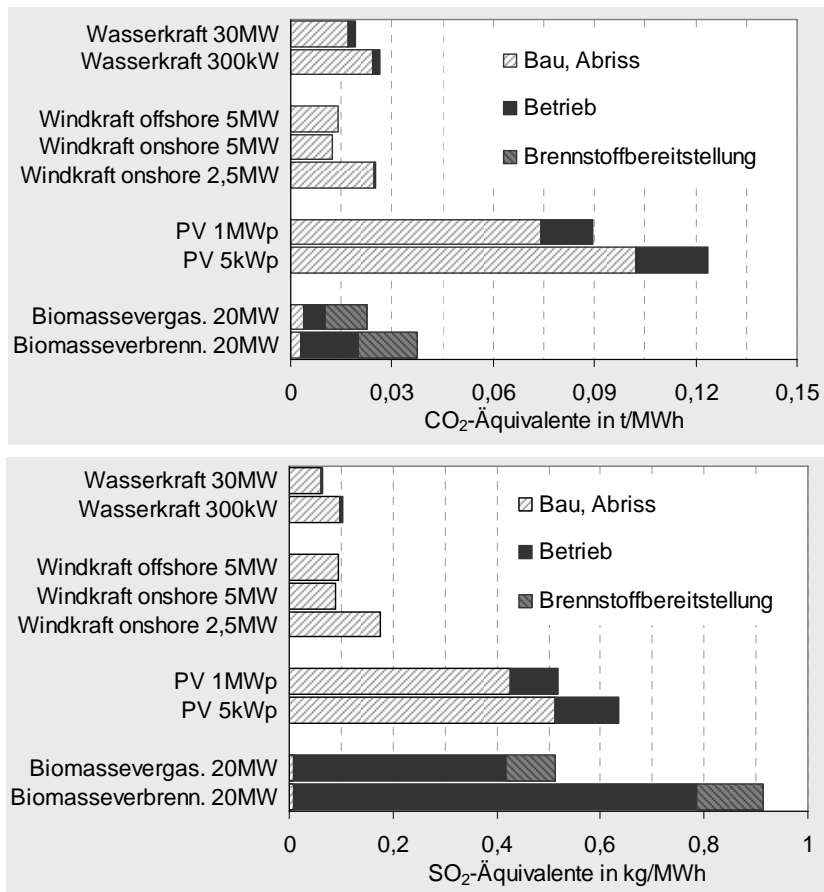


Abb. 9 Emissionen mit Klimawirksamkeit (oben) und mit versauernder Wirkung (unten) der untersuchten weiteren Stromerzeugungsanlagen auf der Basis regenerativer Energien

Der Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen der untersuchten Vergleichsanlagen auf der Basis fossiler Energieträger, welcher fast ausschließlich durch die Brennstoffbereitstellung verursacht wird, liegt um rund das 35-fache über dem der betrachteten Stromerzeugungsoptionen auf der Basis regenerativer Energien (Abb. 10; 0,25 GJ/MWh bei der Wasser- und Windstromerzeugung vs. 8,5 bis 9 GJ/MWh bei einer Kohleverstromung). Aufgrund der unterstellten Wirkungsgrade ist der Verbrauch erschöpflicher Energieträger bei der Braunkohleverstromung am höchsten und bei der Stromerzeugung aus Erdgas am geringsten. Dabei werden im Falle der Stromerzeugung aus Steinkohle die sog. "Ewigkeitskosten" [18] in Form von energetischen Aufwendungen aufgrund des nicht möglichen Rückbaus des Steinkohle-Bergbaus nicht berücksichtigt; dies würde die Bilanz merklich verschlechtern.

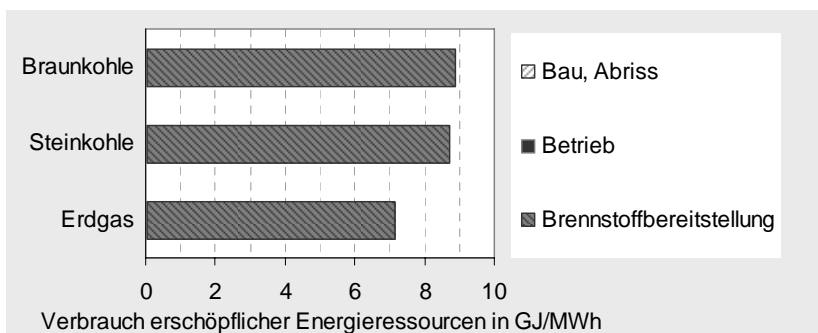


Abb. 10 Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen der untersuchten Stromerzeugungsanlagen auf der Basis fossiler Energieträger

Die Emissionen luftgetragener Schadstoffe werden bei Anlagenkonzepten auf der Basis fossiler Energieträger überwiegend durch die thermo-chemische Umsetzung des Brennstoffes verursacht (Abb. 11). Nur der geringere Anteil resultiert aus der Brennstoffbereitstellung. Aufgrund der Brennstoffzusammensetzung sind dabei die luftgetragenen Stofffreisetzungen des untersuchten Erdgas-GuD-Kraftwerks geringer als bei der Kohlefeuerung, da Erdgas sowohl einen spezifisch geringeren Kohlenstoffanteil (und damit spezifisch geringere Kohlenstoffdioxid- und folglich Klimagasemissionen) als auch einen kleineren Schwefelanteil (und damit spezifisch geringere Emissionen mit versauernder Wirkung) hat. Daraus resultieren zusammen mit den vergleichsweise hohen Stromwirkungsgraden bei der Erdgasverstromung SO_2 -Äquivalent-Emissionen im Bereich der untersuchten Stromerzeugungsoptionen auf der Basis regenerativer Energien.

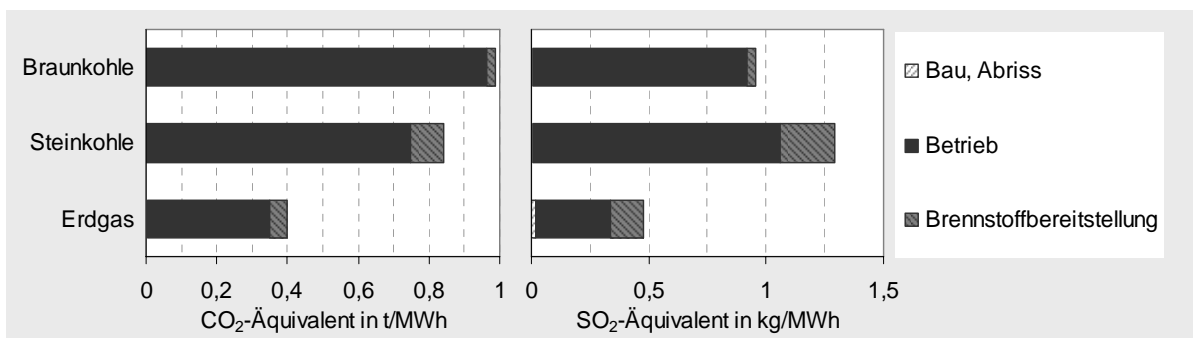


Abb. 11 Emissionen ausgewählter luftgetragener Schadstoffe der untersuchten Stromerzeugungsanlagen auf der Basis fossiler Energieträger

4.3 Vergleich

Bei einem Gesamtvergleich aller untersuchten Optionen wird deutlich, dass die geothermische Stromerzeugung für die hier analysierten Umweltwirkungen in der Bandbreite der untersuchten Vergleichsanlagen auf der Basis regenerativer Energien liegt (Abb. 12). Im Vergleich zu den Referenzanlagen auf der Basis fossiler Energieträger werden vor allem der geringere Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen und erheblich verminderte Emissionen mit Klimawirksamkeit deutlich.

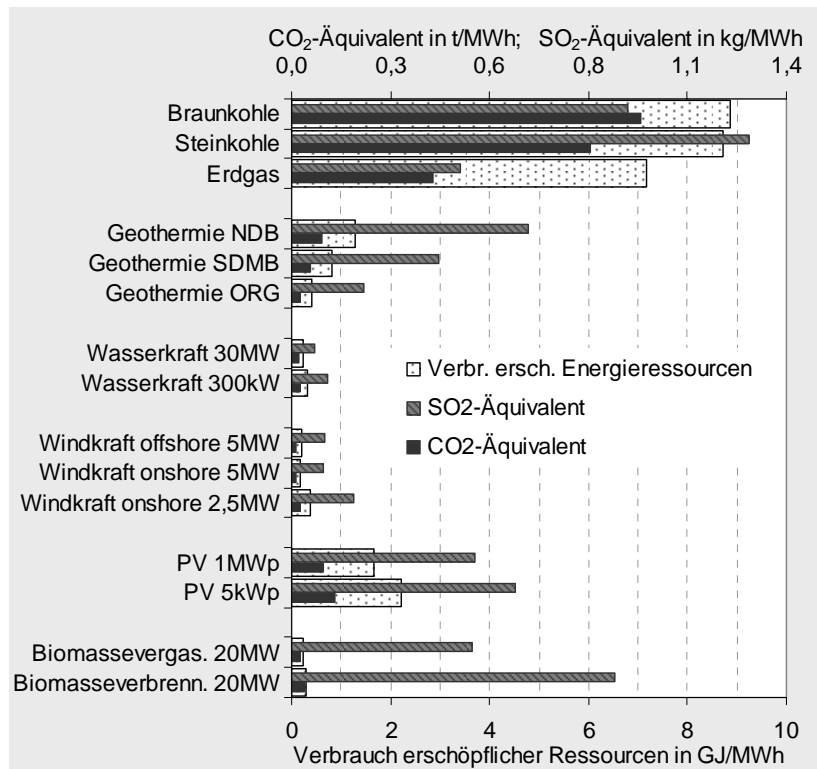


Abb. 12 Vergleich der untersuchten Stromerzeugungsoptionen

5 Schlussbetrachtung und Ausblick

Für eine nachhaltige Energiebereitstellung sind nicht nur die Umwelteffekte, die durch die eigentliche Konversionsanlage verursacht werden, ausschlaggebend. Vielmehr müssen auch die Umweltauswirkungen, die dem Anlagenbetrieb vor- und nachgelagert sind, Berücksichtigung finden. Da speziell bei der geothermischen Stromerzeugung die Erschließung des Reservoirs mit erheblichen energetischen und materiellen Aufwendungen verbunden ist, wird eine Lebensweganalyse ausgewählter Umwelteffekte einer Stromerzeugung mit gegenwärtig an unterschiedlichen Standorten in Deutschland repräsentativen Geothermiekraftwerken durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Kontext anderer Stromerzeugungsoptionen auf der Basis regenerativer Energien und fossiler Energieträger diskutiert. Basierend auf den dargestellten Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die untersuchten Umwelteffekte im Lebensweg geothermischer Kraftwerke werden maßgeblich durch die Erschließung des Reservoirs bedingt. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer erfolgreichen Bohrungsniederbringung und die zukünftige Weiterentwicklung geophysikalischer, geologischer und geochemischer Vorerkundungsinstrumente, um die vorhandenen Potenziale einer effizienteren Erschließung des Untergrunds zukünftig nutzen zu können.
- Der übertägige Anlagenteil einer geothermischen Stromerzeugungsanlage ist für die bereitstellbare Energiemenge bestimmend. Mit dem Einsatz effizienter Anlagentechnik (z. B. mehrstufige ORC-Anlage, Kalina-Anlage, effizientere Tiefpumpe) und einer optimierten Gesamtsystemauslegung kann die einspeisbare Netto-Strommenge gesteigert und dadurch die spezifischen Umwelteffekte reduziert werden. Damit muss es ein vorrangiges Ziel sein, die übertägige Anlagentechnik im Zusammenspiel mit dem Reservoir so effizient wie möglich zu gestalten.

- Ein weiteres Optimierungspotenzial liegt in der Nutzbarmachung des im Thermalwasser nach der Stromerzeugung noch vorhandenen Energiegehalts z. B. durch eine zusätzliche Bereitstellung von Niedertemperaturwärme für Haushalts- und/oder Industriekunden. Je mehr Nutzwärme aus dieser Abwärme verfügbar gemacht werden kann, desto geringer sind die spezifischen Umwelteffekte. Deshalb sollte zukünftig auch die Umsetzbarkeit innovativer Nutzungskonzepte (z. B. Kaskaden-Nutzung, Kältebereitstellung) geprüft werden, durch die nicht nur die Restwärme des Thermalwassers, sondern auch die Abwärme aus dem Konversionsprozess mit möglichst hohen Volllaststunden genutzt werden kann. Aufgrund der dabei anfallenden großen Wärmemengen ist ein wirtschaftlicher Absatz der Wärme aber i. Allg. an entsprechende Abnehmerstrukturen gebunden; dies muss daher bereits zu Beginn der Projektentwicklung berücksichtigt werden.
- Eine geothermische Stromerzeugung zeigt z. T. deutlich geringere Umweltauswirkungen entsprechend der hier untersuchten Umwelteffekte im Vergleich zu einer Strombereitstellung aus fossilen Energieträgern und ist aus Sicht der untersuchten Umweltkenngößen etwa vergleichbar mit einer Stromerzeugung aus Windenergie oder Wasserkraft. Damit kann die Geothermie zur Reduzierung der Umweltauswirkungen des Stromerzeugungssystems in Deutschland beitragen – mit dem zusätzlichen Vorteil einer kontinuierlichen und regelbaren Energiebereitstellung, der bei höheren Anteilen der Windenergie im Stromsystem an Bedeutung gewinnen wird.

Die energetische Erdwärmennutzung kann somit zu einem nachhaltigeren Energiesystem beitragen. Und werden die vorhandenen Optimierungspotenziale der geothermischen Stromerzeugung in den kommenden Jahren erschlossen, werden diese Beiträge sogar noch zunehmen.

Danksagung

Der vorliegende Artikel basiert auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes FKZ 205 42 110, welches im Auftrag des Umweltbundesamtes am Institut für Energetik und Umwelt gGmbH in Leipzig durchgeführt wurde. Wir danken dem Umweltbundesamt für die konstruktive Zusammenarbeit und finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Erdwärme Kraft GbR: Fakten, Online unter: <http://www.erdwaerme-kraft.de/>, Stand: 11.04.2008
- [2] J. Baumgärtner: The geox GmbH Project in Landau – The First Geothermal Power Project in Palatinate / Upper Rhine Valley, Proceedings First European Geothermal Review – Geothermal Energy for Power Production, 29. – 31. Oktober 2007, Mainz 2007, S. 33
- [3] Welt online: Der Strom kommt aus dem Inneren der Erde , Artikel vom 14.05.2008, Online unter: http://www.welt.de/muenchen/article1994027/Der_Strom_kommt_aus_dem_Inneren_der_Erde.html, zugegriffen am 26.05.2008
- [4] Geothermie Unterhaching: Stromerzeugung, Online unter: http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/geothermie_web.nsf/id/pa_stromerzeugung.html, zugegriffen am 26.04.2008
- [5] EnBW: EnBW und ewb geben Startschuss für das erste Geothermie-Kraftwerk in Baden-Württemberg, Pressemitteilung vom 16.01.2008, Online unter: http://www.enbw.com/content/de/presse/pressemitteilungen/2008/01/PM_20080116_cu_mw01/index.jsp, zugegriffen am 09.04.2008
- [6] Bergamt Bayern, persönliche Mitteilung R. Zimmer, April 2008

- [7] Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: Geothermie - Konzession in Baden-Württemberg, http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Fachbereiche/geothermie/grundlagen/laufende_projekte, Stand: Juni 2007
- [8] Frick, S.; Kaltschmitt, M.: Ökologische Aspekte der tiefen Erdwärmennutzung – Analyse und Bewertung lokaler Umwelteffekte, Erdöl Erdgas Kohle, Juli 2008
- [9] Umweltbundesamt (UBA): Methodik der produktbezogenen Ökobilanz – Wirkungsbilanz und Bewertung, Umweltbundesamt, Berlin, 1995
- [10] Paschen, H.; Oertel, D.; Grünwald, R.: Möglichkeiten einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland – Sachstandsbericht; TAB Arbeitsbericht Nr. 84, Berlin, 2003
- [11] Jung, R.: Stand und Aussichten der Tiefengeothermie in Deutschland; Erdöl, Erdgas, Kohle; Februar 2007
- [12] Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Persönliche Mitteilung: Jung, R., Oktober 2006
- [13] Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN): Unterhaching setzt auf Geothermie; in aktuell – GTN-Geothermie-Newsletter, Ausgabe Januar 2005, Neubrandenburg, 2005
- [14] Köhler, S.: Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse – Analyse und Vergleich binärer Kraftwerke, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005
- [15] Frick, S., Schröder, G., Rychtyk, M., Bohnenschäfer, W., Kaltschmitt, M.: Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung – Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung, Forschungsprojekt FKZ 205 42 110 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Endbericht Leipzig, 2007
- [16] Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [17] Kaltschmitt, M., Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer Verlag, Berlin, 2001
- [18] Landtag Nordrhein-Westfalen: „Ewigkeitskosten“ höher als erwartet – Wirtschaftsausschuss diskutiert Ergebnisse des KPMG-Gutachtens, Parlamentszeitschrift „Landtag Intern“ 2/2007