

Mögliche Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie durch den Einsatz von F-Gasen im Energiewandlungsprozess mittels ORC

Förderkennzeichen 363 01 391
UBA-FB 001690

Mögliche Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie durch den Einsatz von F-Gasen im Energiewandlungsprozess mittels ORC

von

**Florian Heberle, Dr. Andreas Obermeier, Prof. Dr. Dieter
Brüggemann**

Steinbeis-Transferzentrum - Angewandte Thermodynamik,
Energie- und Verbrennungstechnik (ATEV), Bayreuth

in Kooperation mit

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transport-
prozesse, Universität Bayreuth

Zentrum für Energietechnik, Universität Bayreuth

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4323.html>
verfügbar.

Die im Kurzgutachten geäußerten Ansichten und
Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers
übereinstimmen.

ISSN 1862-4359

Erstellung des Kurgutachtens:	Universität Bayreuth Universitätsstrasse 30 95440 Bayreuth
Abschlussdatum:	Dezember 2011
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet I 2.3 Erneuerbare Energien Christiane Lohse, Andreas Bertram

Dessau-Roßlau, November 2012

Zusammenfassung

Der Organic Rankine Cycle (ORC) ist neben dem Kalina Cycle einer der wenigen Kreisprozesse, der für eine Stromerzeugung auf Niedertemperaturniveau geeignet ist. Durch Optimierungsansätze, die auf eine gute Anpassung der Temperaturprofile von Wärmequelle bzw. -senke mit dem ORC abzielen, können Effizienzsteigerungen im Bereich von 15 % bis 25 % erreicht werden. Optimierungsmaßnahmen sind z.B. die Auswahl geeigneter Arbeitsmedien, die zweistufige Entspannung, die überkritische Fahrweise oder der Einsatz zeotroper Gemische als Arbeitsmedien. Durch den Einsatz fluorierter Kohlenwasserstoffe erhöht sich die Anzahl potentieller Arbeitsmedien und die damit verbundene Leistungssteigerung signifikant. Mit der Effizienzsteigerung sind aber auch zusätzliche Emissionen aufgrund von Leckagen im Betrieb sowie bei der Befüllung und Entsorgung verbunden. Solche Emissionen können nicht vollständig vermieden werden und liegen nach Hersteller- und Betreiberinformationen jährlich im Bereich von 1 % bis 3 % der Füllmenge. Im Rahmen gesetzlicher Regelungen sind ORC-Anlagen durch eine Berichtspflicht gemäß UStatG und in der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 hinsichtlich der Verwendungsmengen und der für diese Anwendung in den Verkehr gebrachten Mengen erfasst. Eine Berichtspflicht besteht für die nationale Emissionsberichterstattung basierend auf der Klimarahmenkonvention.

Um mögliche Treibhausgasemissionen durch geothermische Kraftwerke einschätzen zu können, wurden in dieser Studie verschiedene Szenarien in Abhängigkeit der Emissionsrate und Ausbaustufe der geothermischen Stromerzeugung berechnet. Kommt es zu einem Ausbau der geothermischen Stromerzeugung im vorhergesagten Rahmen, so sind die Emissionen bis zum Jahr 2030 als gering einzustufen. Bei maximaler Ausbaustufe, entsprechend dem technisch-ökologisch nutzbarem Potential von 2120 Kraftwerken, und einer Emissionsrate von 3 % liegen die Emissionen in Abhängigkeit von den betrachteten Szenarien in einem Bereich von 0,24 Mio. t/a bis 3,02 Mio. t/a CO₂-Äquivalenten. Ein Vergleich mit den 2009 freigesetzten Treibhausgasemissionen durch F-Gase von 15,6 Mio. t/a CO₂-Äquivalenten zeigt, dass die Emissionen in dieser Ausbaustufe durchaus relevant sind. Eine Einbeziehung von ORC Anlagen, die fluorierte Kohlenwasserstoffe als Arbeitsmittel nutzen, in der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 über die Meldung der für diese Anwendung in den Verkehr gebrachten Mengen hinaus erscheint nach den derzeitigen Diskussionen und Positionen der EU-Kommission möglich.

Für einen umweltverträglichen Ausbau der geothermischen Stromerzeugung muss der durch diese Studie unterlegte Zielkonflikt zwischen Effizienzsteigerung und zusätzlichen Emissionen weiter thematisiert werden. In diesem Zusammenhang ist eine verlässliche Datenlage zu den Emissionsraten von ORC-Anlagen zu schaffen. Darüber hinaus werden die angestellten Emissionsberechnungen weiter vertieft. Hier wird eine systematische Wahl der eingesetzten Arbeitsmedien in Abhängigkeit der Thermalwassertemperatur vorgenommen, wobei die Bewertung des Ausbaupotentials der jeweiligen Temperaturklasse gemäß Paschen et al. [27] erfolgt. Zudem müssen generelle Ansätze zur Senkung der Emissionen und zur Effizienzsteigerung intensiviert werden. Dies sind beispielsweise alternative Kreisprozesse, eine stetige Weiterentwicklung des ORC oder der Einsatz von umweltfreundlichen Kältemitteln mit geringem GWP.

Abstract

In case of low temperature heat sources Organic Rankine Cycle (ORC) is next to Kalina Cycle one of the few thermodynamic cycles suitable for power generation. Optimization strategies provide a better glide matching of the temperature profiles of heat source or sink to the ORC compared to the standard cycle. This leads to an increase in efficiencies in the range of 15 % to 25 %. In this context, selection of suitable working fluids, two-stage expansion, supercritical cycles or the usage of zeotropic mixtures as working fluids has to be mentioned. Due to the use of fluorinated hydrocarbons, the number of potential fluids as well as the efficiency increase significantly. However, an increase in emissions due to leakages during operation, filling and disposal is associated with fluorinated fluids compared to natural hydrocarbons. Such emissions cannot be completely avoided and according to information of manufacturers and operators they are annually in the range of 1 % to 3 % of the capacity. Based on legal regulations recording of the use levels of fluorinated hydrocarbons in ORC systems according to UStatG and EU Regulation 842/2006 is obligatory. The recording obligation exists regarding the national emission inventory based on the framework convention on climate change. To evaluate potential greenhouse gas emissions by geothermal power plants, in this study different scenarios depending on rate of emission and number of power plants are calculated. If a development in geothermal power generation as predicted takes place, the emissions until the year 2030 are to be classified as low. In case of the technical-ecological potential with 2120 power plants and a rate of emission of 3 % the emissions are between 0.24 Million t/a and 3.02 Million t/a depending on the considered scenario. A comparison to the greenhouse gases by fluorinated hydrocarbons in the year 2009 with 15.6 Million t/a shows that the emissions for this number of power plants are definitely relevant. Regarding actual discussion and positions of the EU-Commission an inclusion of the ORC in the ChemKlimaSchutzV and EU Regulation 842/2006 because of the use of fluorinated hydrocarbons seems to be possible.

For a sustainable expansion of geothermal power generation the conflict of objectives, highlighted by this study, between efficiency increase and additional emissions has to be discussed in more detail. Therefore, reliable data for rates of emissions by ORC systems are important. Furthermore, the performed calculations will be extended by selecting working fluids according to the geothermal water temperature. In addition general approaches for the reduction of emissions and the increase in efficiency have to be intensified. In this context alternative thermodynamic cycles, steady improvement of ORC systems or the use of refrigerants with low global warming potential are examples.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	II
1. Einleitung.....	1
2. Obertägige Kraftwerkstechnik.....	1
2.1. Thermodynamische Grundlagen des Organic Rankine Cycle.....	1
2.2. Charakterisierung potentieller Arbeitsmedien.....	3
2.3. Stand der Technik.....	5
2.4. Stand von Forschung und Entwicklung.....	6
3. Verordnungen, Richtlinien und Normen beim Einsatz von halogenierten Stoffen.....	8
4. Treibhausgasemissionen durch fluoridierte Arbeitsmedien – Szenarien für die geothermische Stromerzeugung in Deutschland.....	9
5. Maßnahmen zum umweltverträglichen Ausbau der geothermischen Stromerzeugung mit effizienten Kraftwerkstechnologien.....	13
6. Effektivität und Umweltverträglichkeit in geothermischen Niedertemperatur- Kreisprozessen – Ergebnisse eines Workshops mit Stakeholdern.....	14
7. Literaturverzeichnis.....	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anlagenskizze eines ORC-Kraftwerks mit geothermischer Wärmequelle.....	2
Abbildung 2: Sicherheitstechnische, toxische und umweltrelevante Eigenschaften potentieller ORC-Medien in Abhängigkeit von Wasserstoff, Fluor- und Chloratomen in der Molekülverbindung.....	5
Abbildung 3: Exergetischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Thermalwasser- eintrittstemperatur.....	7
Abbildung 4: Jährliche Emissionen für Szenario I in Abhängigkeit der Emissionsrate und Ausbaustufe der geothermischen Stromerzeugung.....	11
Abbildung 5: Jährliche Emissionen für die Szenarien I bis IV bei einer Emissionsrate von 3 %.....	12
Abbildung 6: Emissionen der geothermischen Stromerzeugung bei 3 % Emissionsrate ohne/mit Berücksichtigung der Vorkette im Vergleich zu einem GuD-Kraftwerk und dem dt. Strommix.....	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Thermodynamische, sicherheitstechnische und umweltrelevante Daten möglicher ORC-Arbeitsmedien	4
Tabelle 2:	Kraftwerke zur geothermischen Stromerzeugung im deutschsprachigen Raum	6
Tabelle 3:	Ausbaustufen der geothermischen Stromerzeugung basierend auf Studien	10

1. Einleitung

Die geothermische Stromerzeugung gewinnt aufgrund ihrer Grundlastfähigkeit zunehmend an Bedeutung bei den Bestrebungen zur verstärkten Nutzung von regenerativen Energien. In Deutschland werden Aquifere (Grundwasserleiter) und poröse Gesteinsschichten durch Bohrungen in Tiefen von bis zu 7 Kilometern erschlossen. Die geförderten Thermalwassertemperaturen liegen zwischen 80 °C und 180 °C. In diesem Bereich ist eine Direktentspannung von Thermalwasserdampf oder der Einsatz von Flash-Prozessen thermodynamisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll [1,2]. An dessen Stelle werden Sekundärprozesse wie der Organic Rankine Cycle (ORC) oder der Kalina Cycle (KC) eingesetzt, um die Niedertemperaturwärme zur Stromerzeugung zu nutzen. Dabei wird die thermische Energie des Thermalwassers auf einen Dampfkreisprozess mit organischen Arbeitsmedien übertragen. Im Hinblick auf den oben genannten Temperaturbereich werden vorwiegend natürliche oder fluoridierte Kohlenwasserstoffe eingesetzt. Im Zusammenhang mit der Wahl des Arbeitsmediums ergeben sich Fragestellungen zur ganzheitlichen Bewertung der möglichen Fluide und Kraftwerkskonzepte. Dabei gilt es, neben thermodynamischen und ökonomischen Kriterien auch Aspekte der Umwelt- und Klimarelevanz, Sicherheitstechnik sowie Toxizität zu berücksichtigen. Im Fokus dieses Beitrages steht der Zielkonflikt der Prozessoptimierung durch fluoridierte Arbeitsmedien gegenüber den erhöhten Treibhausgasemissionen durch die ungewollte Freisetzung dieser Stoffe z.B. in Form von Leckagen. In diesem Zusammenhang ergeben sich für den Einsatz von fluoridierten Arbeitsmedien in geothermischen ORC-Anlagen relevante Fragestellungen zu bestehenden gesetzlichen Regelungen, zur Dichtheit der Systeme und der Quantifizierung von Emissionsmengen durch die Verwendung derartiger Fluide.

2. Obertägige Kraftwerkstechnik

2.1. Thermodynamische Grundlagen des Organic Rankine Cycle

Der ORC findet vorwiegend Einsatz bei der Nutzung von Niedertemperaturwärme zur Stromerzeugung. Typische Anwendungsgebiete sind die Tiefe Geothermie, die Nutzung industrieller Abwärme oder solarer Wärmequellen. Die Verwendung organischer Medien, wie zum Beispiel natürliche oder teilfluorierte Kohlenwasserstoffe, ermöglicht die Überführung des Arbeitsmediums in die Dampfphase bereits bei geringen Temperaturen und Betriebsdrücken. **Abbildung 1** zeigt eine schematische Anlagenverschaltung eines ORC-Geothermiekraftwerkes. Das Arbeitsmedium wird mit Hilfe einer Speisepumpe im flüssigen Zustand auf den oberen Prozessdruck gebracht (1→2). Anschließend erfolgt eine interne Wärmerückgewinnung im Rekuperator (2→3). Im Vorwärmer wird der Kreisprozess mit dem Thermalwasser gekoppelt und das Medium bis zum Siedepunkt erwärmt (3→4). Im nächsten Schritt (4→5) wird das Medium vollständig verdampft. Im Gegensatz zum Wasserdampfprozess kann im Regelfall auf eine Überhitzung am Zustandspunkt 5 verzichtet werden. Nach dem Entspannungsvorgang wird wiederum die interne Wärmerückgewinnung im Rekuperator durchlaufen (6→7) und es schließt sich die vollständige Kondensation (7→1) an.

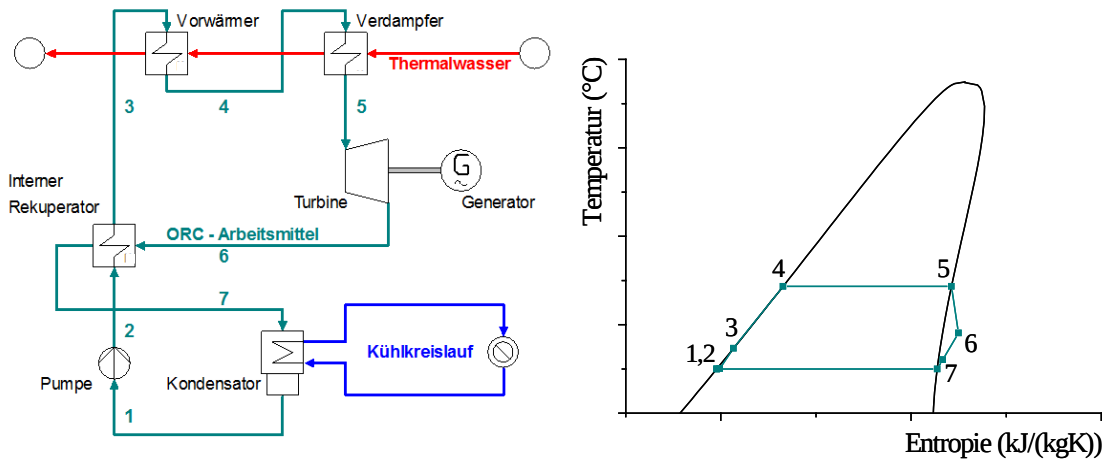


Abbildung 1: Anlagenskizze eines ORC-Kraftwerks und zugehöriges schematisches Temperatur-Entropie-Diagramm des Kreisprozesses

Im Hinblick auf eine optimale Prozessführung und effiziente Nutzung der geothermischen Ressource steht die Maximierung der erzeugten elektrischen Leistung im Vordergrund. Dies wird durch die bestmögliche Anpassung des Kraftwerksprozesses an die Temperaturprofile der Wärmequelle und -senke erreicht. Für die Bewertung der Ausnutzung der geothermischen Wärmequelle ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} einer Anlage kein ausreichendes Kriterium [3,4]. Dabei wird ausschließlich die Nettoleistung P_{Netto} dem zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{zu}$ gegenübergestellt.

$$\eta_{th} = \frac{|P_T + P_P|}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{netto}}{\dot{m}_{ORC}(h_5 - h_3)} \quad (1)$$

Hier steht P_T für die Leistung der Turbine und P_P für die Leistung der Speisepumpe. Die zugeführte Wärmemenge berechnet sich aus dem Produkt des ORC-Massenstroms $\dot{m}_{ORC}$ und der Differenz der Enthalpien h an den Zustandspunkten 5 und 3. Stattdessen sollten Kennzahlen wie der exergetische Wirkungsgrad η_{ex} gewählt werden, die die Nettoleistung in Relation zu einem thermischen Potential der Wärmequelle e_{TW} setzen.

$$\eta_{ex} = \frac{|P_T + P_P|}{\dot{E}_{TW}} = \frac{P_{netto}}{\dot{m}_{TW}e_{TW}} \quad (2)$$

Dabei wird zur Bestimmung des Potentials der geothermischen Ressource ein konstanter Bezugspunkt zur Berechnung des Exergiestroms $\dot{E}_{TW}$ des Thermalwassers definiert. In diesem Fall ist das die Abkühlung auf Umgebungsbedingungen. Somit eignet sich der exergetische Wirkungsgrad im Vergleich zum thermischen besser für einen Systemvergleich im Kontext eines Zielkonflikts zwischen Leistungsmaximierung und Emissionsminimierung.

2.2. Charakterisierung potentieller Arbeitsmedien

Zu ORC-Arbeitsmedien im Bereich der Niedertemperaturverstromung liegen umfangreiche Literaturquellen vor [5–9]. Zur Eingrenzung potentieller Arbeitsmedien wurden grundlegende thermodynamische Kriterien zur Vorauswahl erarbeitet. Beispielsweise geben Tchanche et al. [9] für Anwendungen des ORC mit Verdampfungstemperaturen zwischen 60 °C und 100 °C als Kriterium eine kritische Temperatur T_{krit} des Mediums über 75 °C vor.

Neben den thermodynamischen Stoffeigenschaften sind auch sicherheitstechnische, toxikologische und umweltrelevante Kriterien zu beachten. Die hierfür relevanten Kennwerte und Größen sind in **Tabelle 1** aufgelistet und werden im Folgenden erläutert:

Globales Treibhauspotential (engl.: Global Warming Potential (GWP))

Das globale Treibhauspotential eines Stoffes wird in Relation zu CO₂ bestimmt und daher auch als CO₂-Äquivalent angegeben. Die Auswirkungen des Stoffes auf den Treibhauseffekt werden über einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet.

Ozonabbaupotential (engl.: Ozon Depletion Potential (ODP))

Das Ozonabbaupotential ist eine Kennzahl, die die Auswirkungen eines Stoffes auf den Abbau der Ozonschicht in Relation zum Referenzstoff R11 (Trichlorfluormethan) wiedergibt. Stoffe mit einem ODP > 0 sind nach der Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 und der ChemOzonschichtV verboten.

Sicherheitsgruppe

Die Einstufung von Kältemitteln in Sicherheitsgruppen erfolgt in Deutschland mit der Klassifikation nach DIN EN 378-1 (Anhang E). Dabei wird die Toxizität des Stoffes mit A oder B bewertet. A steht für eine geringe und B für eine hohe Toxizität. Die Entflammbarkeit des Mediums wird mit einer nachgestellten Ziffer im Bereich von 1 bis 3 deklariert. Dabei steht 1 für keine Entflammbarkeit.

Entzündbarkeit

Die Entzündbarkeit von gasförmigen und flüssigen Stoffen wird aus dem Flammpunkt abgeleitet. Gekennzeichnet nach Richtlinie 67/548/EWG wird die Entzündbarkeit über die Gefahrensymbole R10 (entzündlich), F (leicht entzündlich) und F+ (hoch entzündlich). Zukünftig gilt die Einstufung nach der GHS Verordnung (EG) Nr. 1272/2008.

Selbstentzündungstemperatur

Die Selbstentzündungstemperatur $T_{Zünd}$ bezeichnet die Temperatur bei der sich ein Stoff in Gegenwart von Sauerstoff selbst entzündet, ohne dass eine externe Zündquelle vorhanden sein muss.

Wassergefährdungsklasse (WGK)

Die Wassergefährdungsklasse ist definiert durch die Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS). Dabei wird in 3 Klassen unterteilt:

- WGK 1 = schwach wassergefährdend
- WGK 2 = wassergefährdend

- WGK 3 = stark wassergefährdend

ATEL/ODL-Wert [kg/m³]

Der ATEL-Wert (acute toxicity exposure limit) gibt gemäß DIN EN 378-1 (Anhang E) einen Grenzwert an, um akute toxische Gefährdungen zu vermeiden.

Tabelle 1: Thermodynamische, sicherheitstechnische und umweltrelevante Daten möglicher ORC-Arbeitsmedien

Stoffname	Chemische Formel	Rxxx	T _{krit} (°C) [10]	p _{krit} (MPa) [10]	Sicherheitsgruppe	Brennbarkeit [13]	ODP	GWP (100 Jahre) [11,12]	T _{zünd} (°C) [13]	ATEL/ ODL (kg/m³)	WGK [13]
1,1,1,2-Tetrafluorethan	C ₂ H ₂ F ₄	R134a	101,1	4,06	A1	-	0	1300	k.A.	0,21	1
1,1-Difluorethan	C ₂ H ₄ F ₂	R152a	113,3	4,52	A2	F+	0	120	455	0,14	1
1,1,1,2,3,3,3-Heptafluorpropan	C ₃ HF ₇	R227ea	102,8	3	A1	-	0	3500	532	0,59	1
1,1,1,3,3,3-Hexafluorpropan	C ₃ H ₂ F ₆	R236fa	124,9	3,2	A1	k.A.	0	9400	k.A.	0,34	k.A.
1,1,1,2,2-Pentafluorpropan	C ₃ H ₃ F ₅	R245fa	154	3,65	B1	k.A.	0	950	k.A.	0,19	k.A.
Propan	C ₃ H ₈	R290	96,7	4,25	A3	F+	0	3,3	470	0,09	-
1,1,1,3,3-Pentafluorbutan	C ₄ F ₅ H ₅	R365mfc	190	2,75	k.A.	k.A.	0	890	532	k.A.	k.A.
n-Butan	C ₄ H ₁₀	R600	152	3,8	A3	F+	0	4	365	0,002	-
Isobutan	C ₄ H ₁₀	R600a	134,7	3,63	A3	F+	0	3	460	0,06	-
n-Pentan	C ₅ H ₁₂	R601	196,6	3,37	k.A.	F+	0	3	260	0,003	2
Isopentan	C ₅ H ₁₂	R601a	187,2	3,38	A3	F+	0	3	420	0,003	2

Detaillierte Analysen zeigen, dass die Identifikation eines in allen aufgeführten Kriterien optimalen ORC-Arbeitsmediums nicht möglich ist. Die endgültige Wahl des Arbeitsmediums stellt stets einen Kompromiss verschiedener wünschenswerter Eigenschaften dar. Zur Veranschaulichung gibt **Abbildung 2** die charakteristischen Eigenschaften in Abhängigkeit der in der Molekülverbindung auftretenden Wasserstoff, Fluor- und Chloratomen wieder [14].

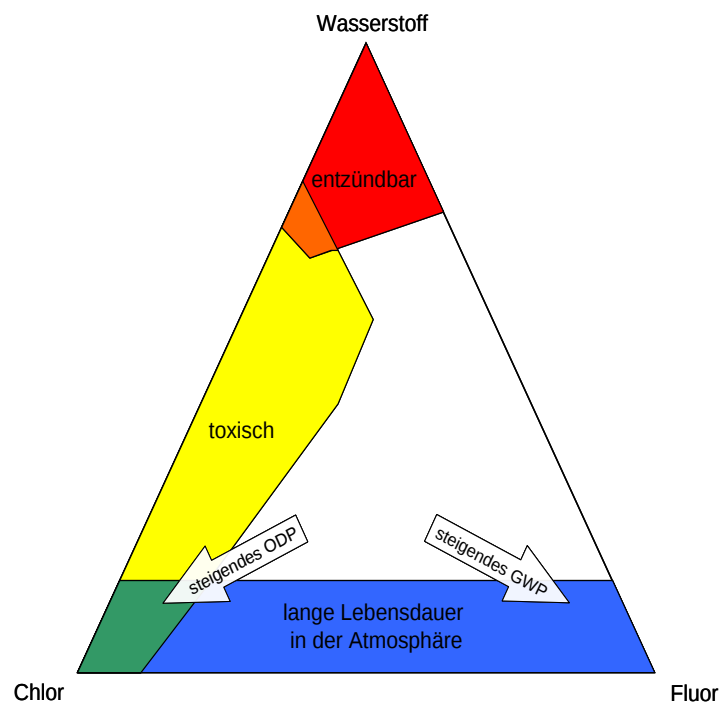


Abbildung 2: Sicherheitstechnische, toxische und umweltrelevante Eigenschaften potentieller ORC-Medien in Abhängigkeit von Wasserstoff, Fluor- und Chloratomen in der Molekülverbindung

Demnach weisen Kohlenwasserstoffe mit hohem Fluoranteil, wie R227ea (C_3HF_7), meist keine sicherheitstechnischen Risiken und geringe toxische Eigenschaften auf. Nachteilig ist jedoch der in der Regel hohe GWP-Wert dieser Fluide. Im Vergleich hierzu ist die Klimarelevanz des natürlichen Kohlenwasserstoffs Isobutan (C_4H_{10}) sehr gering, jedoch ist C_4H_{10} mit der Gefahrenkennzeichnung F+ als hochentzündlich eingestuft. Beim Einsatz solcher Medien in einer ORC-Anlage ist die Störfallverordnung zu beachten. Eine technische Maßnahme, die in diesem Zusammenhang ergriffen werden muss, ist die Installation von automatischen Brandmeldesystemen aus Gründen des vorbeugenden Brandschutzes. Des Weiteren sind für die Lagerung, Sicherheitstechnik und Prüfung der Anlage die Technischen Regeln für brennbare Flüssigkeiten (TRbF) zu beachten.

2.3. Stand der Technik

In Deutschland sind derzeit 5 Anlagen zur geothermischen Stromerzeugung in Betrieb. Des Weiteren befinden sich etwa 8 Projekte im Bau oder konkreten Planungsstatus. **Tabelle 2** liefert einen Überblick der realisierten Anlagen in Deutschland und Österreich und deren charakteristischen Kenngrößen, wie elektrische Leistung P_{el} und Thermalwassertemperatur T_{TW} . Des Weiteren sind die Kraftwerkstechnologie sowie das verwendete Arbeitsmedium aufgelistet.

Tabelle 2: Kraftwerke zur geothermischen Stromerzeugung im deutschsprachigen Raum

Standort	Inbetriebnahme	Prozess	Arbeitsmedium	P_{el} [MW]	T_{TW} [°C]
Neustadt-Glewe	2003	ORC	Perfluoropentan C_5F_{12}	0,23	100
Altheim (A)	2001	ORC	SES36	1	106
Landau (Pfalz)	2008	ORC	Isopentan	2,50	155
Unterhaching	2009	Kalina	NH_3/H_2O	3,40	122
Bruchsal	2009	Kalina	NH_3/H_2O	0,55	135
Simbach (D) / Braunau (A) ¹	2009	ORC	R134a	0,2	80

¹ Grenzüberschreitendes Projekt zur Fernwärmeversorgung und Stromerzeugung: ORC-Anlage in Simbach (D) und Fernwärmeversorgung von Simbach (Deutschland) und Braunau (Österreich)

Die aufgelisteten ORC-Kraftwerke sind einstufig ausgeführt und arbeiten im subkritischen Druckbereich ($p_{ORC} < p_{krit}$). Die Wahl der ORC-Arbeitsmedien in den aufgeführten Kraftwerken variiert deutlich. An Hand des breiten Spektrums der Thermalwassereintrittstemperatur lässt sich erkennen, dass für die Wahl des Mediums die Temperatur der Wärmequelle maßgeblich ist. Dieser Aspekt wird im folgenden Kapitel weiter vertieft. Im Hinblick auf die Kalina-Kraftwerke nimmt Deutschland mit zwei Anlagen eine Sonderrolle ein. Weltweit sind 236 binäre Kraftwerke zur geothermischen Stromerzeugung in Betrieb, darunter existieren derzeit lediglich drei Kalina-Kraftwerke [15].

2.4. Stand von Forschung und Entwicklung

In der Literatur sind zahlreiche Ansätze zur Optimierung des ORC zu finden. Ziel der verschiedenen Maßnahmen ist es, eine bessere Anpassung der Temperaturprofile von Wärmequelle oder -senke und ORC zu erreichen. In diesem Zusammenhang sind folgende Konzepte zu nennen:

- Auswahl eines geeigneten Arbeitsmediums
- Zweistufige Entspannung
- Überkritische Fahrweise
- Zeotrope Fluidgemische
- Hybride Verschaltungen und Kraft-Wärme-Kopplung

Generell stehen die in Kapitel 2.2 aufgeführten Fluide als Arbeitsmedien im ORC zur Verfügung. Unterschiede in der Effizienz ergeben sich durch die charakteristischen Stoffeigenschaften, zum Beispiel die kritische Temperatur. Exemplarisch zeigt **Abbildung 3** den exergetischen Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Thermalwassereintrittstemperatur für ausgewählte Arbeitsmedien.

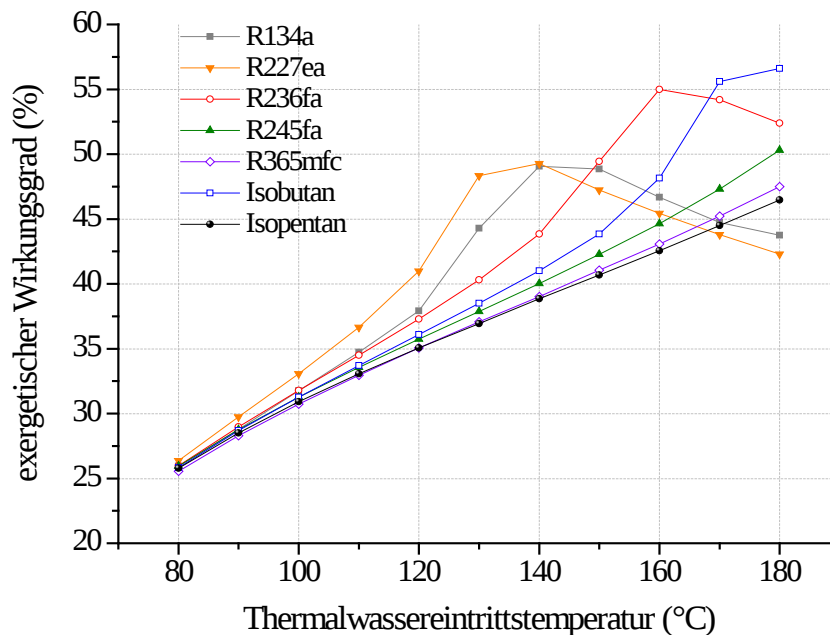


Abbildung 3: Exergetischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Thermalwassereintrittstemperatur

Die Grafik verdeutlicht, dass die Wahl von Arbeitsmedien zu signifikanten Effizienzunterschieden führt. In Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur weisen die dargestellten Arbeitsmedien relative Unterschiede im Wirkungsgrad von 3,2 % bis 33,8 % auf. So eignen sich teilfluorierte Kohlenwasserstoffe wie R227ea oder R134a für Temperaturen bis 140 °C. Im Fall höherer Temperaturen führen R227ea oder Isobutan zum höchsten Wirkungsgrad. Die Wahl effizienter Arbeitsmedien ist meist mit der Herabsetzung der Reinjektionstemperatur verbunden, was wegen der chemischen Zusammensetzung des Thermalwassers und der Gefahr von Scaling (Ablagerungen) in den Rohrleitungen und Wärmeübertragern nicht für alle Reservoirs generell möglich ist.

Die weiteren Optimierungsvarianten sollen hier kurz bezüglich deren Potential und Einsatz von Arbeitsmedien charakterisiert werden.

Ein zweistufiger ORC-Prozess besteht aus einer Niederdruck- und einer Hochdruckstufe. Dabei können zwei getrennte Module verwendet oder eine gemeinsame Ausführung mit Teilstromabspaltung realisiert werden. Stand der Technik stellen getrennte, mit gleichem Arbeitsmedium befüllte Module dar. In Deutschland befinden sich derzeit mehrere derartige Anlagen im Bau. Systeme mit unterschiedlichen Medien für Hoch- und Niederdruckstufe sind ebenfalls denkbar. Im Vergleich zu einer einstufigen Bauweise kann eine Wirkungsgradsteigerung um bis zu 15 % erreicht werden. Prinzipiell können für alle potentiellen Arbeitsmedien derartige Effizienzsteigerungen erreicht werden. Es gilt zu beachten, dass der apparative Mehraufwand die doppelte Ausführung von Pumpe, Wärmeübertrager und Turbine umfasst.

Im Fall der überkritischen Fahrweise liegt der Prozessdruck (p_{ORC}) über dem kritischen Druck (p_{krit}) des Mediums. Um einen derartigen Prozess zu realisieren, ist es nötig, dass die Thermalwassertemperatur eine ausreichende Differenz zur kritischen Temperatur des Arbeitsmediums

aufweist. Unter Berücksichtigung der erschließbaren Temperaturen in Deutschland kommen hierfür nur wenige Fluide in Frage. Von den natürlichen Kohlenwasserstoffen ist dies Propan und von den teilfluorierten Kohlenwasserstoffen zum Beispiel R134a oder R507a. Im Vergleich zum einstufigen Prozess mit Isopentan liegen die Wirkungsgradsteigerungen im Bereich von 15 % bis 25 %.

Der Ansatz, Fluidgemische in binären Kraftwerken zur geothermischen Stromerzeugung einzusetzen, wurde bereits Ende der 1970er und in den 1980er Jahren untersucht [16,17]. Aktuellere Arbeiten greifen die Idee eines ORC mit Fluidgemischen, ohne Fraktionierung vor der Entspannung, für geothermischen Anwendungen mit Thermalwassertemperaturen über 125 °C wieder auf [18–20]. Diese Studien belegen Steigerungen des elektrischen Wirkungsgrads in einer Größenordnung von 15 % im Vergleich zu ORC-Prozessen mit einkomponentigen Arbeitsfluiden. Als potentielle Gemischkomponenten kommen sowohl natürliche als auch fluoriierte Kohlenwasserstoffe in Betracht.

Eine zusätzliche Wärmeauskopplung zu Heizzwecken oder eine Kopplung der geothermischen Ressource mit einem alternativen, regenerativen Energieträger in so genannten Hybridkraftwerken kann zu signifikanten Verbesserungen der Wirtschaftlichkeit geothermischer Projekte führen. Dabei ist eine Senkung der Stromgestehungskosten um bis zu 25 % möglich [21–23].

Alternativ zum ORC können auch Technologien wie der Kalina Cycle, Sorptionsprozesse oder der überkritische CO₂-Prozess zur Stromerzeugung aus Niedertemperaturwärme genutzt werden. Die zwei zuletzt genannten Konzepte gehen derzeit in ihrem Entwicklungsstand nicht über die wissenschaftliche Forschung hinaus. Der Kalina Cycle ist bereits großtechnisch umgesetzt und eignet sich besonders für Thermalwassertemperaturen unter 130 °C. Dabei wird ein Ammoniak-Wasser-Gemisch mit zeotropen Eigenschaften als Arbeitsmedium eingesetzt. Im Gegensatz zum bereits erwähnten Optimierungsansatz des ORC wird das Gemisch nach der Wärmezufuhr in einen ammoniakreichen und ammoniakarmen Teilstrom separiert.

3. Verordnungen, Richtlinien und Normen beim Einsatz von halogenierten Stoffen

In Bezug auf die rechtlichen Regelungen ist bei halogenierten Stoffen zwischen Stoffen, die mehrere Halogene wie Fluor und Chlor enthalten und den nur fluorierten Stoffen zu unterscheiden. So regelt die Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 die Umsetzung des Montrealer Protokolls hinsichtlich des Verbots voll- und teilhalogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Danach ist der Einsatz von Stoffen, die zum Abbau der Ozonschicht führen, verboten. Es dürfen lediglich „aufgearbeitete teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe bis zum 31. Dezember 2014 für die Instandhaltung oder Wartung von bestehenden Kälte- und Klimaanlage sowie Wärmepumpen in Verkehr gebracht und verwendet werden, sofern der Behälter mit einer Kennzeichnung versehen ist, auf der angegeben ist, dass es sich um einen aufgearbeiteten Stoff handelt, und auf der ferner die Seriennummer sowie Name und Anschrift der Aufarbeitungseinrichtung anzugeben sind“ (nach Verordnung (EG) Nr. 1005/2009).

Demgegenüber sind voll- und teilfluorierte Kohlenwasserstoffe in stationären Anlagen der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 geregelt.

Nationale Berichtspflichten zum Einsatz von voll- und teilfluorierten Kohlenwasserstoffen ergeben sich aus dem Umweltstatistikgesetz (UStatG). Diese Berichtspflichten betreffen auch die ORC-Anlagen und umfassen u. a. die Verwendungsmengen dieser Stoffe. Diese Daten fließen in

die Emissionsberichtserstattung ein, die auf der Klimarahmenkonvention von 1992 basiert. Diese Berichtserstattung ist verpflichtend. Ein Verstoß kann langfristig ein Infringement (Klage)-Verfahren und sogar den Ausschluss von Staaten aus dem Emissionshandel nach sich ziehen. Im Bereich der Klima- und Kältetechnik erfolgt die Emissionsberechnung beispielsweise auf Basis von Modellen, in denen Füllmengen, typische Kältemittel sowie deren Verteilung, Anlagenlebensdauer und Emissionsraten hinterlegt sind. Zusätzlich überprüft werden diese Daten an Hand von Erhebungen zur Erstbefüllung, Instandhaltung (Nachfüllmenge) und Umrüstung im Rahmen des UStatG, das die Statistischen Landesämter mittels Fragebögen durchführen. Gegebenenfalls sind im Anwendungsfeld der geothermischen Stromerzeugung zukünftig zusätzliche Vereinbarungen mit den Betreibern oder dem Verband erforderlich.

Eine Berichtspflicht über bestimmte fluorierte Treibhausgase für den ORC existiert zudem durch die Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Die Erfassung und Zuordnung eingesetzter fluorierter Kohlenwasserstoffe erfolgt dabei über Hersteller, Importeure oder ggf. Exporteure.

Für bestimmte Anwendungen sieht die Verordnung (EG) Nr. 842/2006 Verwendungsverbote oder weitere Maßnahmen vor. ORC-Anlagen sind derzeit mit Ausnahme der Rückgewinnungspflicht durch angemessen ausgebildetes Personal nicht von diesen Maßnahmen erfasst. Auch in der nationalen Umsetzung, der Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV), sind für ORC-Anlagen keine weiteren Maßnahmen festgelegt.

Weitere Maßnahmen gibt es in der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 derzeit speziell für Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie für Wärmepumpen. Betreiber solcher Systeme sind zur Führung eines Logbuchs verpflichtet, in dem Menge und Typ des Kältemittels verzeichnet sind sowie nachgefüllte und zurück gewonnene Mengen dokumentiert werden. Für Anlagen mit einer Füllmenge über 300 kg fluorierter Kohlenwasserstoffe sind vierteljährliche Dichtheitskontrollen vorgeschrieben. Des Weiteren sind Betreiber solcher Anlagen zur Installation eines automatischen Leckage-Erkennungssystems verpflichtet, welches wiederum alle 12 Monate auf Funktionstüchtigkeit geprüft werden muss. Die vorgeschriebenen Aufzeichnungen und möglichen Messmethoden zur Dichtheitsüberwachung sind in der Verordnung (EG) Nr. 1516/2007 vom 19. Dezember 2007 festgelegt.

4. Treibhausgasemissionen durch fluorierte Arbeitsmedien – Szenarien für die geothermische Stromerzeugung in Deutschland

Für die Emissionsraten durch Leckagen für ORC-Kraftwerke sind keine Messdaten zugänglich. Zugesicherte jährliche Emissionsraten durch Hersteller und Erfahrungen der Betreiber liegen bei unter 2 % der Füllmenge. Für Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie Wärmepumpen mit einer Füllmenge über 100 kg gilt nach der ChemKlimaschutzV eine maximale Emissionsrate von 1 %. Bei Industriekälteanlagen geht man von Leckagewerten von bis zu 7 % aus. Unter Berücksichtigung dieser Werte wird für die folgenden Betrachtungen die jährliche Emissionsrate in einem Bereich von 1 % bis 6 % variiert. Emissionen bei der Befüllung der Anlagen, bei Wartungsarbeiten sowie bei der Entsorgung bleiben in den Betrachtungen unberücksichtigt, da keine Erfahrungswerte vorliegen. Dies ist bei der Interpretation der Berechnungen zu berücksichtigen.

Die Anzahl der Kraftwerke wird, ausgehend von 12 Kraftwerken, die sich derzeit in Betrieb, im Bau oder konkreter Planung befinden, erhöht. Die Ausbaustufen orientieren sich an einer gemeinsamen Studie des DLR, IWES und IFNE [24]. Die maximale Ausbaustufe von 2120 Kraft-

werken ergibt sich durch das technisch-ökologisch nutzbare Potential der geothermischen Stromerzeugung [25]. Dabei liegt den Überlegungen ein Referenzkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 4 MW und jährlich 7884 Betriebsstunden zu Grunde. Eine Übersicht über die Ausbaustufen, die installierten geothermischen Leistung und die Anzahl der Kraftwerke liefert **Tabelle 3**.

Tabelle 3: Ausbaustufen der geothermischen Stromerzeugung basierend auf Studien

Ausbaustufe	Betrieb/ Bau/Planung	2020	2030	2050	Potential
Installierte Leistung in MW	ca. 48	216	837	3057	8500
Anzahl der Kraftwerke	12	54	209	764	2120

Die jährlichen Emissionen EM der Referenzkraftwerke werden mit dem Ansatz

$$EM = AR \cdot EF$$

berechnet, wobei die Aktivitätsrate AR in diesem Fall mit der Füllmenge gleichzusetzen ist. Der Emissionsfaktor EF basiert gewöhnlich auf internationalen Vorgaben, Messungen oder Expertenschätzung. Für die Emissionsberechnungen beträgt die Füllmenge eines Referenzkraftwerks im Süddeutschen Molassebecken 50 t im Fall des Arbeitsmediums R245fa und 45 t im Fall eines natürlichen Kohlenwasserstoffs. Für die Häufigkeit der Arbeitsmedien in den geothermischen Kraftwerken werden vier Szenarien definiert:

- **Szenario I:**
50 % der Anlagen werden mit dem teilfluorierten Kohlenwasserstoff R245fa (GWP = 950) und 50 % der Anlagen mit einem (nichthalogenierte) Kohlenwasserstoff (GWP = 3) betrieben.
- **Szenario II:**
Alle Anlagen werden mit dem teilfluorierten Kohlenwasserstoff R245fa betrieben.
- **Szenario III:**
50 % der Anlagen werden mit dem teilfluorierten Kohlenwasserstoff R245fa und 50 % der Anlagen mit einem (nichthalogenierte) Kohlenwasserstoff betrieben. Ab 2020 werden nur noch teilfluorierte Kohlenwasserstoffe mit einem GWP < 100 eingesetzt.
- **Szenario IV:**
60 % der Anlagen werden mit den teilfluorierten Kohlenwasserstoffen R227ea (5 %), R134a (15 %), R365mfc (10 %) und R245fa (30 %) und 40 % der Anlagen werden mit einem (nichthalogenierte) Kohlenwasserstoff betrieben.

Der Einfluss der Emissionsrate auf die jährlichen Emissionen soll an Hand des Szenarios I aufgezeigt werden. In **Abbildung 4** sind die CO₂-Äquivalente für die betrachteten Ausbaustufen dargestellt.

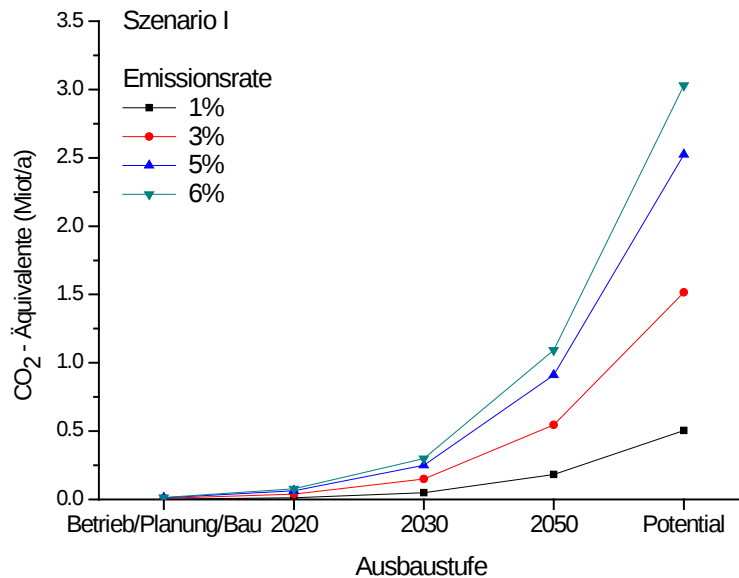


Abbildung 4: Jährliche Emissionen für Szenario I in Abhängigkeit der Emissionsrate und Ausbaustufe der geothermischen Stromerzeugung

Die Emissionen aus ORC-Anlagen durch den Einsatz von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen sind bis zum Jahr 2030 als gering zu werten. Für Szenario I liegen die Emissionen zu diesem Zeitpunkt bei maximal 0,3 Mio. t/a CO₂-Äquivalenten. Zum Vergleich lagen die Treibhausgasemissionen durch F-Gase im Jahr 2009 bei 15,6 Mio. t CO₂-Äquivalenten. Im Fall einer maximalen Ausbaustufe von 2120 Kraftwerken betragen die Emissionen 0,5 Mio. t/a bis 3 Mio. t/a CO₂-Äquivalente. Die Emissionen beim Einsatz von Isopentan, die im Falle einer Emissionsberichterstattung nicht berichtspflichtig sind, haben einen untergeordneten Einfluss. Der Anteil an den Gesamtemissionen im Szenario I beträgt lediglich 0,28 %.

Einen Vergleich der Szenarien bei einer Emissionsrate von 3 % liefert **Abbildung 5**. Auf Grund des Einsatzes von Arbeitsmedien mit niedrigem GWP ab 2020 sind die Emissionen für Szenario III am geringsten. Durch den ausschließlichen Einsatz von R245fa führt Szenario II zu den höchsten Emissionen. Für die maximale Ausbaustufe liegen die Emissionen der vier Szenarien in einem Bereich von 0,24 Mio. t/a bis 3,02 Mio. t/a CO₂-Äquivalente. Im Fall einer Emissionsrate von 6 % steigen die Werte auf 0,48 Mio. t/a bis 6,04 Mio. t/a CO₂-Äquivalente an. Szenario IV ist ein plausibles Ausbauszenario im Hinblick auf die ausgewählten Arbeitsmedien und deren Einsatz in Abhängigkeit der Thermalwassertemperatur. Für Emissionsraten von 3 % betragen die Emissionen maximal 2,4 Mio. t/a. Eine Erweiterung dieses Szenarios um den Kalina Cycle – mit einem Anteil von 15 % an den geothermischen Kraftwerken – führt zu einer Reduktion der Emissionen auf 1,9 Mio. t/a CO₂-Äquivalente. Dabei wird angenommen, dass der Kalina Cycle vorwiegend im Temperaturbereich 100 °C bis 130 °C eingesetzt wird und somit ORC-Kraftwerke mit den Arbeitsmedien R134a, Isobutan und R227ea substituiert.

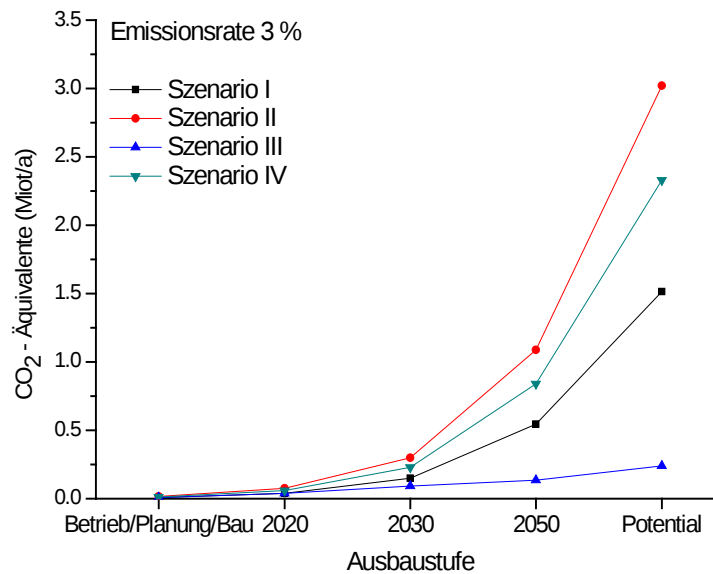


Abbildung 5: Jährliche Emissionen für die Szenarien I bis IV bei einer Emissionsrate von 3 %

Um die Emissionen bei Freisetzung fluoriertener Kohlenwasserstoffe durch Leckagen besser einordnen zu können, wird ein Vergleich mit den Emissionen aus der Vorkette eines geothermischen Kraftwerks, einem GuD-Kraftwerk und dem deutschen Strommix angestellt. Nach Frick et al. [26] ergeben sich für ein binäres Kraftwerk im Süddeutschen Molassebecken Emissionen von 53 g/kWh bei Berücksichtigung der Umweltauswirkungen durch den untertägigen und obertägigen Bau sowie den Betrieb des Kraftwerks. Für eine weiterfassende Bewertung müssen beim Einsatz eines teilfluorierten Arbeitsmediums die entsprechenden Emissionen durch Leckagen aufaddiert werden. **Abbildung 6** zeigt dies am Beispiel von R245fa und einer Emissionsrate von 3 %.

In Relation zum deutschen Strommix sind die Emissionen für ein Referenzkraftwerk mit R245fa im Süddeutschen Molassebecken sechsmal geringer. Die Bedeutung der zusätzlichen Emissionen durch Leckage erkennt man in Relation zu einer Bilanzierung der gesamten Vorkette des geothermischen Kraftwerks. Dabei nehmen die Emissionen durch Leckage im dargestellten Fall einen Anteil von 46 % der Gesamtemissionen ein.

Abschließend werden die Wirkungsgradsteigerungen angegeben, die notwendig sind, um zusätzliche Emissionen durch Leckagen beim Einsatz von R245fa zu kompensieren. Als Referenz wird ein Kraftwerk mit dem Arbeitsmedium Isopentan gegenübergestellt. Es wird angenommen, dass die Differenz in der erzeugten Strommenge über den deutschen Strommix gedeckt wird. Für eine Emissionsrate von 3 % ist eine relative Wirkungsgradsteigerung von rund 8,5 % notwendig, um die Emissionen durch Leckage zu kompensieren. Nach Kap. 2.4 können derartige Effizienzsteigerungen im Vergleich zum Referenzkraftwerk durch Optimierungsansätze, wie die zweistufige Entspannung oder die überkritische Fahrweise, übertroffen werden.

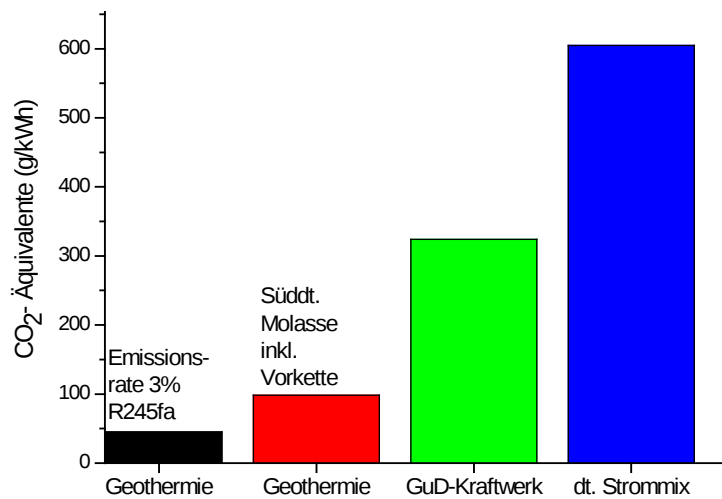


Abbildung 6: Emissionen der geothermischen Stromerzeugung bei 3 % Emissionsrate ohne/mit Berücksichtigung der Vorkette im Vergleich zu einem GuD-Kraftwerk und dem dt. Strommix

Wenn man die Treibhausgasemissionen auf Basis von den GWP-Werten des 4th Assessment Reports (IPCC) berechnet, dessen Verwendung erst ab 2013 in Kraft treten soll, liegen die Emissionen um 2,7 % (Szenario III) bis 8,4 % (Szenario II) höher.

5. Maßnahmen zum umweltverträglichen Ausbau der geothermischen Stromerzeugung mit effizienten Kraftwerkstechnologien

Ein wichtiger Aspekt zum umweltverträglichen Ausbau der geothermischen Stromerzeugung ist die Diskussion des aufgezeigten Zielkonflikts zwischen Effizienzsteigerung und zusätzlichen Emissionen durch den Einsatz teilfluorierter Kohlenwasserstoffe in geothermischen ORC-Anlagen. Um eine verlässliche Datenlage hinsichtlich der Emissionsraten von ORC-Anlagen zu erhalten, sollte neben detaillierten Emissionsszenarien das Monitoring von entsprechenden Anlagen im Fokus stehen.

Zur Vermeidung von Emissionen durch technische Alternativen sei neben den bereits angesprochenen Optimierungsstrategien sowohl der Einsatz alternativer Technologien als auch die Entwicklung von Kältemitteln mit geringem GWP erwähnt. Im Vordergrund stehen hierbei teilfluorierte Alkene (früher auch als Olefine bezeichnet). Diese Stoffe besitzen eine kurze atmosphärische Lebenszeit und damit verbunden ein GWP unter 100. Im Hinblick auf Entflammbarkeit sind einige Stoffe dieser Gruppe als hochentzündlich einzustufen, ihre Toxizität ist nicht abschließend untersucht. Eine Markteinführung ist nicht vor 2016 zu erwarten, wobei das Preisniveau auf Grund einer höheren Komplexität der Moleküle und den erforderlichen Aufbau von Produktionskapazitäten zunächst deutlich höher im Vergleich zu bisher eingesetzten Medien liegen wird.

Ein weiterer wichtiger Schritt zu effizienten Kraftwerkstechnologien ist die praktische Umsetzung der Erkenntnisse aus theoretischen Untersuchungen oder Anlagen im Labormaßstab. Die-

ser Aspekt ist von großer Bedeutung, damit geothermische Stromerzeugungsanlagen eine Lernkurve beschreiten. Die Erfahrungen aller anderen erneuerbaren Energien zeigen, dass eine derartige Lernkurve zu effizienteren sowie nachhaltigeren Anlagenkonzepten und zur signifikanten Senkung der Investitionskosten führt.

6. Effektivität und Umweltverträglichkeit in geothermischen Niedertemperatur-Kreisprozessen – Ergebnisse eines Workshops mit Stakeholdern

Im Folgenden sind Inhalte der Vorträge des Workshops „Effektivität und Umweltverträglichkeit in geothermischen Niedertemperatur-Kreisprozessen“ beim Geothermiekongress 2011 in Bochum dargestellt. Aspekte der Vortragenden und der Diskussionsrunden, die bisher nicht aufgegriffen wurden, werden an dieser Stelle zusammengefasst. K. Becken (Umweltbundesamt, Fachgebiet III 1.4 - Stoffbezogene Produktfragen) wies in Ihrem Vortrag darauf hin, dass die geothermische Stromerzeugung sowohl für die Emissionsberichterstattung als auch für Verordnungen im Zusammenhang mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bisher als Anwendungsfall nicht gegeben bzw. relevant war. Jedoch zeigen Überlegungen der EU-Kommission (COM11) aus dem Jahr 2011 eine Änderung der Zielsetzung von 2006 bezüglich Treibhausgasemissionen. Wurde ursprünglich eine Stabilisierung der Emissionen gefordert, ist nun eine Senkung die klare Zielsetzung. In diesem Zusammenhang sind auch die Aussagen in einer Studie im Auftrag der Europäischen Kommission zur Evaluierung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 durch die Kommission zu sehen, in denen eine Überprüfung hinsichtlich der Erfassung des ORC explizit erwähnt wird. Vor dem Hintergrund eines weltweit prognostizierten Emissionsanstiegs sind Vorstöße nordamerikanischer Staaten zur Einbindung von F-Gasen in das Montrealer Protokoll in Form eines schrittweisen Herabsetzens der verfügbaren Mengen dieser Stoffe einzuordnen.

D. Kuntze (Umweltbundesamt, Fachgebiet I 2.6 - Emissionssituation) stellte in seinem Vortrag heraus, dass geothermische Anlagen mit teilfluorierten Kohlenwasserstoffen berichtspflichtig sind. Diese Pflicht besteht bereits ab der ersten installierten Anlage. Hierfür sind Vereinbarungen mit den Betreibern oder mit dem Verband zu treffen. In Bezug auf die Betriebsdaten wird Geheimhaltung gewahrt.

C. Scholz (IGATEC GmbH) erläuterte in seiner Präsentation die Definition des Begriffs Dichtheit am Beispiel einer ORC-Anlage. Dabei kann erst bei einer dauerhaft technisch dichten Verbindung nach TRBS 2152 davon ausgegangen werden, dass es zu keiner Freisetzung des Arbeitsmediums kommt. Zur Überwachung der Dichtheit sollten kontinuierliche, selbsttätige Gassensoren mit Warnfunktion eingesetzt werden. Zur Einschätzung von Emissionsraten im realen Betrieb konnte C. Scholz Erfahrungswerte aus dem ORC-Kraftwerk Landau (Pfalz) nennen. Demnach liegt der Arbeitsmittelverlust über einen Zeitraum von 2007 bis 2010 unter 5 % der Füllmenge. Das entspricht einer jährlichen Emissionsrate von unter 1,5 %. Als potentielle Leckagestellen sind Wellendurchführungen (Speisepumpe und Turbine), nicht vermeidbare Flanschverbindungen mit Dichtungen und Sicherheitsarmaturen zu nennen. Für eine geringe Emissionsrate über die gesamte Laufzeit des Kraftwerks sind zudem Wartung und Instandhaltung von großer Bedeutung und liegen im Aufgabenbereich des Betreibers.

N. Frank (Stadtwerke München) schilderte in einer kurzen Stellungnahme die Entscheidungskriterien für die Wahl des zweistufigen ORC-Prozesses mit dem Arbeitsmedium R245fa für das geothermische Kraftwerk in Sauerlach. Dabei wurde die Technologie maßgeblich unter wirt-

schaftlichen Kriterien ausgewählt. Ein Vergleich mit Alternativangeboten, darunter auch einstufige ORC-Anlagen mit natürlichen Kohlenwasserstoffen, zeigte, dass die mit dem Kraftwerk verbundenen Effizienzsteigerungen die zusätzlichen Emissionen kompensieren. Die garantierte Emissionsrate des Herstellers liegt unter 1 %.

A. Utz (geco GmbH) stellte abschließend Optimierungsansätze unter wirtschaftlichen Kriterien zusammen. So kann eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der geothermischen Stromerzeugung nur durch eine Senkung der Bohrkosten, und Kraftwerkskosten sowie durch Effizienzsteigerungen erreicht werden. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten wurden über die Laufzeit als konstant angenommen. Dies ist im Hinblick auf verpflichtende Dichtigkeitsprüfungen im Fall einer Aufnahme des ORC in Verordnung (EG) Nr. 842/2006 und die ChemKlimaschutzV beim Einsatz von fluorierten Kohlenwasserstoffen zu hinterfragen.

Auf die Frage bezüglich des Verbots von fluorierten Kohlenwasserstoffen betonte K. Becken, dass eine Gegenrechnung mit dem deutschen Strommix oder die Relation der Emissionen im Gesamtkontext der deutschen F-Gas-Emissionen nicht ausschlaggebend für eine Entscheidung der Kommission oder anderer internationaler Gremien ist. Relevant ist die Frage, ob es technische Alternativen gibt, wobei signifikante Effizienzeinbußen durch ein Verbot vermieden werden sollten bzw. bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden würden.

Die Diskussionsrunden mit allen genannten Referenten, F. Heberle (LTTT/Universität Bayreuth), S. Frick (GeoForschungsZentrum Potsdam) und S. Janczik (IUE/TU Hamburg-Harburg) warfen zusätzlich folgende Aspekte und Fragestellungen auf:

- Eine Umrüstung einer bestehenden Anlage auf ein anderes Medium, speziell einer unterschiedlichen Stoffklasse, ist aufgrund der verschiedenen Sicherheitsauflagen, Materialanforderungen und einer spezifischen Komponentenauslegung nicht möglich.
- Die Gefahr eines Eintrags von ORC-Arbeitsmedien in das Thermalwasser wird als gering eingeschätzt, da in der Regel der Thermalwasserdruck über dem ORC-Prozessdruck liegt.
- Auch im Bereich der Entsorgung des Arbeitsmediums ist die Aufzeichnung durch den Betreiber wichtig. Denn falls kein gegenteiliger Nachweis erfolgt, würde bei der Emissionsberichterstattung sonst auf einen Erfahrungswert aus ähnlichen Anwendungen zurückgegriffen werden. So wird bei der Entsorgung aus dem Bereich Kälte- und Klimatechnik ein Emissionsfaktor in Höhe von meist 30 % der Emissionsrate zurückgegriffen. Jedoch ist im Bereich der Geothermie von einer vorschriftsmäßigen Entsorgung auszugehen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] R. DiPippo, Geothermal Power Plants, Elsevier Science, Oxford, 2005.
- [2] U. Desideri, G. Bidini, Study of possible optimisation criteria for geothermal power plants, Energy Conversion and Management Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems. 38 (1997) 1681-1691.
- [3] S. Köhler, Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse, Dissertation, Berlin, 2005.
- [4] U. Drescher, Optimierungspotential des Organic Rankine Cycle für biomassebefeuerte und geothermische Wärmequellen, Dissertation, Bayreuth, 2008.
- [5] B. Saleh, G. Koglbauer, M. Wendland, J. Fischer, Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, Energy. 32 (2007) 1210-1221.
- [6] F. Heberle, D. Brüggemann, Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation, Applied Thermal Engineering. 30 (2010) 1326-1332.
- [7] T.C. Hung, T.Y. Shai, S.K. Wang, A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat, Energy. 22 (1997) 661-667.
- [8] H.D. Madhawa Hettiarachchi, M. Golubovic, W.M. Worek, Y. Ikegami, Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources, Energy. 32 (2007) 1698-1706.
- [9] B.F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle, Applied Thermal Engineering. 29 (2009) 2468-2476.
- [10] Lemmon, E.W., M.L. Huber, M.O. McLinden, NIST Standard Reference Database 23 – Version 8.0. Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado, US Department of Commerce, USA, 2002.
- [11] IPCC, First Assessment Report, 1990.
- [12] IPCC, Third Assessment Report: Climate Change, 2001.
- [13] IFA Institut für Arbeitsschutz, Gefahrstoffe: GESTIS-Stoffdatenbank.
- [14] M.O. McLinden, D.A. Didion, CFCs: Quest for alternatives, Ashrae J. 29 (1987) 32-42.
- [15] R. Bertani, Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report, in: Proceedings of geothermal world Congress, Bali, 2010.
- [16] C.J. Bliem, Preliminary performance estimates of binary geothermal using mixed-halocarbon working fluids, Idaho Falls (USA), 1986.
- [17] O.J. Demuth, Analysis of binary thermodynamic cycles for a moderately low-temperature geothermal resource, Idaho Falls (USA), 1979.
- [18] G. Angelino, P. Colonna di Paliano, Air cooled siloxane bottoming cycle for molten carbonate fuel cells, in: 2000 Fuel Cell Seminar, Portland (USA), 2000.

- [19] F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann, Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources, *Renewable Energy*. 37 (2012) 364-370.
- [20] X.D. Wang, L. Zhao, Analysis of zeotropic mixtures used in low-temperature solar Rankine cycles for power generation, *Solar Energy*. 83 (2009) 605-613.
- [21] F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann, Thermoeconomic evaluation of combined heat and power generation for geothermal applications, in: *Proceedings of World Renewable Energy Congress 2011*, Linköping, Sweden, 2011.
- [22] F. Heberle, A. Hartmann, D. Brüggemann, Geothermie-BHKW-Hybridkraftwerk zur Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des Organic Rankine Cycle, in: *Geothermiekongress*, Bochum, 2011.
- [23] S. Janczik, N. Kock, M. Kaltschmitt, Effizienzsteigerung geothermischer KWK-Anlagen, *Energy 2.0-Kompodium 2011*. (2011) 187-190.
- [24] DLR, IWES, IFNE, Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“, 2010.
- [25] T. Klaus, C. Vollmer, K. Werner, H. Lehmann, K. Müschen, *Energieziel 2050: 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen*, Umweltbundesamt, 2010.
- [26] S. Frick, M. Kaltschmitt, G. Schröder, Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs, *Energy*. 35 (2010) 2281-2294.
- [27] H. Paschen, D. Oertel, R. Grünwald, *Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland*, 2003.