CLIMATE CHANGE
06/2017

Ökologische Analyse und Bewertung der Umwelteffekte effizienzsteigernder Maßnahmen von ORC-Geothermieanlagen

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 06/2017

Projektnummer 29089
UBA-FB 002462

Ökologische Analyse und Bewertung der Umwelteffekte effizienzsteigernder Maßnahmen von ORC-Geothermieanlagen

von

Dr.-Ing. Sebastian Janczik, Prof. Dr. Martin Kaltschmitt
Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft
Technische Universität Hamburg Harburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
TuTech Innovation GmbH
Harburger Schloßstraße 6 – 12
21079 Hamburg

Abschlussdatum:
Juli 2015

Redaktion:
Fachgebiet I 2.3 Erneuerbare Energien
Dr.-Ing. Andreas Bertram

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Februar 2017

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

ORC (Organic-Rankine-Kreisläufe) dienen der Gewinnung elektrischer Energie (Strom) aus Niedertemperaturwärme. Im Fokus dieser Arbeit stehen ORC-Anlagen, die als Teil geothermischer Anlagen elektrische Energie erzeugen. Ziel dieser Arbeit ist es, die Umwelteffekte durch effizienzsteigernde Maßnahmen an ORC-Anlagen anhand einer datengestützten Bilanzierung zu bewerten. Hierzu wurden, ausgehend von einer Umfrage bei Betreibern, repräsentative geothermische Anlagengrundtypen sowohl mit als auch ohne umgesetzte Maßnahmen zur Effizienzsteigerung abgeleitet und klassifiziert. Diese Anlagengrundtypen wurden in Modellanlagen überführt und mit einer Fließschema-Simulationssoftware modelliert. Für die Bewertung der mit diesen geothermischen Modellanlagen verbundenen Umweltwirkungen wurden ökobilanzielle Betrachtungen durchgeführt. Abschließend wurden ausgewählte rechtliche und wirtschaftliche Aspekte für den Einsatz von Arbeitsmitteln dargestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass bei den untersuchten Modellanlagen und unterstellten Randbedingungen der Einsatz von verbesserten Kraftwerkskonzepten (zweistufige ORC-Anlagen) und eine Verwendung von Kohlenwasserstoffen, wie z. B. Isobutan oder Isopentan, als Arbeitsmittel in ORC-Anlagen die treibhausgasbedingten spezifischen Emissionen vermindern. Bei allen brennbaren Arbeitsmitteln sind zusätzlich Maßnahmen zur Beherrschung der Brand- und Explosionsrisiken zu treffen. Bei Verwendung wassergefährdender Stoffe sind zudem Gewässerschutzmaßnahmen einzuplanen.

Abstract

ORC (Organic Rankine Cycles) serve for power generation from low temperature heat. This work focuses on ORC plants generating power from geothermal resources. The aim of this report is to carry out an analysis of the geothermal ORC power plants impact on the environment for different concepts to enhance efficiency. Based on interviews of plant operators representative geothermal plant types were identified and classified in types with as well as without efficiency enhancement. These basic plant types were transformed in virtual plant models which were modelled with a Flowsheet Simulation Software. For the virtual plant models an approach based on principles of Life Cycle Assessment was used to estimate their impacts on environment. Finally specific legal and economic aspects for the use of working fluids were discussed.

The results show, that an application of efficiency-enhancing concepts (double stage ORC) and utilisation of hydrocarbons (e. g. Isobutane, Isopentane) as working fluids in an ORC leads to lower greenhouse gas emissions. For flammable working fluids, on the other hand, additional measures to control fire and explosion risks are necessary. If substances hazardous to water are used water protection precautions are to be taken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 7
Tabellenverzeichnis 9
Abkürzungsverzeichnis 11
Zusammenfassung 12
1 Einleitung 14
1.1 Hintergrund und Zielstellung 14
1.2 Vorgehen 14
1.3 Bisherige Untersuchungen 15
2 Tiefe Geothermie in Deutschland 17
2.1 Anlagenkonzepte 17
2.2 Erschließung des tiefen Untergrundes 18
2.3 Obertägige Geothermieanlagen 21
2.3.1 Thermalwasserkreislauf 21
2.3.2 Kraftwerk 22
2.3.2.1 Kraftwerksprozess 23
2.3.2.2 Komponenten des Kraftwerksprozesses 27
2.3.3 Zusätzliche Aggregate für Heizwerke 29
2.4 Stand der Nutzung von Geothermieanlagen 30
3 Technische Analyse 31
3.1 Datenerhebung 31
3.1.1 Anlagen ohne umgesetzte Effizienzsteigerungsmaßnahmen 31
3.1.2 Anlagen mit umgesetzten Effizienzsteigerungsmaßnahmen 32
3.1.2.1 Zweistufige ORC-Kraftwerke 33
3.1.2.2 Kraftwerke mit Stoffgemischen 33
3.1.2.3 Kraftwerke mit sonstigen Effizienzsteigerungsmaßnahmen 34
3.2 Ableitung der Anlagengrundtypen 34
3.2.1 Vorgehen 34
3.2.2 Ergebnisse 36
3.3 Simulation der Modellanlagen 37
3.3.1 Vorgehen 38
3.3.2 Ergebnisse 39
3.3.2.1 Temperaturvergleich 39
3.3.2.2 Modellanlagen 43

4 Ökologische Analyse 45
4.1 Vorgehen und Rahmenannahmen 45
4.2 Ergebnisse 48
4.2.1 Obertageanlage 49
4.2.2 Gesamtanlage 51
4.3 Parametervariation 54
5 Rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Arbeitsmittelverwendung 55
5.1 Produktsicherheit 56
5.1.1 Maschinenverordnung 56
5.1.2 Druckgeräteverordnung 57
5.1.3 Explosionsschutzverordnung 57
5.2 Betriebssicherheitsverordnung 58
5.3 Gefahrstoffverordnung 61
5.4 Gewässerschutz 63
5.5 Störfall-Verordnung 64
5.6 Klimaschutz 65
5.7 Kosten und Verfügbarkeit 66
5.8 Zusammenfassung 66
6 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen 68
7 Literatur 69
8 Anhang 72
Anhang A – Technische Analyse 72
Anhang B – Ökologische Analyse 77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte. 15
Abbildung 2: Konzept einer kombinierten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung [3]. 17
Abbildung 3: Aufbau Rotary Bohranlage [3]. 18
Abbildung 4: Spülungskreislauf [3]. 19
Abbildung 5: Beispielhaftes Verrohrungsschema [3]. 20
Abbildung 6: Prinzip eines Thermalwasserkreislaufes [3]. 21
Abbildung 7: Vereinfachtes Schema eines ORC (Organic Rankine Cycle). 23
Abbildung 8: Idealer Dreiecksprozess [8]. 24
Abbildung 9: Vereinfachtes Schaltschema eines zweistufigen ORC mit Teilstromabführung (ohne Rekuperator). 25
Abbildung 10: Vereinfachtes Schaltschema eines überkritischen ORC. 25
Abbildung 11: Vereinfachtes Schema eines Kalina-Prozesses [3]. 27
Abbildung 12: Prinzip des Nass- (links) und Trockenkühlturmes (rechts) [3]. 28
Abbildung 13: Bereitgestellter Strom aus tiefer Geothermie [9], [10], [11], [12] und [13]. 30
Abbildung 14: Energetische (oben) und exergetische (unten) Kraftwerkswirkungsgrade für ein ORC-Standardkonzept. 40
Abbildung 15: Auf den exergetischen Wirkungsgrad eines unterkritischen einstufigen ORC-Konzeptes mit Isopentan normierte exergetische Wirkungsgrade verschiedener Arbeitsmittel für ein einstufiges ORC-Konzept. 41
Abbildung 16: Energetische (oben) und exergetische (unten) Kraftwerkswirkungsgrade für ein zweistufiges ORC-Konzept. 42
Abbildung 17: Auf den exergetischen Wirkungsgrad eines unterkritischen einstufigen ORC-Konzeptes mit Isopentan normierte exergetische Wirkungsgrade verschiedener Arbeitsmittel für ein zweistufiges ORC-Konzept. 43
Abbildung 18: Installierte elektrische Leistungen der simulierten Modellanlagen. 44
Abbildung 19: Anlagenwirkungsgrade und Gütegrade der simulierten Modellanlagen. 44
Abbildung 20: Methodische Vorgehensweise bei der ökobilanziellen Betrachtung. 45
Abbildung 21: Schematische Darstellung einer Prozesskettenanalyse am Beispiel eines geothermischen Heizkraftwerkes [26]. 47

Abbildung 22: Strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen der simulierten Modellanlagen (Obertageanlage) bei einer Nettostrombetrachtung. 50

Abbildung 23: Strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen der simulierten Modellanlagen (Gesamtanlage) bei einer Nettostrombetrachtung. 52

Abbildung 24: Parametervariation für die CO_2-Äquivalentemissionen am Beispiel der Modellanlage Typ 2 (Zweistufiger ORC mit R245fa, Gesamtanlage) 54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der in der Datenerhebung berücksichtigten Geothermieanlagen 33

Tabelle 2: Abgeleitete Anlagengrundtypen aus der Datenerhebung 37

Tabelle 3: Validierung des Simulationsprogrammes mit der Zustandsgleichung Peng-Robinson mit der Erweiterung von Bosten-Mathias (PR-BM) mit realen Kraftwerksdaten (ORC-Kraftwerk Chena, USA) [15] 38

Tabelle 4: Bilanzierte Umweltwirkungen [1] 48

Tabelle 5: Strominduzierte Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung für die Obertageanlage bestehend aus Thermalwasserkreislauf mit Tiefpumpe und Kraftwerk, jeweils für Nettostromeinspeisung (Netto) und Bruttostromeinspeisung (Brutto) 49

Tabelle 6: Strominduzierte Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung für die Gesamtanlage (Erschließung und Rückbau des tiefen Untergrundes und Obertageanlage) 52

Tabelle 7: Wärmeinduzierte Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung für die Gesamtanlage (Erschließung des tiefen Untergrundes und Obertageanlage) 53

Tabelle 8: Vermeidbare CO_2-Äquivalentemissionen und spezifische Vermeidungsfaktoren für CO_2-Äquivalentemissionen der modellierten Modellanlagen (Gesamtanlage) 53

Tabelle 9: Vergleich der SO_2-Äquivalentemissionen [21] 54

Tabelle 10: Einstufung der betrachteten Arbeitsmittel (Stoffe) 56

Tabelle 11: Übersicht rechtlicher Anforderungen an die Arbeitsmittelverwendung 67

Tabelle 12: Technische Kenndaten der Modellanlage Typ 1 72

Tabelle 13: Technische Kenndaten der Modellanlage Typ 2 72

Tabelle 14: Kenndaten zum Arbeitsmittel Isobutan 73

Tabelle 15: Kenndaten zum Arbeitsmittel Isopentan 73

Tabelle 16: Kenndaten zum Arbeitsmittel R245fa 74

Tabelle 17: Kenndaten zum Arbeitsmittel R227ea 74

Tabelle 18: Kenndaten zum Arbeitsmittel R245cb 75

Tabelle 19: Kenndaten zum Arbeitsmittel HFE7000 75

Tabelle 20: Kenndaten zum Arbeitsmittel FK649 76

Tabelle 21: Kenndaten zum Arbeitsmittel R1233zd (E) 76

Tabelle 22: Fragebogen Primärstatistische Datenerhebung 77

Tabelle 23: Primär- und Sekundärstatistische Datenerhebung; Energie- und Materialaufwendungen [1] 82

Abkürzungsverzeichnis

A	Anlage
C	Carnot
ESP	Electrical Submersible Pump (Unterwassermotorpumpe)
El	Elektrisch
Ex	Exergie
F	Förderung
G	Gesamt
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial), alle GWP Werte in dieser Arbeit beziehen sich auf einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren, dieser wird auch als GWP_{100} bezeichnet
HD	Hochdruck
I	Isentrop
KW	Kraftwerk
LSP	Line Shaft Pump (Gestängepumpe)
M	Mittel
ND	Niederdruck
o	Oben
Q	Wärme
T	Temperatur
Th	Thermisch
TW	Thermalwasser
U	Umgebung
u	Unten
W	Wasser
WGK	Wassergefährdungsklasse

Zusammenfassung

Ziel des Gutachtens ist es, die Bewertbarkeit der durch effizienzsteigernde Maßnahmen hervorgerufenen Umwelteffekte von ORC-Anlagen bei der geothermischen Stromerzeugung anhand einer datengestützten Bilanzierung zu verbessern. Hierzu wurden zunächst ausgehend von einer Umfrage bei Betreibern repräsentative geothermische Anlagengrundtypen ohne umgesetzte und mit umgesetzten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung abgeleitet und klassifiziert. Diese Grundtypen wurden für vergleichende Berechnungen der erzielbaren elektrischen Leistungen und die Wirkung von Effizienzsteigerungsmaßnahmen verwendet. Die abgeleiteten Anlagenkonzepte wurden in Modellanlagen überführt, um sie mit einer Fließschemasimulationssoftware zu modellieren. Bestimmt wurden mit der Simulation energetische und exergetische Kraftwerks- und (Gesamt-)Anlagenwirkungsgrade für die in Deutschland typischen Thermalwassertemperaturen und für verschiedene Arbeitsmittel.

Im Vergleich zu den Modellanlagen des Typs 1 – Standard ORC ergeben sich in den Modellanlagen des Typs 2 – Zweistufiger ORC bei gleichen geothermischen Förderleistungen höhere Anlagenwirkungsgrade und es kann entsprechend mehr elektrische Energie erzeugt werden. Die höchsten elektrischen Leistungen und Anlagenwirkungsgrade werden für die hier unterstellten Randbedingungen jeweils bei beiden Modellanlagentypen mit dem Arbeitsmittel Isobutan erreicht.

Im zweiten Schritt wurde für die Modellanlagen eine ökologische Analyse durchgeführt. Für die Obertageanlage sind die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen abhängig vom Anlagentyp und dem Arbeitsmittel. Für den Modelltyp 2 – Zweistufiger ORC wurden bei allen betrachteten Arbeitsmitteln geringere strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen als für Modelltyp 1 – Standard ORC berechnet. Bei der Verwendung von Isobutan und Isopentan als Arbeitsmittel fallen deutlich geringere strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen für die Obertageanlage an als beim Einsatz von fluorierten Arbeitsmitteln (z. B. R245fa). Bei Isobutan und Isopentan sind die CO_2-Emissionen beim Bau der Obertageanlage die bestimmende Größe für die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen, bei fluorierten Arbeitsmitteln sind dagegen die direkten Emissionen des Arbeitsmittels beim Rückbau und Betrieb für die Bilanz bestimmend.

Für weitere spezifische strominduzierte Umweltwirkungen, wie den Verbrauch von fossiler Energie und Emissionen mit versauernder und eutrophierender Wirkung, ergeben sich bei Modelltyp 2 – Zweistufiger ORC für die Obertageanlage geringere Verbräuche fossiler Energie und weniger Emissionen wegen der höheren energetischen Anlageneffizienz im Vergleich mit Modelltyp 1 –Standard ORC. Die Änderung des Arbeitsmittels beeinflusst in dem hier betrachteten Bilanzrahmen die Ergebnisse kaum.

Ausgehend von den hier untersuchten Modellanlagen und unterstellten Randbedingungen vermindert der Einsatz von Kohlenwasserstoffen wie Isobutan und Isopentan als Arbeitsmittel in ORC-Anlagen die treibhausgasbedingten Emissionen. Bei allen brennbaren Arbeitsmitteln sind zusätzlich Maßnahmen zur Beherrschung der Brand- und Explosionsrisiken zu treffen. Bei der Verwendung von wassergefährdenden Stoffen sind zudem Maßnahmen zum Gewässerschutz gegen aus dem Kreislauf austretende Flüssigkeiten nötig.

Bei den Planungen neuer Anlagen müssen neben der Energieeffizienz und Eignung für den ORC-Prozess die Zukunftschancen und Verfügbarkeiten der Arbeitsmittel sowie die Anforderungen des Arbeitsschutz- und Umweltrechts kritisch geprüft werden. Das Arbeitsmittel sollte aus Klimaschutzgründen ein geringes Treibhauspotenzial und eine geringe Umweltbelastung über den Lebensweg (einschließlich Herstellung und Abbauprodukten) aber gleichzeitig eine geringe Brand- und Explosionsgefahr aufweisen. Insgesamt erscheint es daher sinnvoll, weiter zu prüfen, ob es als Arbeitsmittel geeignetere Stoffe gibt, die beiden Arten von Zielen stärker gerecht werden.

Summary

The aim of the report is to carry out a Life Cycle Assessment for geothermal Organic Rankine Cycle (ORC) power plants with different efficiency enhanced concepts.

In a first step geothermal power plant operators in Germany were interviewed. The identified geothermal ORC plant types were classified in types without efficiency enhanced concepts and with efficiency enhanced concepts. This ORC plant types were transformed in model plants and modelled with a Flowsheet Simulation Software. Then for these geothermal model plants the power plant efficiencies regarding typical thermal water temperatures in Germany and different working fluids were calculated.

The results show that the efficiencies of the model plant type 2 – double stage ORC are higher than the efficiencies of the model plant type 1- standard ORC. With the same geothermal heat more electricity can be generated. The highest efficiencies can be achieved by an application of hydrocarbons as ORC working fluids (e. g. Isobutane).

In a second step a Life Cycle Assessment was realised for the model plants. Regarding the power conversion equipment on the surface the results for the specific power related greenhouse gas emissions are dominated by the model plant type and working fluid in the ORC. For all studied working fluids the lowest specific power related greenhouse gas emissions were calculated for the model plant type 2 – double stage ORC. An application of hydrocarbons (e. g. Isobutane, Isopentane) as working fluids in the ORC leads to lower specific power related greenhouse gas emissions than an application of fluorinated working fluids (e. g. R245fa). By an utilisation of hydrocarbons (e. g. Isobutane, Isopentane) the specific power related greenhouse gas emissions are dominated by the construction phase. In contrast to this the specific power related greenhouse gas emissions by an utilisation of fluorinated working fluids (e. g. R245fa) are dominated by the operating and decommissioning phase.

Regarding the other studied specific power related environmental impacts (e. g. primary energy consumption, emissions with eutrophying and acidifying effects) an application of the model plant type 2 – double stage ORC leads to lower primary energy consumption and emissions. In the framework of this calculation, the change of the working fluid influences the results only very slightly.

In summary for the studied model power plant types and defined boundary conditions an utilisation of hydrocarbons (e. g. Isobutane, Isopentane) as working fluids in the ORC leads to lower specific power related greenhouse gas emissions. For flammable working fluids, on the other hand, additional measures to control fire and explosion risks are necessary. If substances hazardous to water are used water protection precautions against leaking fluids are to be taken.

When planning new power plants the energy efficiency and the future prospects as well as the availability of the working fluid, the requirements regarding the industrial safety legislation and the environmental law have to be verified. The used working fluids should have a low global warming potential and a low environmental impact during the entire life cycle and simultaneously a low risk of fire and explosion. In summary it seems to be necessary to identify more suitable working fluids in the future which achieve the above mentioned objectives.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielstellung

Mit dem Ziel eine zuverlässige, kostengünstige sowie klima- und umweltverträgliche – und damit nachhaltige – Energieversorgung für das 21. Jahrhundert aufzubauen, sollen nach den Beschlüssen der Bundesregierung erneuerbare Energien zukünftig eine noch größere Rolle im deutschen Energiesystem spielen. Dazu sollen fossile Energieträger vermehrt durch erneuerbare Energien substituiert und parallel dazu die Nutzung der Kernenergie beendet werden. In diesem Kontext wird auch von der tiefen Geothermie ein größerer Beitrag zur Deckung der Energienachfrage erwartet.

Bisherige Untersuchungen zeigten, dass die Energiebereitstellung aus geothermischen Kraft- und Heizkraftwerken bei einer Betrachtung des gesamten Lebensweges eine positive Umweltbilanz aufweist und sie damit zur Reduzierung der energiebedingten Umweltauswirkungen beitragen kann.

Die Umweltbilanz von Geothermieanlagen kann noch positiver ausfallen, wenn die Effizienz der übertägigen Kraftwerkskomponenten gesteigert wird. Möglichkeiten der Effizienzsteigerung bestehen im Einsatz kältetechnisch effizienter bzw. an die Thermalwassertemperaturen und den Anlagenaufbau besser angepasster Arbeitsmittel sowie in der Anwendung neuer ORC-Konzepte wie Mehrdruckverfahren, überkritische Verfahren oder Verfahren mit Stoffgemischen als Arbeitsmittel. Ziel dieser Maßnahmen ist eine höhere Netto-Energiebereitstellung, d. h. es wird aus der gleichen Menge geförderter thermischer Energie mehr Strom bereitgestellt.

Die Mehraufwendungen für die neuen Verfahren sind bei der Anlagenherstellung, beim Betrieb und beim Rückbau zu berücksichtigen, denn eine technische Effizienzsteigerung hat nicht zwingend auch eine ökologische Verbesserung zur Folge. In der Vergangenheit wurden derartige Effizienzsteigerungsmaßnahmen der Stromproduktion ökologisch kaum bzw. nicht umfassend im Rahmen von Lebenswegbetrachtungen bewertet. Diese Arbeit soll dazu beitragen, die Bewertung von Umwelteffekten durch effizienzsteigernde Maßnahmen an ORC-Anlagen bei der geothermischen Stromerzeugung durch eine datengestützte Bilanzierung zu verbessern. Darüber hinaus wurden rechtliche und wirtschaftliche Aspekte für den Einsatz klimaschonender Arbeitsmittel diskutiert.

1.2 Vorgehen

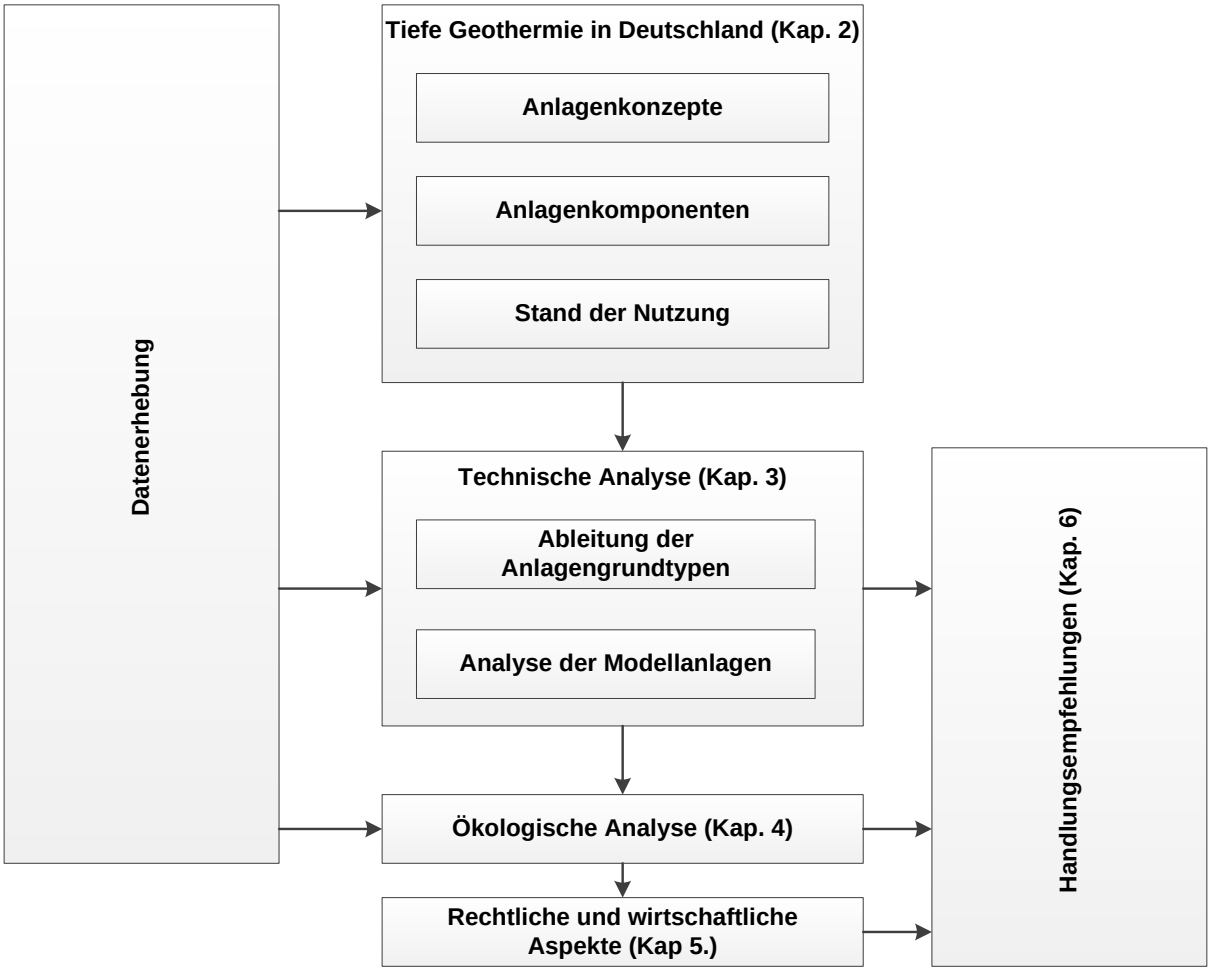
Zunächst wurden Anlagenkonzepte und Anlagenkomponenten zur Nutzung der tiefen Geothermie in Deutschland beschrieben und deren Relevanz für eine ökobilanzielle Betrachtung dargestellt. Im nächsten Schritt wurde der Bestand geothermischer Anlagen in Deutschland bzw. im angrenzenden Europa (d. h. mit ähnlichen geologischen Bedingungen) erfasst und technisch beschrieben (Abbildung 1).

Für die weiteren Untersuchungen wurden, ausgehend von einer Umfrage bei Betreibern, repräsentative Anlagengrundtypen ohne umgesetzte und mit umgesetzten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung abgeleitet und klassifiziert. Diese Anlagengrundtypen wurden in Modellanlagen überführt und mit einer Fließschema-Simulationssoftware modelliert.

Im Rahmen einer an das Vorgehen der Regelungen zur Durchführung von Ökobilanzen angelehnten ökobilanziellen Betrachtung erfolgten eine Bilanzierung der Modellanlagen und eine Gegenüberstellung der Umweltwirkungen der verschiedenen Modellanlagen.

Für relevante Arbeitsmittel wurden rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Arbeitsmittelverwendung diskutiert. Abschließend wurden Erkenntnisse formuliert und Handlungsempfehlungen gegeben, die sich aus der Arbeit ergeben.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte.



1.3 Bisherige Untersuchungen

Im Rahmen einer ökologischen Analyse und Bewertung wurden die Umwelteffekte im Verlauf des gesamten Lebensweges – d. h. Bau, Betrieb und Rückbau unter Berücksichtigung der jeweils vorgelagerten Ketten – für eine geothermische Strombereitstellung bzw. kombinierte Strom- und Wärmebereitstellung in Deutschland bereits in einer Untersuchung aus dem Jahre 2007 bilanziert [1]. Nachstehend werden kurz ausgewählte Ergebnisse aus [1] dargestellt:

- Der Lebenswegvergleich der in der Literatur [1] analysierten Referenzkonzepte zur Strombereitstellung macht deutlich, dass der Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie die Emissionen in die Luft im Lebensweg maßgeblich durch die Lagerstättenerschließung bedingt sind. Der Verbrauch erschöpflicher Energieträger wird z. B. von 86 bis 94 % durch den untertägigen Bau beeinflusst. Davon entfallen durchschnittlich 51 % auf die Energie für die Bohrungsniederbringung [1]. Der Verbrauch erschöpflicher Energieträger für den Bau über Tage, den Anlagenbetrieb und den Rückbau sind dagegen von untergeordneter Bedeutung. Diese Tendenz der Verteilung beim Verbrauch erschöpflicher Energieträger ist in ähnlichen Ansätzen auch bei den Emissionen in die Luft zu beobachten [1].
- Weiterhin zeigt die Untersuchung, dass bei einem Einsatz der Kalina-Technologie eine Verringerung der betrachteten Umweltwirkungen erzielt werden kann. Bei gleichem erschließungstechnischen Aufwand ist der obertägige Anlagenbau für eine Kalina-Anlage aufgrund der technisch bedingten Komplexität (z. B. Separator, getrennte Prozessführung von ammoniak-armer Flüssigkeit und ammoniak-reichem Dampf) im Vergleich zu einer ORC-Anlage

zwar größer, die größere Netto-Strommenge führt jedoch, insbesondere bei niedrigeren Thermalwassertemperaturen, zu einer Reduktion der resultierenden Umweltwirkungen [1].

Die Untersuchung [1] ist die Grundlage für die in Kapitel 2 und in den Anhängen A und B angegebenen Bilanzierungsdaten, soweit sie nicht selbst bestimmt wurden. Daten für die Bilanzierung der Erschließung des tiefen Untergrundes wurden aus [1] entnommen. Sofern möglich, sind einige Daten aus [1] verifiziert und präzisiert worden.

Im vom Umweltbundesamt beauftragten Kurzgutachten „Mögliche Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie durch den Einsatz von F-Gasen im Energiewandlungsprozess mittels ORC“ [2] wurden verschiedene Szenarien der geothermischen Stromerzeugung berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass, wenn es zu einem Ausbau der geothermischen Stromerzeugung im vorhergesagten Rahmen kommt, die Emissionen bis zum Jahr 2030 im Vergleich mit den damals projizierten Gesamt F-Gas Emissionen als gering einzustufen wären. Bei maximalem Ausbau, bei dem man von einem nutzbaren Potenzial von 2120 ORC-Kraftwerken und einer (geringen) Emissionsrate von 3 % ausgeht, lägen die Emissionen von fluorierten Treibhausgasen abhängig vom betrachteten Szenario in einem Bereich von 0,24 Mio. t/a bis 3,02 Mio. t/a CO_2-Äquivalenten [2]. Ein Vergleich mit den im Jahr 2009 insgesamt in Deutschland freigesetzten Treibhausgasemissionen durch F-Gase von 15,6 Mio. t/a CO_2-Äquivalenten zeigt, dass die Emissionen in dieser Ausbaustufe durchaus relevant sein können [2].

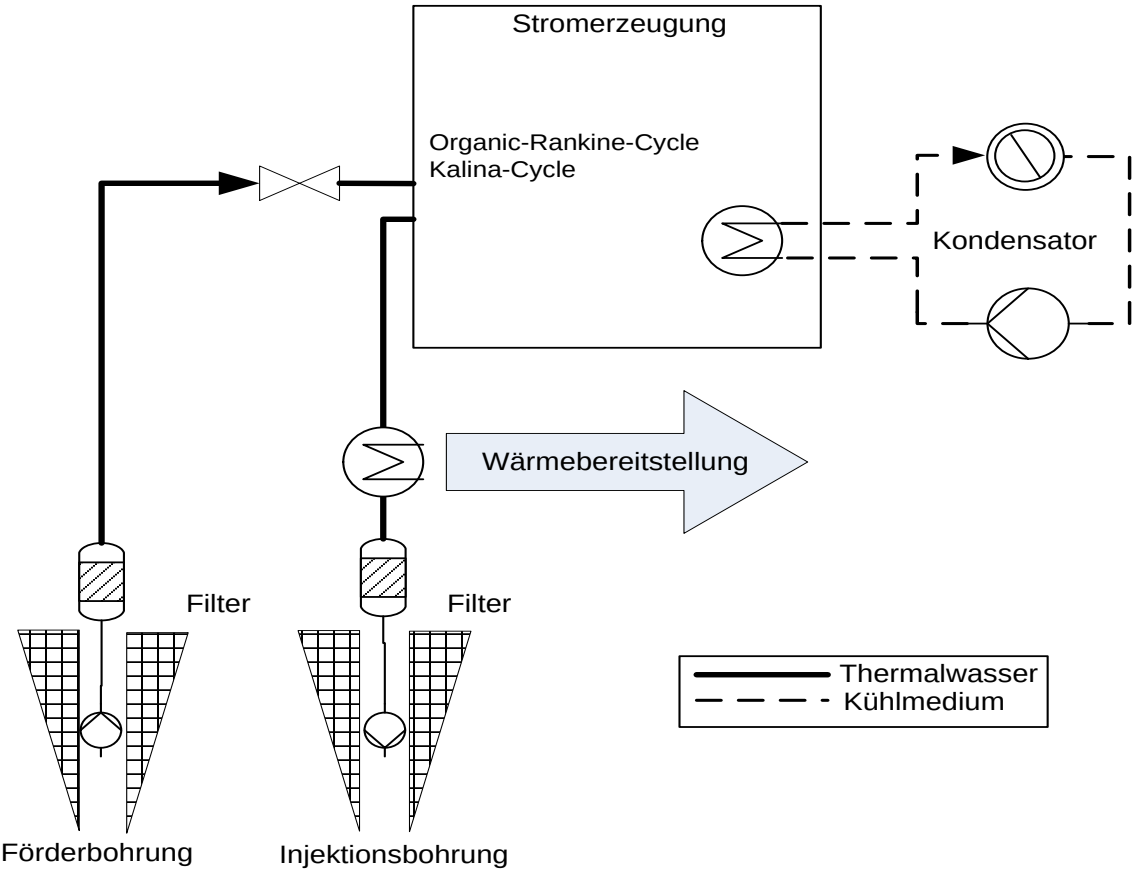
2 Tiefe Geothermie in Deutschland

2.1 Anlagenkonzepte

Neben Konzepten zur ausschließlichen Wärmebereitstellung aus tiefer Geothermie werden in den letzten Jahren vermehrt Konzepte zur kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung realisiert. Konzepte zur kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung werden in der vorliegenden Studie als Standardkonzepte angesehen. Konzepte, die allein auf Stromerzeugung abzielen, sind für eine Betrachtung des Ausbaus der Geothermie in Deutschland aus gegenwärtiger Sicht nicht relevant.

Ein vereinfachtes Fließbild für ein Konzept zur kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung aus tiefer Geothermie zeigt Abbildung 2. Die Geothermieanlage besteht dabei aus den untertägigen Einrichtungen (d. h. Förder- und Injektionsbohrung, Kapital 2.2) und der obertägigen Geothermieanlage (d. h. Thermalwasserkreislauf, Kraftwerk und Heizwerk, Kapitel 2.3).

Abbildung 2: Konzept einer kombinierten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung [3].



Das Thermalwasser wird durch die Förderbohrung aus dem tiefen Untergrund gefördert und anschließend im Thermalwasserkreislauf aufbereitet. Die thermische Energie des Thermalwassers wird über mehrere Wärmeübertrager an einen sekundären Kreislauf übertragen. Das Arbeitsmittel wird dabei vorgewärmt, verdampft und anschließend unter Abgabe von Arbeit in der Turbine entspannt. Anschließend wird es im Kondensator verflüssigt und durch die Speisepumpe wieder auf den Verdampferdruck gebracht. Die im Thermalwasser verbliebene Restenergie wird nun über einen Wärmeübertrager an ein Nah- oder Fernwärmenetz abgegeben. Schließlich wird das abgekühlte Wasser nach einer weiteren Filterung über die Injektionsbohrung zurück in den tiefen Untergrund verpresst [3], [4], [5] und [6].

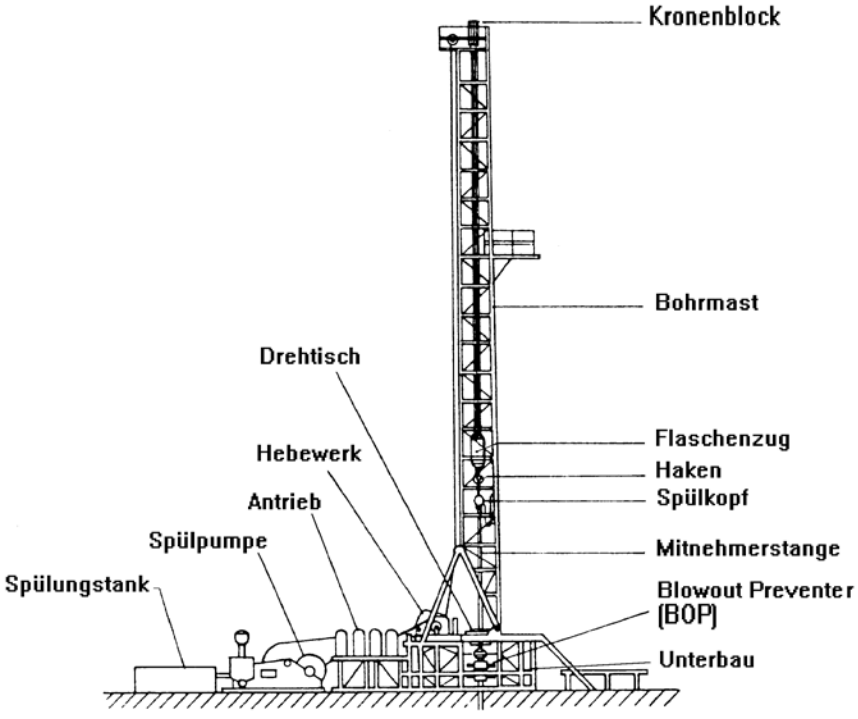
2.2 Erschließung des tiefen Untergrundes

Die Erschließung des tiefen Untergrundes gliedert sich in die Einrichtung des Bohrplatzes, den eigentlichen Bohrvorgang, den Betrieb der dabei notwendigen Spülungsaggregate, das Einbringen der Verrohrung und das Herstellen der Zementation sowie die Stimulation. Nachfolgend werden die Vorgänge kurz beschrieben und für eine ökobilanzielle Betrachtung relevante Parameter diskutiert. Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf den Ausarbeitungen in [3], [4], [5] und [6].

Bohrplatz. Ist die Lokation (Bohrstelle) festgelegt, wird der Anschluss an die vorhandene Infrastruktur (u. a. Zufahrtswege, Versorgungsleitungen für Energie und Wasser) sichergestellt. Die Bohrplatzgröße umfasst meist eine standardisierte Fläche, die abhängig ist von der Bohrtiefe und der Auslegung der Bohranlage. Der Untergrund dieser Fläche muss durch Aushub und Aufschüttung einer etwa 30 cm mächtigen Kiesschicht vorbereitet werden, von der mindestens der innere Bereich (d. h. der Fundamentbereich der Bohranlage einschließlich des gefährdeten Bereichs für Kontamination mit Treibstoffen, Ölen, Spülung, Lagerstättenwässer) zusätzlich mit Beton oder ggf. Bitumen versiegelt wird, um ein mögliches Eindringen kontaminierter Flüssigkeiten in den Untergrund sicher zu verhindern. Teile des errichteten Bohrplatzes können im späteren Verlauf im Kraftwerksbetrieb weiter genutzt werden [3], [4], [5] und [6]. Für die Errichtung des Bohrplatzes wurden im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtung 20 GJ Diesel (Energie) und 300 kg Zement pro Bohrplatz berücksichtigt [1].

Tiefbohranlage. Die zur Erschließung geothermischer Lagerstätten eingesetzte Anlagentechnik gleicht, von wenigen Ausnahmen abgesehen (z. B. Anpassung an niedrigen Gebirgsdruck, hohe Bohrlochtemperaturen, eventuell mineralhaltige und aggressive Dämpfe) den Komponenten, die auch zur Erschließung von Erdöl- und Erdgasvorkommen zur Anwendung kommen. Der Aufschluss der Lagerstätte erfolgt im Regelfall mit einer diesel- bzw. vollelektrisch getriebenen Bohranlage (Abbildung 3) [3], [4], [5] und [6].

Abbildung 3: Aufbau Rotary Bohranlage [3].



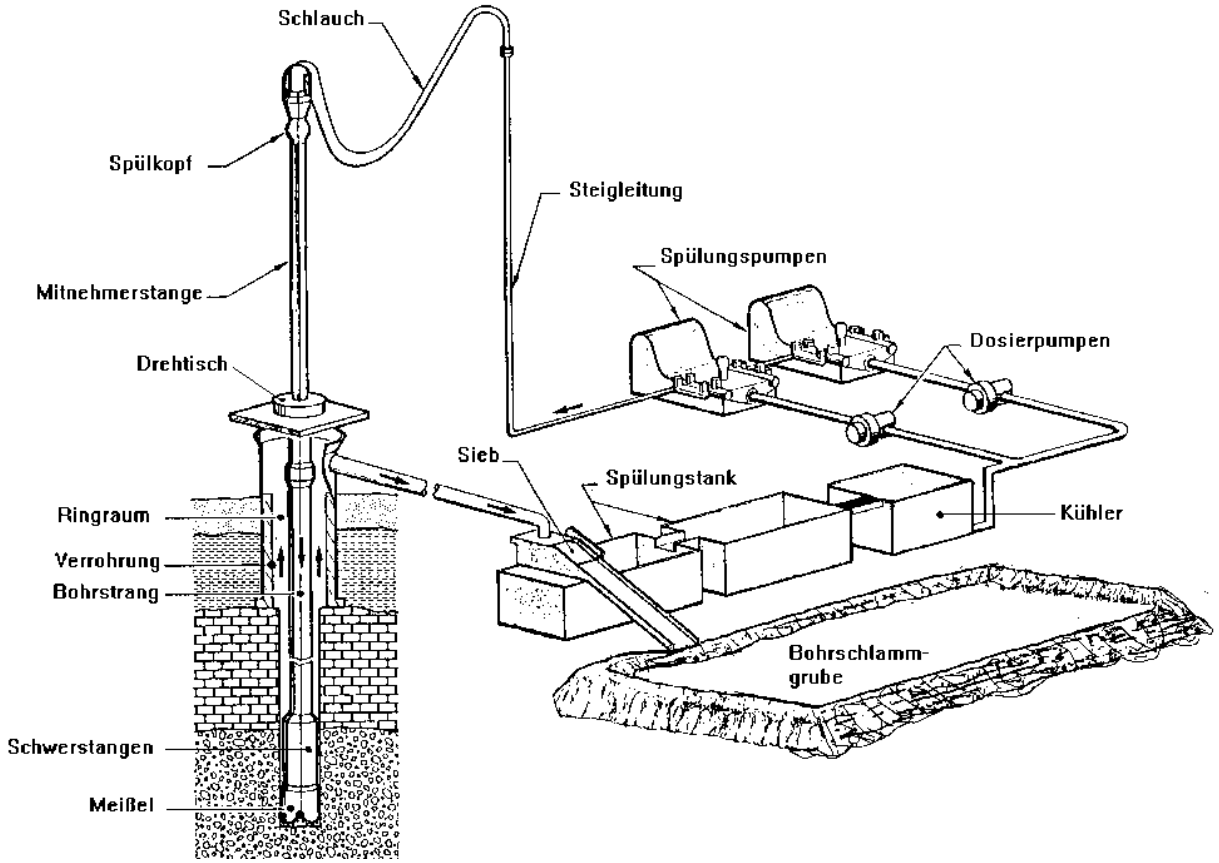
Die Auswahl der Tiefbohranlage hängt im Wesentlichen von der geplanten Endteufe und dem Bohrlochenddurchmesser ab. Der im Trägergestein zu erreichende Bohrlochdurchmesser wird im Allge-

meinen unter ökonomischen Aspekten abhängig von der erwarteten Förderrate festgelegt. Geringe Durchmesser schränken die Förderrate und damit die erreichbare thermische Leistung der Anlage ein, große Durchmesser sind kostenintensiv. Durch den Bohrlochenddurchmesser wird auch der für den Bohrprozess nötige Energieaufwand bestimmt [3], [4], [5] und [6].

Für die ökobilanzielle Betrachtung wird i. d. R. nur der Energieaufwand für die Bohrung berücksichtigt. Er beträgt 7,5 GJ/m [1]. Damit ist die Bohrung der Prozess in der Bilanz, für den der höchste Energieaufwand nötig ist [1].

Spülungskreislauf und Spülungspumpen. Während des Bohrvorgangs muss der Bohrmeißel am Kopf des Bohrgestänges gekühlt und das Bohrklein abtransportiert werden. Die dafür verwendete thixotrope Bohrspülung wird durch die Spülungspumpen im Bohrstrang, der als Hohlbohrstange ausgelegt ist, zur Bohrlochsohle gepumpt (Abbildung 4). Anschließend steigt sie, mit dem Bohrklein beladen, im Ringraum auf und tritt über Tage drucklos aus dem Bohrloch aus. Vor der Konditionierung und der erneuten Verpressung der Bohrspülung in den Bohrstrang wird das Bohrklein durch Siebe, Desander (zur Sandentfernung), Desilter (zur Schluffentfernung), Zyklone u. ä. entfernt [3], [4], [5] und [6].

Abbildung 4: Spülungskreislauf [3].

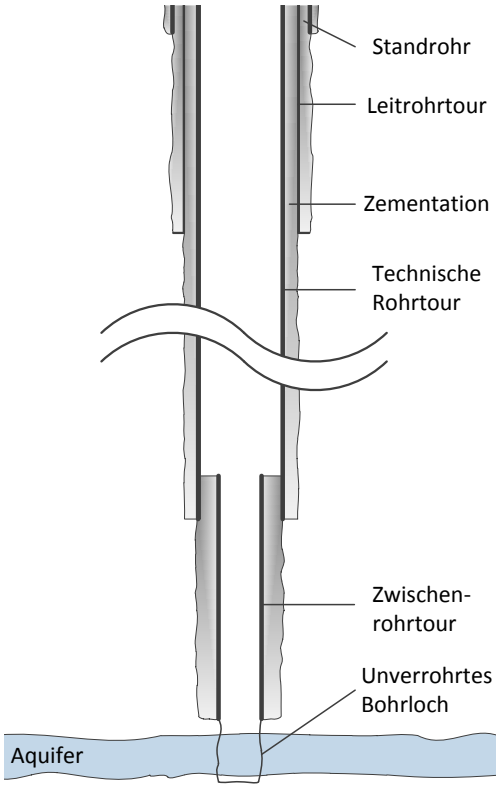


Für den bei der Bohrungsabteufung notwendigen Spülungsvorgang wurden für die ökobilanzielle Betrachtung gemittelte Energieaufwendungen von 0,2 GJ/m Diesel und verschiedene Materialien berücksichtigt [1]. Im Vergleich mit dem Energieaufwand für die Bohrung und dem im Folgenden beschriebenen Materialaufwand für den Bohrlochausbau spielt der Spülvorgang bei der ökobilanziellen Betrachtung nur eine untergeordnete Rolle [1],

Verrohrung. Das Bohrloch wird abschnittsweise jeweils im Anschluss an den Bohrvorgang möglichst schnell durch die Verrohrung, d. h. das Setzen von Futterrohren (Casings) mit anschließender

Zementation, stabilisiert. Die Verrohrung bestimmt die technische Lebensdauer einer Bohrung wesentlich. Sie stützt die Bohrlochwand, dichtet das Bohrloch gegen flüssigkeitsführende Schichten ab, verhindert Gesteinsnachfall und bietet später die Möglichkeit, technische Mess- und Hilfsgeräte für die Förderung oder eventuelle Reparaturen einfacher einzubauen. Der gewünschte Enddurchmesser einer Bohrung bestimmt die Durchmesser der in Kaskaden einzubauenden Rohrtouren (Abbildung 5) und somit den Materialaufwand [3], [4], [5] und [6]. Für Verrohrung und Zementation wurden Materialaufwendungen von ca. 100 kg/m Stahl, 45 kg/m Zement und Sand sowie ein Anteil von ca. 1/3 entkalktem Wasser zum Mischen für die ökobilanzielle Betrachtung unterstellt (siehe Anhang B) [1].

Abbildung 5: Beispielhaftes Verrohrungsschema [3].



Stimulation. Wenn die Thermalwasser-Förderrate nicht ausreicht, werden Stimulationsmaßnahmen angewandt, um die Permeabilität des Untergrundes zu verbessern. In diesem Fall spricht man von einem Enhanced Geothermal System (EGS, verbessertes geothermisches System). Ein mögliches Stimulationsverfahren ist das Hydraulic Fracturing (hydraulisches Aufbrechen). Damit können im Reservoir tiefe künstliche Risssysteme mit Bruchflächen von mehreren Quadratkilometern erzeugt werden. Dabei wird mit leistungsfähigen Pumpen Flüssigkeit mit Injektionsraten zwischen 10 und mehreren 100 l/s und Drücken von bis zu 100 MPa in das Bohrloch verpresst, damit das Gestein auf einer Länge von mehreren 100 m aufreißt. Um die Risse nach Druckentlastung offen zu halten, werden in einigen Fällen Stützmittel eingepumpt [3], [4], [5] und [6]. Als Stützmittel werden Sand oder andere feinkörnige Substanzen eingesetzt. Der Energieaufwand für die Stimulation wurde hier für jede Bohrung mit 3.000 GJ angenommen [1] und ist damit deutlich geringer als der Energieaufwand beim Bohren [1].

2.3 Obertägige Geothermieanlagen

In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Wärmeträgermediums (beispielsweise Temperaturprofil, Förderrate, Salinität (Salzgehalt)) sowie der Art der bereitzustellenden Endenergie (d. h. Strom, Strom und Wärme) werden verschiedene übertägige Systemkomponenten in unterschiedlicher Kombination eingesetzt.

Eine obertägige Geothermieanlage setzt sich im Wesentlichen aus dem Thermalwasserkreislauf, dem eigentlichen Kraftwerk und - bei kombinierter Strom- und Wärmebereitstellung – dem Heizwerk zusammen. Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf den Ausführungen in [3], [4], [5] und [6].

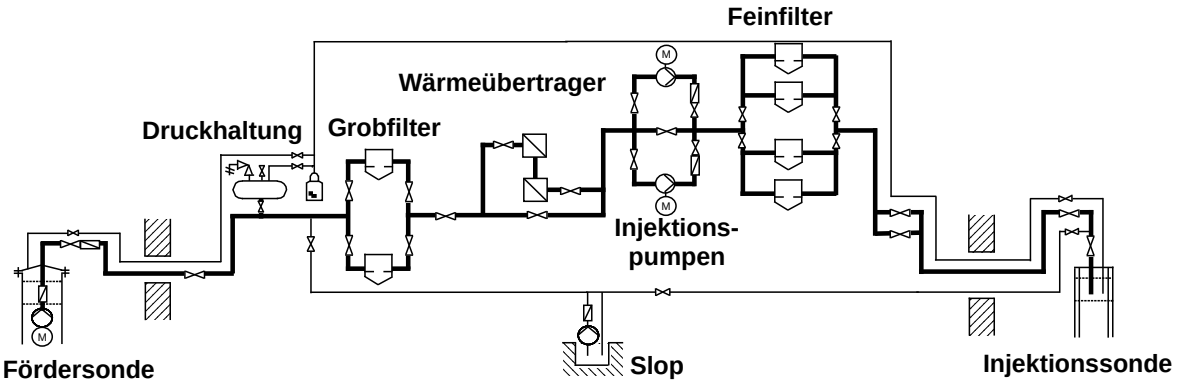
2.3.1 Thermalwasserkreislauf

Als Bindeglied zwischen der im tiefen Untergrund vorhandenen geothermischen Energie und der übertägigen Strom- bzw. Wärmebereitstellungsanlage muss der Thermalwasserkreislauf folgende Aufgaben erfüllen [3], [4], [5] und [6]:

- Förderung und Injektion der Tiefenwässer sowie deren Transport,
- Wärmeübertragung an ein Sekundärsystem (d. h. Heizzentrale oder Kraftwerk),
- Thermalwasseraufbereitung zur Sicherung der Injektionswasserqualität,
- ggf. Thermalwasser-Druckerhöhung vor der Injektion (falls aus lagerstättentechnischen Gründen notwendig),
- Gewährleistung der Verfahrenssicherheit.

Abbildung 6 zeigt die Bauteilgruppen eines Thermalwasserkreislaufs, der den o.g. Anforderungen Rechnung trägt. Nachfolgend werden spezifische Aspekte für wichtige Bauteile bzw. Bauteilgruppen exemplarisch diskutiert. Die tatsächlich realisierte Systemauslegung wird letztlich von den Charakteristika der geothermischen Lagerstätte und der Nachfragecharakteristik der Verbraucher – und das unter den jeweiligen ökonomischen Randbedingungen – bestimmt und kann deshalb im Einzelfall z. T. signifikant abweichen [3], [4], [5] und [6].

Abbildung 6: Prinzip eines Thermalwasserkreislaufes [3].



Thermalwasserförderung. Aufgrund der geologischen Bedingungen, wie sie in Deutschland in den für eine geothermische Nutzung in Frage kommenden Regionen vorzufinden sind, ist eine Förderung von Thermalwasser in der Regel an den Einsatz mechanischer Pumpen gebunden. Prinzipiell können hierfür sogenannte Gestängepumpen (LSP) und Unterwassermotorpumpen (ESP) eingesetzt werden [3], [4], [5] und [6].

Die oft eingesetzte Unterwassermotorpumpe setzt sich aus den Hauptbaugruppen Pumpe, Protektor und Motor zusammen. Die Pumpe wird an einer im Bohrlochkopf abgehängten Steigleitung unterhalb des Thermalwasserspiegels installiert. Die zum Betrieb notwendige elektrische Energie wird

über ein Kabel im Ringraum zwischen der zementierten Rohrtour und der Pumpensteigleitung zugeführt [3], [4], [5] und [6]. Der Einfluss auf die Ökobilanz wird durch den Energieverbrauch im Betrieb dominiert. Der Energieverbrauch der Tiefpumpe kann für verschiedene Anlagen je nach geologischen Parametern zwischen 10 und 20 % betragen (siehe Kapitel 3.2).

In [1] werden für die Tiefpumpe Materialaufwendengen rund 4,5 t/a Stahl angegeben, d h. die Tiefpumpe wird regelmäßig ersetzt. Bei der durchgeführten Betreiberumfrage wurden für den Bau der Tiefpumpe deutlich höhere Stahlmengen angegeben. Insgesamt haben die Materialaufwendungen für die Tiefpumpe aber eine untergeordnete Bedeutung in der ökobilanziellen Betrachtung.

Rohrleitungen. Der Thermalwassertransport zwischen der Förder- und Schluckbohrung wird im Allgemeinen mit Hilfe wärmeisolierter Rohre durchgeführt. Mit dem Ziel eines technisch sicheren, umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Betriebes geothermischer Anlagen müssen korrosiv bedingte Wandungsbrüche (z. B. durch hochmineralisierte Tiefenwässer) zwingend verhindert werden. Korrosionsschutzmaßnahmen beschränken sich dabei im Wesentlichen auf die Auswahl des Materials und/oder die Beschichtungen. In der Vergangenheit haben sich glasfaserverstärkte Kunststoffe sowie beschichtete metallische Werkstoffe bewährt [3], [4], [5] und [6].

Für den Bau des Thermalwasserkreislaufes werden in [1] rund 7,6 MJ/m Energie, und rund 280 kg/(m^3_{TW}/h) an Stahl angegeben. Die Betreiberumfrage hat gezeigt, dass hier deutlich weniger Material berücksichtigt werden muss (rund 50 kg/(m^3_{TW}/h).

Slopsystem. Zum Aufnehmen der außerhalb der Rohrleitungen anfallenden Thermalwässer und zur anschließenden aufbereiteten Rückführung oder ggf. Aufbereitung für den Abtransport zur Deponie dient das Slopsystem (Slop (engl.) – Schmutzwasser). Entsprechende Slopwässer können dabei im Rahmen der Erstinbetriebnahme der Anlagen bzw. nach längeren Stillstandszeiten beim Spülen der Förderbohrung und des Thermalwasserkreislaufes, bei einem Filterwechsel, bei Reparaturen, beim Entleeren des Leistungssystems und bei Leckagen im System anfallen. Im Allgemeinen wird der Haupt-Slopbehälter direkt nach der Injektionsbohrung gebaut. Kleiner dimensionierte Slopbehälter befinden sich an jedem weiteren Prozessschritt [3], [4], [5] und [6].

Die für das Slopsystem anfallenden Energie- und Materialaufwendungen sind bereits im Thermalwasserkreislauf berücksichtigt.

Filter. Mit dem Ziel, einen sicheren Betrieb der Geothermieanlage zu gewährleisten, müssen obertägig Filter im Thermalwasserkreislauf installiert werden. Deshalb werden Filteranlagen bereits unmittelbar nach der Förderbohrung eingebaut, um die Anlagenkomponenten beispielsweise vor Sedimentation zu schützen. Abgeschieden werden hier Partikel, die direkt aus dem Förderhorizont oder aus vorgelagerten Anlagenkomponenten (d. h. Korrosionspartikel aus Pumpen oder der Verrohrung) stammen. Zusätzlich werden engmaschige Filter direkt vor der Schluckbohrung installiert. Diese dienen dazu, den Eintrag feinster Partikel aus dem Förderhorizont sowie zwischenzeitlich entstandene chemische Fällungsprodukte (beispielsweise infolge einer Abkühlung der Tiefenwässer) in die Injektionssonde zu vermeiden. Dadurch soll eine Verschlechterung der Verpresseigenschaften des Wassers in den tiefen Untergrund sicher ausgeschlossen bzw. möglichst lange verzögert werden, um eine langfristige Nutzung bei Aquiferen sicherzustellen [3], [4], [5] und [6].

Beim Betrieb der Filter fallen rund 1,5 kg/a/(m^3_{TW}/h) an Sonderabfall an (d. h. Filterkuchen) [1].

2.3.2 Kraftwerk

Für die Strombereitstellung muss ein Kraftwerk errichtet werden. Im Folgenden werden die dafür benötigten Anlagenkomponenten und Kraftwerksprozesse diskutiert.

Die Umwandlung von Wärme in elektrische Energie erfolgt in thermischen Kraftwerken mit Hilfe von Kreisprozessen. Dazu wird einem Arbeitsmittel Wärme zugeführt, so dass das Arbeitsmittel ver-

dampft. Der verdichtete Arbeitsmitteldampf treibt eine Maschine an, die so erzeugte mechanische Energie wird über weitere Aggregate in elektrische Energie umgewandelt. Anschließend gibt das Arbeitsmittel die Wärme auf einem geringerem Temperaturniveau wieder ab. Kennzeichen eines Kreisprozesses ist, dass der Endzustand des Arbeitsmittels nach mehreren Zustandsänderungen identisch mit dem Anfangszustand ist [7].

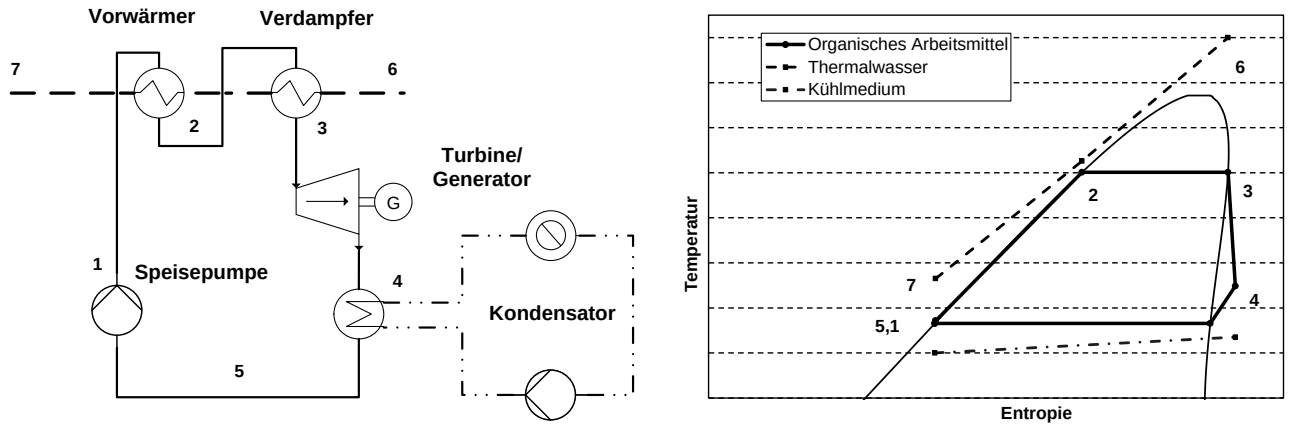
2.3.2.1 Kraftwerksprozess

Während die Verdampfungswärme in konventionellen Kraftwerken aus der Verbrennung von Energieträgern wie Kohle und Gas stammt, wird sie bei der geothermischen Stromerzeugung dem Thermalwasser entnommen. Da das in Deutschland gewinnbare Thermalwasser nicht heiß genug bzw. sein Druck zu niedrig ist, um ausreichend Wasserdampf für eine direkte Entspannung zur Stromerzeugung bereitzustellen, wird die Wärme auf Stoffe übertragen, die schon bei sehr niedrigeren Temperaturen in die Dampfphase übergehen. Nachfolgend werden der dabei verwendete Standardkraftwerksprozess und die verschiedenen Konzepte zur Steigerung der Effizienz dargestellt [3], [4], [5] und [6].

Standardkraftwerksprozess. In Deutschland wird aufgrund der geologischen Randbedingungen in geothermischen Kraft- und Heizkraftwerken bisher standardmäßig der Organic-Rankine-Kreislauf (ORC) verwendet. Eine prinzipielle Anordnung der Komponenten eines ORC-Kreislaufes zeigt Abbildung 7 [3], [4], [5] und [6].

Hier wird, ähnlich wie in konventionellen Kraftwerken, das Wärmeträgermedium zunächst vorgewärmt (Übergang von Zustand 1 zu Zustand 2) und anschließend vollständig verdampft (2 ⇢ 3). Anschließend wird das dampfförmige Arbeitsmittel in der Turbine entspannt (3 ⇢ 4) und im Kondensator wieder verflüssigt (4 ⇢ 5). Dann wird das Arbeitsmittel durch eine Pumpe wieder zurück auf den Verdampferdruck gebracht (5 ⇢ 1). Mit dem Ziel der internen Wärmerückgewinnung kann nach der Turbine ein zusätzlicher Wärmetauscher (d. h. Rekuperator, in Abbildung 7 nicht dargestellt) verbaut werden. Die Verdampfungswärme wird dem Thermalwasser entnommen (6 ⇢ 7) [3], [4], [5] und [6].

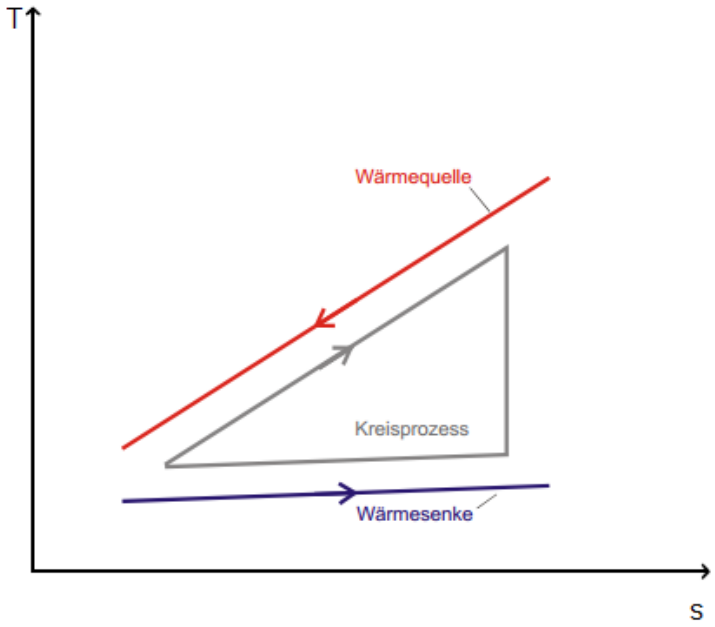
Abbildung 7: Vereinfachtes Schema eines ORC (Organic Rankine Cycle).



Konzepte zur Effizienzsteigerung. Bei mit fossilen Brennstoffen befeuerten Wasser-Dampfkraftwerken liegen die energetischen Kraftwerkswirkungsgrade bei rund 45 %. Bei geothermischen Kraftwerken liegen die mit dem Standardkraftwerkskonzept realisierten Gesamtwirkungsgrade der Stromerzeugung bei rund 8% bei 160 °C Thermalwassertemperatur. Die geringeren Gesamtwirkungsgrade sind auf die Limitierung des Kraftwerkswirkungsgrades durch die geringen maximalen Wassertemperaturen und daraus resultierenden geringen Temperaturunterschiede zurückzuführen, d. h. der sog. Carnot-Wirkungsgrad ist klein. Ein Vergleich, der den nutzbaren Energieinhalt des Thermalwassers berücksichtigt, lässt sich über eine exergetische Betrachtung vornehmen (siehe Kapitel 3.2.1).

Mit dem Ziel, die im Thermalwasser vorhandene Wärme möglichst effizient zu nutzen, wird eine Dreiecksform als ideale Form des Kreisprozesses angestrebt (Abbildung 8) [8].

Abbildung 8: Idealer Dreiecksprozess [8].



Bei realen Prozessen kann die Dreiecksform wegen der isothermen Wärmezufuhr während der Verdampfung und einer Entropiezunahme in der Turbine nicht erreicht werden. Mögliche Alternativen, die Dreiecksform annähernd zu erreichen und damit den Wirkungsgrad geothermischer Kraftwerke zu erhöhen, werden nachstehend diskutiert.

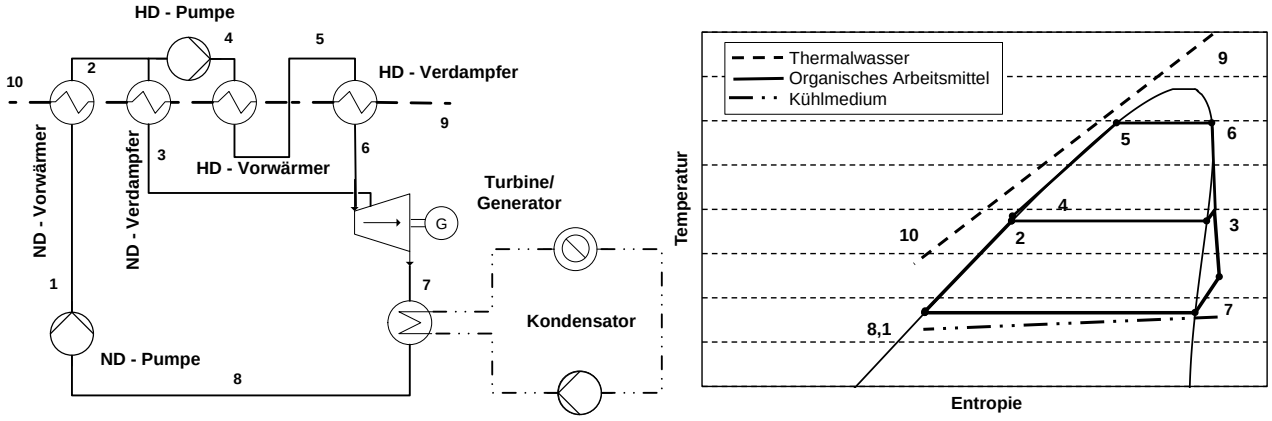
Zweistufige Entspannung. Ein Organic-Rankine-Kreislauf mit zweistufiger Entspannung besteht aus einer Niederdruckstufe und einer Hochdruckstufe. Dabei kann der Kreislauf mit zwei getrennten Modulen oder in einem Modul mit Teilstromabführung realisiert werden. Bei dem erstgenannten Konzept werden zwei ORC-Module (Hochdruck- und Niederdruckmodul) parallel hintereinander geschaltet; beide Module sind mit einem identischen Arbeitsmittel befüllt (nach diesem Konzept wurden bereits einige Anlagen umgesetzt). Wird ein Modul mit Teilstromabscheidung realisiert, so wird der Massenstrom des Arbeitsmittels in einen Niederdruck- und einen Hochdruckteilstrom aufgespalten (Abbildung 9). Es sind auch Kreisläufe mit mehr als zwei Druckstufen möglich. Da diese am Markt jedoch bisher nicht realisiert worden sind, werden sie hier nicht weiter berücksichtigt [3], [4], [5] und [6].

Bei einem Modul mit Teilstromabführung wird zuerst der Gesamtmassenstrom auf niedrigem Druckniveau vorgewärmt (Übergang von Zustand 1 zu Zustand 2). Ein Teilstrom wird auf ein höheres Druckniveau gebracht und wiederum vorgewärmt (2 ⇢ 4 ⇢ 5). Beide Teilströme werden dann auf dem jeweiligen Druckniveau vollständig verdampft (2 ⇢ 3 und 5 ⇢ 6) und anschließend im Hoch- und Niederdruckteil der Turbine entspannt (3 ⇢ 7 und 6 ⇢ 7). Danach wird das Arbeitsmittel im Kondensator wieder verflüssigt (7 ⇢ 8). Um einen neuen Kreislauf zu beginnen, wird das Arbeitsmittel durch eine Pumpe wieder zurück auf den Verdampferdruck gebracht (8 ⇢ 1). Das Thermalwasser wird dabei ausgekühlt (9 ⇢ 10) [3], [4], [5] und [6].

Mit dem ORC-Zweidruckkonzept sind im Vergleich zum Standardkonzept apparative Mehraufwendungen verbunden (Kapitel 3.1). Die Anzahl der Anlagenkomponenten im Kraftwerk erhöht sich und die Dichtungen sowie Rohrleitungen müssen auf Grund der ggf. insgesamt höheren Betriebsdrücke deutlich druckfester ausgelegt werden. Es werden beispielsweise wegen der Verdopplung der Druck-

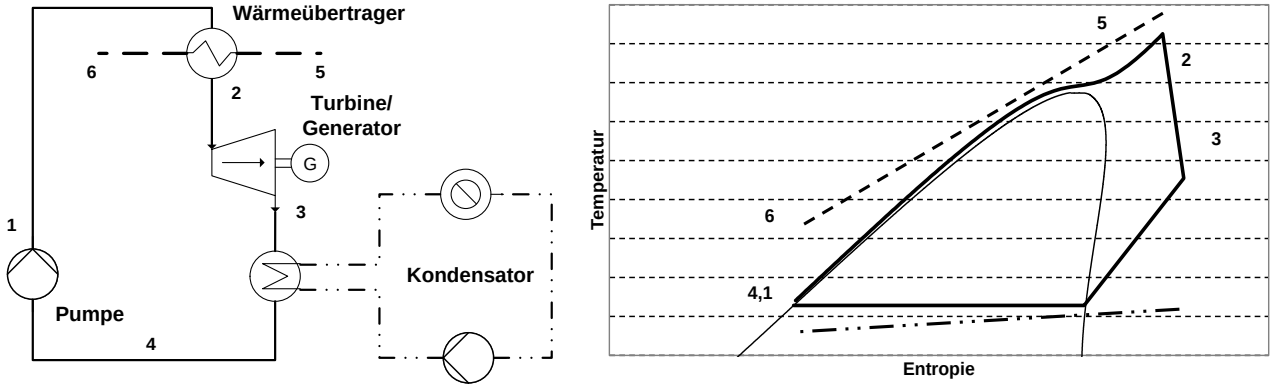
stufen bei der Vorwärmung und Verdampfung zwei kleinere Wärmeübertrager verwendet. Die Entspannung des organischen Arbeitsmittels erfolgt auf zwei Druckstufen, deshalb muss die Turbine aufwendiger gestaltet bzw. doppelt ausgeführt werden. Durch die insgesamt höheren Betriebsdrücke kann sich das Risiko von Leckagen im Betrieb erhöhen. Wird durch den Einsatz dieses Kraftwerkskonzeptes die Verfügbarkeit der Gesamtanlage nicht eingeschränkt, was wir für die Bilanzierung annehmen, kann im Vergleich zum ORC-Standardkonzept durch eine mehrstufige Entspannung mehr Wärme in Strom umgewandelt werden [3], [4], [5] und [6].

Abbildung 9: Vereinfachtes Schaltschema eines zweistufigen ORC mit Teilstromabführung (ohne Rekuperator).



Überkritischer ORC. Der grundlegende Unterschied zwischen einem konventionellen und einem überkritischen ORC (Abbildung 10) ist die Verdichtung des Arbeitsmittels vor der Wärmezufuhr über den kritischen Druck hinaus. Dadurch sind bei angepassten Arbeitsmitteln und Thermalwassertemperaturen hohe Wirkungsgradsteigerungen möglich. Wegen des Isobarenverlaufs benötigt man im überkritischen Bereich arbeitsmittelspezifische Mindesttemperaturen des Thermalwassers. Im Kraftwerk werden höhere Betriebsdrücke erreicht. Dadurch entsteht ein höherer apparativer Aufwand. Entsprechende Rohrleitungen und Dichtungen (insbesondere bei den Wärmeübertragern) müssen deutlich druckfester dimensioniert werden. Durch die insgesamt höheren Betriebsdrücke kann sich das Risiko von Leckagen im Betrieb erhöhen. Bei diesen Konzepten werden in der Regel zusätzlich Leckageüberwachungssysteme installiert. Der Einsatz überkritischer ORC-Konzepte bei Geothermiekraftwerken ist relativ neu; in Deutschland wird bisher kein Geothermiekraftwerk mit einem überkritischen ORC betrieben. Wir nehmen für die Bilanzierung an, dass keine Einbußen in der Anlagenverfügbarkeit durch den Einsatz des überkritischen ORC folgen [3], [4], [5] und [6].

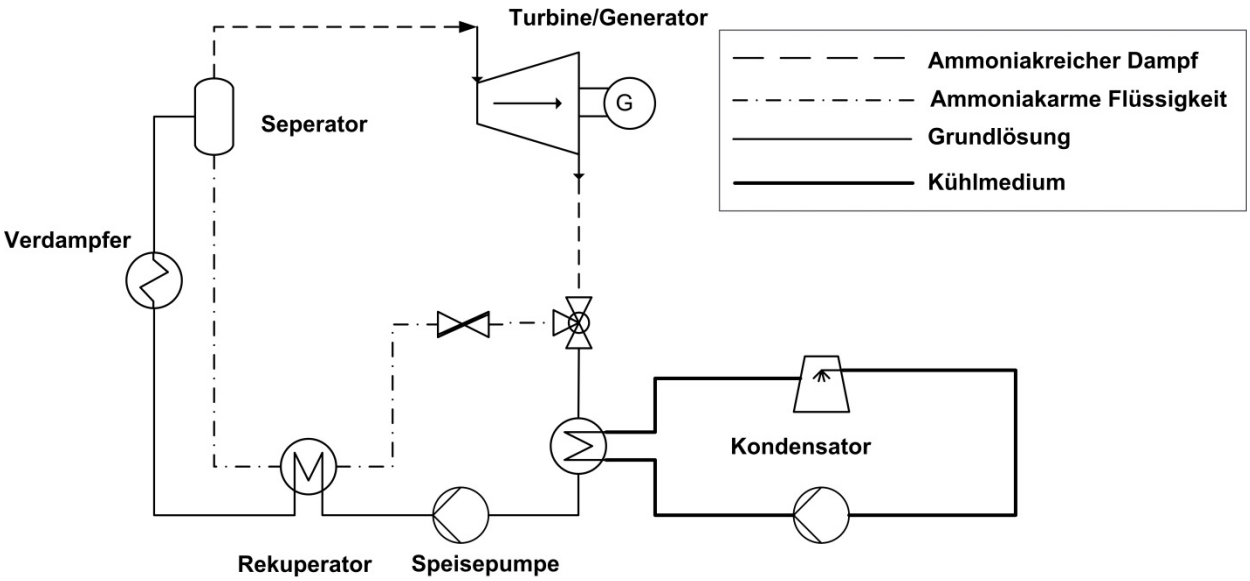
Abbildung 10: Vereinfachtes Schaltschema eines überkritischen ORC.



Stoffgemische. Alternativ zu den bisher üblichen Reinstoffen als Arbeitsmittel können auch Stoffgemische verwendet werden. Die Stoffgemische können aus organischen oder anorganischen Stoffen bestehen [3], [4], [5] und [6]. Beide Optionen werden nachstehend dargestellt.

- Bei dem Einsatz organischer Stoffgemische (speziell zeotroper Stoffgemische im Fall eines ORC-Kraftwerkes) sind die Konzepte im Aufbau und der Prozessführung dem ORC-Standardkonzept sehr ähnlich. Der Vorteil eines zeotropen Stoffgemisches ist, dass der Phasenübergang bei der Verdampfung und der Kondensation nicht-isotherm erfolgt [3]. Ob – und in welcher Höhe – ein apparativer Mehraufwand in ORC-Kraftwerken besteht, kann auf Grund des geringen Reifegrades dieses ORC-Konzeptes noch nicht sicher abgeschätzt werden [3], [4], [5] und [6].
- Im Kalina-Prozess wird als Arbeitsmittel ein Gemisch aus Ammoniak und Wasser eingesetzt. Eine prinzipielle Anordnung der Komponenten des Kalina-Kreislaufes zeigt Abbildung 11. Das Ammoniak-Wasser-Gemisch wird in einem Wärmeübertrager durch das Thermalwasser erwärmt und anschließend verdampft. Wegen der Siedepunktabstände der beiden Komponenten entstehen dabei ammoniakreicher Dampf und eine ammoniakarme Flüssigkeit. Die beiden Phasen werden in einem Separator voneinander getrennt. Der ammoniakreiche Dampf wird in der Turbine entspannt. Danach werden beide Stoffströme wieder zusammengeführt und im Kondensator vollständig verflüssigt; danach wird das Stoffgemisch auf den Verdampferdruck gebracht und der Kreislauf beginnt von neuem. Zur Verbesserung der energetischen Effizienz werden in den Kreislauf für eine interne Vorwärmung des Arbeitsmittels zusätzliche Wärmeübertrager (Rekuperatoren) eingefügt. In Abbildung 11 befindet sich ein Rekuperator zwischen der heißen ammoniakarmen Lösung und der kalten Basislösung. Insbesondere bei geringen Thermalwassertemperaturen (d. h. bis 130 °C) liegt ein Vorteil des Prozesses mit Stoffgemischen darin, dass die Verdampfung und die Kondensation des Arbeitsmediums nicht isotherm, wie bei reinen Stoffen (ORC-Standardprozess), sondern in einem Temperaturbereich ablaufen. Neben dem energetischen hat der Kalina-Prozess auch bautechnische Vorteile. Wegen der Ähnlichkeit der Stoffeigenschaften von Wasser und Ammoniak in Bezug auf die Entspannung können Wasserdampfturbinen verwendet werden. Ammoniak-Wasser-Gemische finden seit langem in anderen Gebieten der Technik (z. B. Kältetechnik) breite Anwendung [3], [4], [5] und [6]. Nachteilig sind deutlich größere Bauteile wegen der geringeren Temperaturdifferenzen in den Wärmeübertragern und des schlechteren Wärmeübertragungsverhaltens. Weltweit gibt es bisher nur wenige Kalina-Anlagen; das vorhandene Erfahrungspotenzial ist daher gering [3], [4], [5] und [6].

Abbildung 11: Vereinfachtes Schema eines Kalina-Prozesses [3].



2.3.2.2 Komponenten des Kraftwerksprozesses

Die wesentlichen Komponenten des Kraftwerksprozesses sind Verdampfer, Turbine, Kondensator und Speisepumpe. Diese Komponenten werden im Folgenden diskutiert [3], [4], [5] und [6].

Wärmeübertrager als Verdampfer. Im Verdampfer wird das im Kreislauf befindliche flüssige Arbeitsmittel durch die Aufnahme von Wärme aus dem Thermalwasser in die Gasphase überführt (verdampft). Für einen technisch effizienten Betrieb sollten diese Wärmeübertrager eine möglichst geringe Grädigkeit (d. h. Temperaturdifferenz) zwischen Thermalwasser und dem Arbeitsmittel gewährleisten. Dazu werden in der Regel Plattenwärmeübertrager verwendet, die halb- und vollverschweißt ausgeführt werden können. In Kalina-Anlagen werden wegen der erhöhten Betriebsdrücke und der Toxizität des Arbeitsmittels nur vollverschweißte Plattenwärmeübertrager eingesetzt. In ORC-Anlagen können dagegen, aufgrund der relativ geringen Betriebsdrücke, halbverschweißte Wärmeübertrager genutzt werden. Parallel dazu können im ORC-Kreislauf auch Rohrbündelverdampfer eingesetzt werden [3], [4], [5] und [6].

Die Materialaufwendungen für den Wärmeübertrager werden direkt von der zu übertragenden Wärmemenge bestimmt. In [1] werden hierfür rund 7 kg/kW_{th} Stahl angegeben. Aus der Betreiberumfrage hat sich ergeben, dass hier nur rund 2,5 kg/kW_{th} Stahl zu berücksichtigen sind.

Turbine. Als Strömungskraftmaschinen wandeln Turbinen die Strömungsenergie von Gasen oder Flüssigkeiten in Bewegungsenergie um und übertragen diese an die Turbinenwelle. Die in den in Frage kommenden Kraftwerksprozessen eingesetzten Turbinen können nach der Form des Laufrades in Axial- und Radialturbinen unterschieden werden. Bei Axialturbinen durchströmt das gasförmige Kreislaufmedium das Aggregat parallel zur Turbinenachse. Derartige Strömungsmaschinen werden im Allgemeinen für große Volumenströme und relativ geringe Drücke ausgelegt. Durch Radialturbinen strömt das Arbeitsmittel zentripetal oder häufiger zentrifugal. Bei zentrifugaler Durchströmung tritt der Dampf axial in die Turbine ein und verlässt sie radial [3], [4], [5] und [6].

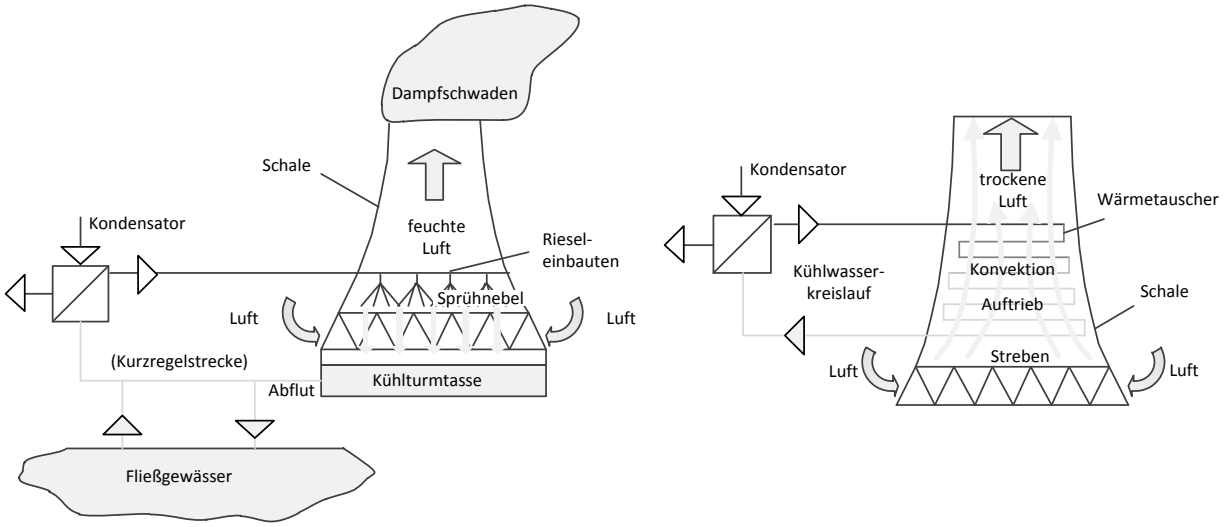
Generator. An die Turbinenwelle wird ein handelsüblicher Generator installiert, der die Rotationsenergie der Turbinenwelle in elektrische Energie umwandelt [3], [4], [5] und [6].

Wärmeübertrager als Kondensator, Verflüssiger. Im Kondensator oder Verflüssiger wird das aus der Turbine austretende dampfförmige Arbeitsmittel wieder verflüssigt. Die Wärme des Arbeitsmit-

teldampfes wird abgeführt. Prinzipiell ist die Wärmeabfuhr durch Frischwasser-, Verdunstungs- oder Trockenkühlung möglich. Zur Verdunstungskühlung gibt es Nass-, Trocken- und Hybridkühltürme. Abbildung 12 zeigt beispielhaft entsprechende Kühlsysteme [3], [4], [5] und [6]. Die Art des Kondensators bestimmt die Ergebnisse der Ökobilanz. So sind für eine direkte Luftkühlung die höchsten und für die direkte Wasserkühlung die geringsten Energie- und Materialaufwendungen beim Bau zu berücksichtigen [1].

Für die Kondensationsanlage (Verdunstungskühlung) wird nach [1] rund 1,5 t/MW_{th} an niedriglegierten Stahl eingesetzt. Aus der Datenabfrage wurde ein Materialaufwand von rund 16 t/MW_{th} an niedriglegierten Stahl ermittelt (Trockenkühlung).

Abbildung 12: Prinzip des Nass- (links) und Trockenkühlturmes (rechts) [3].



Speisepumpe. Die Speisepumpe erhöht den Druck des Arbeitsmittels vor dem Verdampfer. Als Speisepumpe kann eine radial bzw. halbaxial durchströmte, drehzahlvariable Kreiselpumpe oder seltener eine Kolbenpumpe verbaut werden. Die Pumpe wird durch einen Elektromotor angetrieben [3], [4], [5] und [6].

Arbeitsmittel. In geothermischen Kraftwerken werden als Arbeitsmittel in erster Linie organische Stoffe oder Gemische (in Organic-Rankine-Kreisläufen), aber auch anorganische Gemische (in Kalina-Kreisläufen) eingesetzt. Die organischen Arbeitsmittel sollten aus kältetechnischer Sicht eine möglichst niedrige kritische Temperatur und gleichzeitig einen geringen kritischen Druck, einen niedrigen Siedepunkt, ein geringes spezifisches Volumen und eine hohe Wärmeleitfähigkeit haben. Die Arbeitsmittel sollten möglichst ungiftig, nicht brennbar und nicht korrosiv sein. Sie dürfen kein Ozonabbaupotenzial (ODP) besitzen und sollten kein oder nur ein sehr geringes Treibhauspotenzial (GWP) haben [3], [4], [5] und [6].

Im Kalina-Kreislauf wird ein Gemisch aus Wasser und Ammoniak als Arbeitsmittel eingesetzt. Ammoniak ist brennbar und giftig, hat aber kein ODP und kein Treibhauspotenzial.

Für alle übrigen aufgeführten Kraftwerkskomponenten können keine spezifischen Angaben zu Material- und Energieverbräuchen ermittelt werden. Pauschal werden in [1] für das ORC-Kraftwerk Materialaufwendungen von 38 kg/kW_{el} an niedriglegierten Stahl, 1,2 kg/kW_{el} an Kupfer und 0,3 kg/kW_{el} organisches Arbeitsmittel angegeben. Die in dieser Arbeit ermittelten Werte für die unterschiedlichen Kraftwerke weichen zum Teil davon ab (Anhang B).

2.3.3 Zusätzliche Aggregate für Heizwerke

Für eine geothermische Wärmebereitstellung, wie sie mit geothermischen Heizzentralen realisiert werden kann bzw. im hier betrachteten Fall für die zusätzlich zur Stromerzeugung aus Heizkraftwerken ausgekoppelte Wärmebereitstellung, werden weitere Systemkomponenten benötigt. Darunter fallen Wärmeübertrager, Spitzenlastaggregate und Systeme zur Wärmeverteilung; sie werden im Folgenden diskutiert [3], [4], [5] und [6].

Wärmeübertrager. Die thermische Energie des Thermalwassers muss energetisch effizient und möglichst kostengünstig in der Heizzentrale auf ein Sekundärmedium übertragen werden. Dazu kommen vorwiegend geschraubte, und bei hochkorrosiven Medien verschweißte Plattenwärmeübertrager zum Einsatz. Mit dieser Wärmeübertragertechnik können geringe Temperaturdifferenzen (bis zu 1 K zwischen den Medien), hohe Wärmeübergangskoeffizienten, geringe Bauvolumen bzw. -geometrien sowie eine ausreichende Druckstabilität gewährleistet werden. Geschraubte bzw. halbverschweißte Plattenwärmeübertrager sind einfach ein- und auszubauen, d. h. sie sind reparatur- und wartungsfreundlich [3], [4], [5] und [6].

Für die Energie- und Materialaufwendungen gelten hier gleiche Annahmen wie für die Wärmeübertrager des Kraftwerkes.

Spitzenlast- und Redundanzaggregate. Heizzentralen zur Bereitstellung von Nah- und Fernwärme werden im Allgemeinen durch eine Kesselanlage ergänzt, die mit fossilen oder biogenen Brennstoffen beheizt wird. Sie dient zum Ausgleich saisonaler und täglicher Leistungsspitzen sowie zum Auffangen eines störungsbedingten Ausfalls. Diese Anlage muss ausreichend groß dimensioniert werden, so dass sie im Havariefall die vollständige Wärmenachfrage aller angeschlossenen Verbraucher sicher decken kann [3], [4], [5] und [6].

Für die Spitzen- und Redundanzanlagen fallen rund 2,6 kg/kW$_{th}$ an niedriglegierten Stahl an [1].

Fernwärmenetz. Um die geothermisch bereitgestellte Niedertemperaturwärme an in der Fläche verteilte Verbraucher (z. B. Haushalte, Industrie) zu transportieren, werden in Deutschland in der Regel wasserbetriebene Verteilungssysteme eingesetzt. Diese können prinzipiell als Ein-, Zwei-, Drei- oder Vierleitersystem ausgelegt werden. Bisher haben sich fast ausschließlich Zweileitersysteme durchgesetzt. Sie dienen in der Regel zur Versorgung der angeschlossenen Verbraucher mit Raumwärme und Brauchwarmwasser. Derzeit werden primär Kunststoffmantelrohre mit einem Stahlmediumrohr verbaut. Als Unterverteilung und Hausanschlussleitungen können sehr flexible Metall- oder Kunststoffmediumrohre eingesetzt werden. Als Bindeglied zwischen dem Nah- bzw. Fernwärmenetz und der Hausanlage (d. h. Heizungsanlage) werden Hausübergabestationen installiert, die standardisiert und vormontiert inklusive aller Anlagenkomponenten geliefert und dann vor Ort als Fertigbauteil verbaut werden. Diese Hausübergabestationen können als direkte und indirekte Systeme ausgeführt werden. Um Korrosion und Ablagerungen in den Rohrleitungen zu minimieren, wird das verwendete Wasser entsalzt, von mechanischen Verunreinigungen befreit und mit geeigneten Chemikalien alkalisiert [3], [4], [5] und [6].

2.4 Stand der Nutzung von Geothermieanlagen

Nachfolgend wird der Stand der Nutzung der tiefen Geothermie in Deutschland für das Jahr 2013 dargestellt. Die folgenden Ausführungen basieren auf der Veröffentlichung in [9].

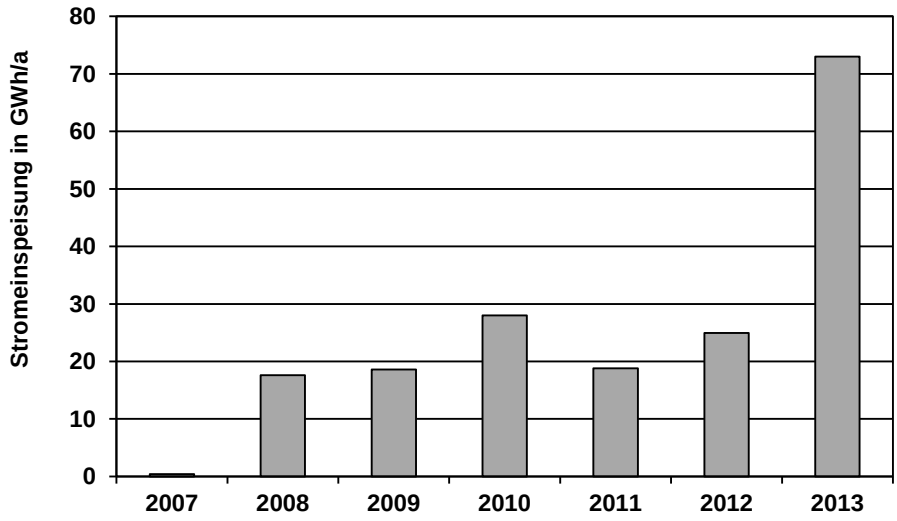
Derzeit werden geothermische Kraft- bzw. Heizkraftwerke ausschließlich im Oberrheingraben und im süddeutschen Molassebecken realisiert; im norddeutschen Becken wird der tiefe Untergrund gegenwärtig nur für die Wärmebereitstellung genutzt [9], [10], [11], [12] und [13].

Geothermische Anlagen zur Bereitstellung von Strom bzw. zur kombinierten Bereitstellung von Strom und Wärme befinden sich in Landau, in Bruchsal, in Insheim (alle Oberrheingraben), in Unterhaching, in Sauerlach, in Kirchstockach und in Dürrnhaar (alle süddeutsches Molassebecken). Insgesamt gibt es in Deutschland sieben geothermische Kraft- bzw. Heizkraftwerke (Stand 2013). Die installierte elektrische Leistung dieses geothermischen Kraftwerkparks lag Ende 2013 bei rund 30 MW. Die durch diese Anlagen eingespeiste elektrische Energie (d. h. Bruttostromerzeugung) hat sich dabei im Vergleich zu 2012 nahezu verdreifacht (2013: 76 GWh, 2012: 25 GWh, Abbildung 13 [9], [10], [11], [12] und [13]).

Voraussichtlich gehen in den kommenden Jahren mindestens drei weitere geothermische (Heiz-) Kraftwerke mit einer elektrischen Gesamtleistung von rund 15 MW in den (Probe-)Betrieb [9], [10], [11], [12] und [13].

In Deutschland wurden im Jahr 2013 zwischen 20 und 30 Anlagen für eine ausschließliche geothermische Nah- und Fernwärmebereitstellung mit einer geschätzten thermischen Gesamtleistung von 210 MW betrieben. Diese geothermischen Heizwerke stellten im Jahr 2013 etwa 500 GWh Wärme bereit [9], [10], [11], [12] und [13].

Abbildung 13: Bereitgestellter Strom aus tiefer Geothermie [9], [10], [11], [12] und [13].



3 Technische Analyse

Aus den Ergebnissen einer Datenerhebung wurden geothermische Anlagen mit und ohne umgesetzte Maßnahmen zur Effizienzsteigerung abgeleitet und nach der Art der Effizienzsteigerung in Typen klassifiziert. In einem weiteren Schritt wurden diese Anlagengrundtypen in Modellanlagen überführt und an Hand einer Fließschema-Simulationssoftware modelliert; dabei wurde der Einsatz verschiedener Arbeitsmittel in den Modellanlagen untersucht. Abschließend wurden die technischen Kennwerte der Modellanlagen bei einem Einsatz der unterschiedlichen Arbeitsmittel verglichen.

3.1 Datenerhebung

Informationen zu technischen Konzepten und Daten zur Strom- und Wärmebereitstellung wurden speziellen Datenbanken und Veröffentlichungen entnommen [10], [11], [12] und [13]. Daten und Informationen, die nur mit einer geringen Datenzuverlässigkeit gewonnen werden konnten, wurden durch eine Befragung von ORC-Anlagenbetreibern ergänzt. Der an die Betreiber versandte Fragebogen ist dem Anhang B (Tabelle 22) beigefügt.

Für die untersuchten Anlagen sind die Mehrzahl der Anlagenkenndaten aus öffentlich zugänglichen Datenbanken und Publikationen verfügbar. Angegeben sind aber oft nur Plandaten (z. B. geologische Kenndaten und elektrische Kraftwerksleistung). Soweit nachfolgend nicht anders beschrieben, wurden:

- die Angaben zur installierten elektrischen Nettoleistung aus der elektrischen Bruttoleistung geschätzt (Annahme: Nettoleistung ist 80 % der Bruttoleistung),
- als Emissionsfaktoren für die Freisetzung des Arbeitsmittels die Werte verwendet, die für die Emissionsberichterstattung Deutschlands im Rahmen der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) [14] für ORC -Kreisläufe ermittelt und verwendet wurden. Dies sind für die Erstbefüllung der Anlage (Bau) 2 %, für den Betrieb 4 % pro Jahr und für die Entsorgung (Rückbau) 20 % der Arbeitsmittelfüllmenge. Diese Faktoren werden hier auch für die Kalina-Kreisläufe angenommen.
- die geothermischen Förderleistungen sowie die Netto- und Bruttowirkungsgrade jeweils aus den geologischen Rahmendaten und erhobenen elektrischen Leistungen berechnet (Kapitel 3.2.1).

Im nachfolgenden Text werden die Begriffe Wirkungsgrad und Effizienz als Synonyme verwendet. Eine Steigerung des Wirkungsgrades hat dabei immer eine Erhöhung der Effizienz zur Folge.

Bei der Angabe des Wirkungsgrades wird ausschließlich der Nettowirkungsgrad berücksichtigt (d. h. Generatorklemmleistung abzüglich der elektrischen Eigenverbräuche). Es wird weiterhin zwischen Kraftwerkswirkungsgrad η_{KW} und Anlagenwirkungsgrad η_{A} unterschieden. Beim Kraftwerkswirkungsgrad werden ausschließlich die elektrischen Eigenverbräuche im Kraftwerk (d. h. Speisepumpe, Kühlaggregate) und beim Anlagenwirkungsgrad zusätzlich dazu der Eigenverbrauch der Tiefpumpe berücksichtigt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Datenerhebung dargestellt. Es wird dabei zwischen Anlagen ohne und Anlagen mit Effizienzsteigerungsmaßnahmen unterschieden.

3.1.1 Anlagen ohne umgesetzte Effizienzsteigerungsmaßnahmen

Insgesamt wurden drei bestehende geothermische Anlagen zur Strom- bzw. kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung in Deutschland und dem europäischen Ausland mit ähnlichen geologischen Gegebenheiten ohne umgesetzte Effizienzsteigerungsmaßnahmen (d. h. unterkritische, einstufige

ORC-Kraftwerke mit einem Reinstoff) ermittelt. Die Ergebnisse der Datenerhebung werden nachfolgend beschrieben. Alle bestehenden Anlagen ohne umgesetzte Effizienzsteigerungsanlage befinden sich im Oberrheingraben.

Anlage A. Im Jahr 2012 wurden vom Kraftwerk 13,5 GWh elektrische Energie (Brutto) in das Stromnetz eingespeist. Optional könnten zusätzlich bis zu 5 MW thermische Leistung ausgekoppelt werden, eine Wärmebereitstellung wurde bisher noch nicht realisiert. Als Arbeitsmittel wird in dieser Anlage Isopentan eingesetzt. Das nutzbare hydrothermale Reservoir wird durch eine Dublette (d. h. zwei Bohrungen) erschlossen und liegt im Vergleich zu den anderen Anlagen in der geringsten Tiefe. Die energietechnischen Daten (Wirkungsgrade und elektrische Leistung) für das Kraftwerk bewegen sich im Mittelfeld der hier untersuchten Anlagen.

Anlage B. Die Erzeugung der elektrischen Energie lag 2012 bei rund 29 GWh (Brutto). Zusätzlich könnte Wärme bis zu 10 MW genutzt werden; die Wärme wurde bisher nicht zur Nutzung bereitgestellt. Als Arbeitsmittel wird Isopentan verwendet. Das genutzte hydrothermale Reservoir befindet sich, im Vergleich zu den hier diskutierten Anlagen, in einer mittleren Tiefe und wird durch eine Dublette erschlossen Die Fördertemperatur liegt im selben Bereich wie bei Anlage A, wegen der höheren Thermalwasserförderrate kann aber die höchste geothermische Wärmeleistung (im Vergleich der betrachteten Anlagen A bis C) genutzt werden. Unter den identifizierten Anlagen ohne umgesetzte Effizienzsteigerungsmaßnahmen hat Anlage B rechnerisch den höchsten Wirkungsgrad. .

Anlage C. Anlage C nutzt ein petrothermales Reservoir, das durch eine Triplette (d. h. drei Bohrungen) erschlossen wird. Diese Anlage wird nicht kommerziell betrieben; es handelt sich um ein internationales Forschungsprojekt. Es konnten hier keine Jahresdaten zur Erzeugung der elektrischen Energie erhoben werden, für die Berechnungen wurde die Energieerzeugung für 5.500 h/a (d. h. jährliche Volllaststunden) geschätzt. Als Arbeitsmittel wird Isobutan eingesetzt. Mit der Anlage C werden ohne Effizienzsteigerungsmaßnahmen im Vergleich zu den Anlagen A und B die geringsten Wirkungsgrade und elektrischen Leistungen realisiert.

3.1.2 Anlagen mit umgesetzten Effizienzsteigerungsmaßnahmen

In Deutschland und im europäischen Ausland mit sehr ähnlichen geologischen Gegebenheiten wurden sechs geothermische Kraft- bzw. Heizkraftwerke mit umgesetzten Effizienzsteigerungsmaßnahmen ausgewählt. Die Ergebnisse der Datenerhebung werden nachstehend diskutiert. Unterschieden wird dabei in Anlagen mit einem zweistufigen ORC, Anlagen mit Stoffgemischen und Anlagen mit sonstigen Effizienzsteigerungsmaßnahmen. Bei allen ausgewählten Anlagen wird der ORC-Kreislauf unterkritisch[1] betrieben. In Tabelle 1 sind die in der Datenerhebung berücksichtigten Geothermieanlagen zusammengefasst. Die Beschreibung der einzelnen Anlagen mit umgesetzten Effizienzsteigerungen findet sich in den folgenden Kapiteln 3.1.2.1 bis 3.1.2.3.

[1] d.h. das jeweilige Arbeitsmittel befindet sich nie im sog. überkritischen Zustand. Der Bereich, bei dem sich ein Arbeitsmittel im überkritischen Zustand befindet, ist aus den kältetechnischen Phasendiagrammen ablesbar.

Tabelle 1: Zusammenfassung der in der Datenerhebung berücksichtigten Geothermieanlagen

Anlage	Kraftwerkskonzept	Anteil Eigenbedarf	Arbeitsmittel
Anlage A bis C	einstufiges ORC-Kraftwerk	20 %	organischer Reinstoff mit geringem GWP
Anlage D bis F	zweistufiges ORC-Kraftwerk	30 %	organischer Reinstoff mit hohem GWP
Anlage G und H	einstufiges Kalina-Kraftwerk	20 bzw. 40 %	anorganisches Stoffgemisch mit geringem GWP
Anlage I	einstufiges ORC-Kraftwerk	30 %	organisches Stoffgemisch mit sehr hohem GWP

3.1.2.1 Zweistufige ORC-Kraftwerke

Insgesamt gibt es in Deutschland drei geothermische Kraftwerke mit zweistufigen ORC-Kreisläufen. Es wird hier jeweils ein zweistufiges ORC-Kraftwerk mit zwei getrennten Modulen realisiert (Kapitel 2.3.2.1). Alle Anlagen befinden sich in Süddeutschland (im süddeutschen Molassebecken) und wurden 2013 fertiggestellt. Die Fördertemperatur ist bei diesen Anlagen in einer ähnlichen Größenordnung. Als Arbeitsmittel wird jeweils 1,1,1,3,3-Pentafluoropropan (R245fa) genutzt. Die Angaben zur installierten elektrischen Nettoleistung wurden geschätzt. Der Eigenbedarf ist hier wegen der umgesetzten Effizienzsteigerung im Kraftwerk höher, so dass die Nettoleistung mit 70 % der elektrischen Bruttoleistung angenommen wird.

Anlage D. Die erzeugte elektrische Energie für Anlage D wird mit 31 GWh/a (Brutto) abgeschätzt. Optional kann zusätzlich eine thermische Leistung von 4 MW Wärme bereitgestellt werden; die Wärmeauskopplung wurde bisher nicht realisiert. Für die Nutzung des hydrothermalen Reservoirs wurden hier die meisten Bohrmeter niedergebracht; das hydrothermale Reservoir wurde mit einer Triplette (d. h. eine Produktions- und zwei Reinjektionsbohrungen) erschlossen. Im Vergleich der Anlagen untereinander wird hier die geringste Menge an Thermalwasser gefördert. Für diese Anlage ergibt sich der höchste (berechnete) Wirkungsgrad.

Anlage E und Anlage F. Diese Anlagen sind in ihren geologischen und technischen Kenndaten nahezu identisch; es wird das gleiche technische Konzept genutzt. Es wurde jeweils eine Dublette abgeteuft. Im Vergleich zur Anlage D sind die Bohrtiefen geringer und es werden höhere Thermalwasserraten pro Anlage gefördert. Die installierte elektrische Leistung des Kraftwerks liegt wegen der günstigeren geologischen Parameter leicht höher, wodurch insgesamt etwas mehr elektrische Energie bereitgestellt werden kann als mit der Anlage D (ca. 33 GWh/a, Brutto). Der Brutto-Wirkungsgrad ist für die Anlagen E und F geringfügig kleiner als für Anlage D. Eine gekoppelte Wärmeversorgung ist möglich, soll mit diesen Anlagen vorläufig aber nicht realisiert werden.

3.1.2.2 Kraftwerke mit Stoffgemischen

Insgesamt wurden in Deutschland zwei Anlagen ermittelt, in denen Kraftwerke mit Stoffgemischen verbaut sind. Diese werden nachfolgend dargestellt. Bei beiden Anlagen wird ein Kalina Kraftwerk eingesetzt, d. h. es wird ein Stoffgemisch aus Ammoniak und Wasser als Arbeitsmittel verwendet.

Anlage H. Diese Anlage wird im Oberrheingraben als Forschungskraftwerk betrieben. Hier wurden im Jahr 2012 rund 2,75 GWh elektrische Energie erzeugt (Brutto); eine Wärmebereitstellung wird derzeit nicht realisiert. Für die elektrische Leistung ergibt sich bei Anlage H ein leicht höherer Bruttowirkungsgrad als bei Anlage G. Der Nettowirkungsgrad liegt hier deutlich höher; es wurde auf Grund der geringeren Thermalwasserförderrate ein geringerer Eigenverbrauch (20 %) unterstellt.

Anlage G. Diese Anlage befindet sich im süddeutschen Molassebecken und wird wärmegeführt betrieben. Im Jahr 2012 wurden rund 8,4 GWh (Brutto) elektrische Energie und rund 108 GWh Wärme erzeugt. Hier wird im Vergleich zur Anlage H fünf Mal so viel Thermalwasser gefördert. Das hydrothermale Reservoir liegt rund 1.000 m tiefer als für die Anlage E. Der Eigenenergiebedarf wird auf 40 % der elektrischen Bruttoleistung geschätzt.

3.1.2.3 Kraftwerke mit sonstigen Effizienzsteigerungsmaßnahmen

Eine weitere Möglichkeit zur Effizienzsteigerung ist in einer Anlage in Österreich realisiert. Hier wird ein zeotropes Stoffgemisch in einem unterkritischen ORC-Kraftwerk eingesetzt.

Anlage I. Diese Anlage nutzt ebenfalls ein hydrothermales Reservoir. Für die Anlage konnten nicht alle Kenndaten erhoben werden. Die geschätzte Strombereitstellung beträgt rund 6 GWh/a (Brutto) und die geschätzte Wärmebereitstellung 24 GWh/a (Annahme: Vollaststunden Strom 6.000 h/a, Wärme 2.000 h/a). Als Arbeitsmittel wird ein Gemisch aus 65% Pentafluorbutan (365mfc) und 35% perfluoriertem Ether eingesetzt (Handelsname: Solkatherme SE 36 (SES 36)). Die Anlage wird unterkritisch gefahren, der Eigenbedarf wird auf 30 % der elektrischen Bruttoleistung geschätzt.

3.2 Ableitung der Anlagengrundtypen

Aus den Ergebnissen der Datenerhebung wurden Anlagengrundtypen abgeleitet und nach der Art der Effizienzsteigerung eingeteilt:

- Typ 1: Ohne umgesetzte Maßnahmen zur Effizienzsteigerung
- Typ 2: Mit umgesetzter Maßnahme zur Effizienzsteigerung – Zweistufiger ORC
- Typ 3: Mit umgesetzter Maßnahme zur Effizienzsteigerung – Kraftwerke mit Stoffgemisch
- Typ 4: Mit umgesetzter Maßnahme zur Effizienzsteigerung – Sonstige

3.2.1 Vorgehen

Um die Anlagengrundtypen vergleichen zu können, wurden für alle Anlagengrundtypen einheitliche geologische Rahmenannahmen zugrunde gelegt.

- Die Thermalwassertemperatur wird auf $\vartheta_F = 150$ °C,
- die Förderrate auf $V_F = 120$ l/s,
- die Umgebungstemperatur auf $\vartheta_U = 15$ °C und
- die spezifische Wärmekapazität des Thermalwassers auf $c_{p,W} = 4{,}2$ kJ/kgK festgelegt.
- Zusätzlich wird unterstellt, dass ein hydrothermales Reservoir über eine Dublette (d. h. eine Förder- und eine Reinjektionsbohrung) erschlossen wird.

Die Kondensation im Kraftwerk wird mit einer direkten Luftkühlung durchgeführt (15 °C). Die geothermische Förderleistung P_{QF} wird wie folgt bestimmt:

$$P_{QF} = \dot{m}_F \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_F - \vartheta_U) \qquad \text{Gleichung 1}$$

P_{QF} Geothermische Förderleistung in kW

$\dot{m}_F$ Förderrate (auf die Masse m bezogen: $\dot{m}_F = \rho_F \, d\, V_F / dt$, mit ρ_F, V_F Fluiddichte und -volumen)

$c_{p,W}$ Spezifische Wärmekapazität des Thermalwassers (bei 20 °C)

ϑ_F Thermalwassertemperatur in °C

ϑ_U Temperatur der Umgebung (15 °C)

Für die Berechnung der Wirkungsgrade wird unterstellt, dass das Verhältnis von dem tatsächlichen Wirkungsgrad und dem Carnot-Wirkungsgrad (dem höchsten theoretisch möglichen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer in mechanische Energie) der Anlage temperaturunabhängig

ist. Dadurch wird es möglich, die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Anlagen auf die gewünschte Referenztemperatur (150 °C) zu beziehen.

Der Carnot-Wirkungsgrad e_c berechnet sich dabei aus:

$$e_C = 1 - \frac{T_u}{T_o} \qquad \text{Gleichung 2}$$

T_u Untere Prozesstemperatur in K
T_o Obere Prozesstemperatur in K

Der energetische Anlagenwirkungsgrad η_A ist der Quotient aus der elektrischen Leistung P_{el} und der mit dem Thermalwasser angebotenen geothermischen Förderleistung P_{QF} (Gleichung 1), die die für eine Stromumwandlung verfügbare Wärmeleistung angibt:

$$\eta_A = \frac{P_{el}}{P_{QF}}. \qquad \text{Gleichung 3}$$

Der energetische Kraftwerkswirkungsgrad $\eta_{KW,en}$ berechnet sich analog, allerdings ohne Berücksichtigung des Eigenverbrauchs der Tiefpumpe. Als weiteres Bewertungskriterium wird der Gütegrad angegeben. Dieser beschreibt das Verhältnis aus berechneten Anlagenwirkungsgrad η_A und dem Carnot-Wirkungsgrad e_c:

$$G = \frac{\eta_A}{e_C} \qquad \text{Gleichung 4}$$

Mit dem Ziel, den Anteil der im Thermalwasser enthaltenen Exergie zu ermitteln, die tatsächlich in Arbeit (d. h. elektrischen Strom) umgewandelt wird, erfolgte zusätzlich die Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades e_{ex}. Exergie stellt dabei den Anteil der Gesamtenergie eines Systems dar, der Arbeit verrichten kann.

Der Exergiefaktor e_{ex} berechnet sich aus:

$$e_{ex} = 1 - \frac{T_U}{T_{KW,m}} \qquad \text{Gleichung 5}$$

T_U Umgebungstemperatur in K

$T_{KW,m}$ Mittlere Thermalwassertemperatur in K

Als relevante mittlere Thermalwassertemperatur wurden die Temperaturen bei Eintritt ins Kraftwerk unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur bestimmt:

$$T_{KW,m} = \frac{(T_{KW,ein} - T_U)}{ln(\frac{T_{KW,ein}}{T_U})} \qquad \text{Gleichung 6}$$

$T_{KW,ein}$ Vorlauftemperatur am Kraftwerk in K

T_U Umgebungstemperatur in K

Um die Exergie Q_{ex} zu berechnen, ist anschließend der in das Kraftwerk eintretende Wärmestrom Q_{KW} mit dem Exergiefaktor e_{ex} zu multiplizieren:

$$Q_{ex} = Q_{KW} \cdot e_{ex}. \qquad \text{Gleichung 7}$$

Der eintretende Wärmestrom Q_{KW} ist die Summe der Wärmeleistungen, die aus Verdampfer und Vorwärmer ins Kraftwerk übertragen werden (bezogen auf Umgebungstemperatur T_U).

Der exergetische Wirkungsgrad η_{ex} wird dann berechnet als Quotient aus der elektrischen Leistung P_{el} und der Exergie Q_{ex} nach:

$$\eta_{ex} = \frac{P_{el}}{Q_{ex}}. \qquad \text{Gleichung 8}$$

Die wesentlichen für die Modellierung der Modellanlagen und Berechnung der energetischen sowie exergetischen Wirkungsgrade zugrunde gelegten Randannahmen sind nachfolgend aufgeführt:

- Umgebungstemperatur T_U = 288,15 K,
- Umgebungsluftdruck p_U = 1,01325 bar,
- minimale mittlere Temperaturdifferenz bei der Verdampfung ΔT = 5 K,
- minimale mittlere Temperaturdifferenz bei der Kondensation ΔT = 7 K,
- Temperatur des Kühlmediums T_W = 288,15 K (direkte Trockenkühlung),
- isentrope Wirkungsgrade der Turbine bzw. Pumpe η_I = 85 bzw. 75 %.

Um die ökobilanzielle Betrachtung für die Gesamtanlagen durchführen zu können, wird über den durchschnittlichen Temperaturgradienten der Anlagen, der aus der Datenerhebung bekannt ist, die durchschnittliche Bohrtiefe B_t für die berücksichtigten Gesamtanlagen berechnet:

$$B_t = \frac{\vartheta_F}{G_T}$$ Gleichung 9

G_T Temperaturgradient

ϑ_F Thermalwassertemperatur

3.2.2 Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt die technischen Kennwerte der aus der Datenerhebung abgeleiteten Anlagengrundtypen. Ausgehend von den definierten geologischen Rahmenannahmen liegt bei allen Anlagengrundtypen eine geothermische Förderleistung von 68 MW zugrunde.

Für die Kraftwerke des Anlagengrundtyps 2 (Anlagengrundtyp mit umgesetzter Maßnahme zur Effizienzsteigerung – zweistufiger ORC) und Typ 1 (Anlagengrundtyp ohne umgesetzte Maßnahmen zur Effizienzsteigerung) ergeben sich hohe Anlagenwirkungsgrade, hier werden die Kraftwerke mit den höchsten elektrischen Leistungen berechnet und die höchste Menge an elektrischer Energie produziert. Kleinere Anlagenwirkungsgrade wurden für die Kraftwerke des Anlagengrundtyps Typ 4 (Anlagengrundtyp mit umgesetzter Maßnahme zur Effizienzsteigerung – Sonstige) und Typ 3 (Anlagengrundtyp mit umgesetzter Maßnahme zur Effizienzsteigerung – Kraftwerke mit Stoffgemisch) ermittelt. Bei den Kraftwerken Typ 3 und 4 wurden daher die geringsten installierten elektrischen Kraftwerksleistungen berechnet; es wird die geringste Menge an elektrischer Energie bereitgestellt. Es zeigt sich, dass die Temperaturgradienten bei den Anlagengrundtypen Typ 2 und Typ 4 am geringsten sind; hier müssen die Bohrungen am tiefsten niedergebracht werden.

Bei Berücksichtigung des elektrischen Eigenbedarfes reduzieren sich die Anlagenwirkungsgrade und elektrischen Leistungen aller Kraftwerke (Annahme: 30 % Eigenbedarf, vgl. Tabelle 1, dieser Wert wird für alle Anlagengrundtypen unterstellt). Auch bei einer Nettobetrachtung ergeben sich die höchsten technischen Kennwerte für die Anlagen von Typ 2 und Typ 1. Mit allen Anlagengrundtypen kann kombiniert Wärme bereitgestellt werden.

Tabelle 2: Abgeleitete Anlagengrundtypen aus der Datenerhebung

	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Thermalwasser-temperatur	°C	150	150	150	150
Thermalwasser-förderrate	l/s	120	120	120	120
geoth. Förderleistung[1]	MW	68,0	68,0	68,0	68,0
el. Leistung, brutto	MW	4,3	6,0	3,7	1,7
Eigenbedarf	%	30	30	30	30
el. Leistung, netto	MW	3,0	4,2	2,6	1,1
Anlagenwirkungsgrad, brutto	%	6,4	8,8	5,5	2,4
Anlagenwirkungsgrad, netto	%	4,7	6,1	3,9	1,7
Carnot-Wirkungsgrad	%	31,9	31,9	31,9	31,9
Gütegrad	%	14,8	19,2	12,1	5,3
th. Leistung	MW	5,0	5,0	5,0	5,0
Arbeitsmittel		Isopentan	R245fa	Ammoniak/Wasser	SES 36
Arbeitsmittel GWP		5	1.030	0	4.121
WGK		2	1	2	k.A.
Volllaststunden Strom	h/a	6.500	6.500	6.500	6.500
Volllaststunden Wärme	h/a	2.000	2.000	2.000	2.000
el. Energie, brutto	GWh/a	28	39	24	11
el. Energie, netto	GWh/a	20	27	17	8
th. Energie	GWh/a	10	10	10	10

[1] Näherungsweise berechnet nach Gleichung 1

3.3 Simulation der Modellanlagen

Im Weiteren wird zunächst eine Gegenüberstellung der energetischen und exergetischen Kraftwerkswirkungsgrade (siehe Kapitel 3.2.1) bei einem Einsatz unterschiedlicher organischer Arbeitsmittel in Standard- und zweistufigen ORC-Konzepten für die in Deutschland typischen Thermalwassertemperaturen angegeben.

Für einen Vergleich wurden die abgeleiteten Anlagengrundtypen 1 und 2 (Kapitel 3.2) in Modellanlagen überführt und mit einer Fließschemasimulationssoftware modelliert. Zusätzlich dazu wurde der Einsatz weiterer Arbeitsmittel in den Modellanlagen untersucht und die berechneten technischen Kennwerte der Modellanlage Typ 1 – Standard ORC und Modellanlage Typ 2 – Zweistufiger ORC einander gegenübergestellt.

Für die abgeleiteten Anlagengrundtypen 3 und 4 sind weiterführende Modellierungen nicht sinnvoll. Im Kraftwerk des Anlagengrundtyps 3 kann kein anderes Arbeitsmittel eingesetzt werden und das Kraftwerk des Anlagengrundtyps 4 scheint aus gegenwärtiger nicht repräsentativ, so dass aus einer weiteren Modellierung kein erkennbarer Nutzen gezogen werden kann.

3.3.1 Vorgehen

Die geothermischen Kraftwerke wurden mit der Fließschemasimulationssoftware Aspen Plus modelliert. Das Programm Aspen Plus basiert auf einer umfangreichen Stoffdatenbank und zahlreichen Modellbauteilen, die die Simulation von Stoffumwandlungs- und Aufbereitungsprozessen mit kontinuierlichen Stoff- und Energieströmen ermöglichen. Für die Modellbauteile können in der grafischen Programmdarstellung anlagenspezifische Parameter ausgewählt und eingegeben werden. Der zu modellierende Prozess kann gleichungsorientiert oder sequentiell-modular berechnet werden. Um ein flexibles Modell zu schaffen, wurden die modellierten geothermischen Prozesse hier sequentiell-modular berechnet.

Aspen Plus stellt unterschiedliche Methoden zur Steuerung der Berechnung zur Verfügung. Die Variablen der im Modell enthaltenen Stoff- und Energieströme können variiert werden. Außerdem lassen sich Größen der im Fließbild (flowsheet) enthaltenen Modellbauteile (unit-operations, wie z. B. Wärmeübertrager) beeinflussen. Dazu werden Designspezifikationen oder Optimierungswerkzeuge verwendet, mit deren Hilfe für definierte Parameter, die normalerweise während der Simulation berechnet werden, Zielvorgaben in realistischen Grenzen vorgegeben werden, die Aspen Plus dann durch Variation einer oder mehrerer Simulationsvariablen einstellt. So kann beispielsweise eine geforderte Rücklauftemperatur oder ein bestimmter Arbeitsmittelmassenstrom eines geothermischen Kreisprozesses vorgegeben werden. Zur Lösung dieser Designspezifikation bzw. Optimierungswerkzeuge wird eine Konvergenzschleife erstellt, welche in die Berechnungssequenz des Fließbildes eingeordnet und iterativ gelöst wird. Als Ergebnis dieser Berechnung entstehen optimierte Modelle von geothermischen Prozessen.

In [15] wurden verschiedene thermodynamische Modelle an Hand realer Kraftwerksdaten des ORC-Kraftwerk Chena (USA) validiert. Die Ergebnisse der Validierung aus [14] von einer Simulation mit Aspen Plus und der Zustandsgleichung Peng-Robinson mit der Erweiterung von Bosten-Mathias (PR-BM [16]) für das ORC-Kraftwerkes Chena (USA) zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Validierung des Simulationsprogrammes mit der Zustandsgleichung Peng-Robinson mit der Erweiterung von Bosten-Mathias (PR-BM) mit realen Kraftwerksdaten (ORC-Kraftwerk Chena, USA) [15]

Parameter	Einheit	Originaldaten	Aspen Plus	Abweichung
$P_{el,\ brutto}$	in kW	250,00	250,61	0,24
η_K	in %	8,00	8,31	3,67

Es zeigte sich dabei, dass die mit Aspen Plus berechneten technischen Kennwerte nur geringfügig von den realen Kraftwerksdaten abweichen, so dass das die Fließschemasimulationssoftware Aspen Plus für die ORC-Modellierung als geeignet angesehen werden kann.

Als Arbeitsmittel wurden, neben den heute schon verwendeten Stoffen Isobutan, Isopentan und R245fa weitere Arbeitsmittel ausgewählt. R227ea, R245cb, FK649, HFE7000 sowie R1233zd(E) sind für den Einsatz in ORC-Kreisläufen in der Diskussion. Die Stoffe R227ea und R245cb sind allerdings wegen ihres sehr hohen Treibhauspotentials (GWP) aus Umweltsicht kritisch zu sehen (siehe Kapitel 5.6).

3.3.2 Ergebnisse

Zunächst werden die energetischen und exergetischen Kraftwerkswirkungsgrade bei einem Einsatz unterschiedlicher organischer Arbeitsmittel in Standard- und zweistufigen ORC-Konzepten für die in Deutschland typischen Thermalwassertemperaturen gegenübergestellt (Thermalwasserförderrate 70 l/s).

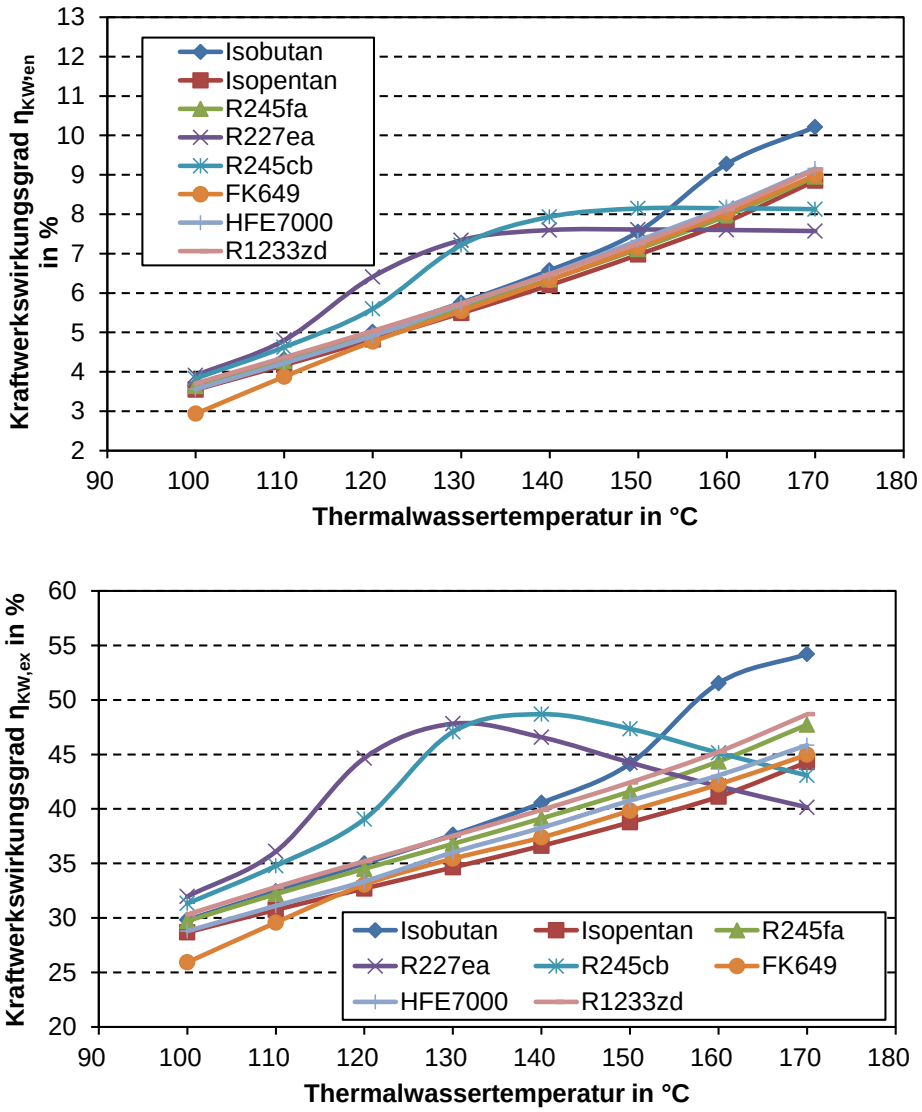
Hier erfolgt ausschließlich eine Betrachtung der Kraftwerkswirkungsgrade (vgl. Kapitel 3.2.1). Zur Berechnung des Kraftwerkswirkungsgrades wird die Generatorklemmleistung abzüglich der elektrischen Eigenverbräuche im Kraftwerk, d. h. der elektrische Eigenbedarf der Speisepumpe und der Kondensationsanlage, genutzt.

In einem weiteren Arbeitsschritt werden die Ergebnisse aus den Simulationen der Modellanlagen dargestellt. Als Bewertungskriterium wird unter anderem der Anlagenwirkungsgrad herangezogen. Zur Berechnung des Anlagenwirkungsrades wird die Generatorklemmleistung abzüglich der elektrischen Eigenverbräuche in der Gesamtanlage (d. h. der elektrische Eigenbedarf der Speisepumpe, der Kondensationsanlage und der Tiefpumpe) genutzt.

3.3.2.1 Temperaturvergleich

Abbildung 14 zeigt eine Gegenüberstellung der energetischen ($\eta_{KW,en}$) und exergetischen Kraftwerkswirkungsgrade ($\eta_{KW,ex}$) beim Einsatz unterschiedlicher organischer Arbeitsmittel in einem ORC-Standardkonzept für die in Deutschland typischen Thermalwassertemperaturen. Für die Thermalwassertemperaturen unter 110 °C ist der Einfluss des ORC-Arbeitsmittels eher gering. Im dem Bereich von 110 bis 130 °C scheint für den hier untersuchten Fall das Arbeitsmittel R227ea am besten geeignet zu sein. Das Arbeitsmittel R245cb besitzt für den Temperaturbereich von 130 bis rund 155 °C die höchsten Wirkungsgrade. Ab 155 °C sind die höchsten Wirkungsgrade beim Einsatz von Isobutan als Arbeitsmittel im ORC zu erreichen. Die exergetischen Wirkungsgrade liegen wegen der unterschiedlichen Berechnungsmethode deutlich höher als die energetischen Wirkungsgrade, zeigen aber vergleichbare Tendenzen.

Abbildung 14: Energetische (oben) und exergetische (unten) Kraftwerkswirkungsgrade für ein ORC-Standardkonzept.[2]

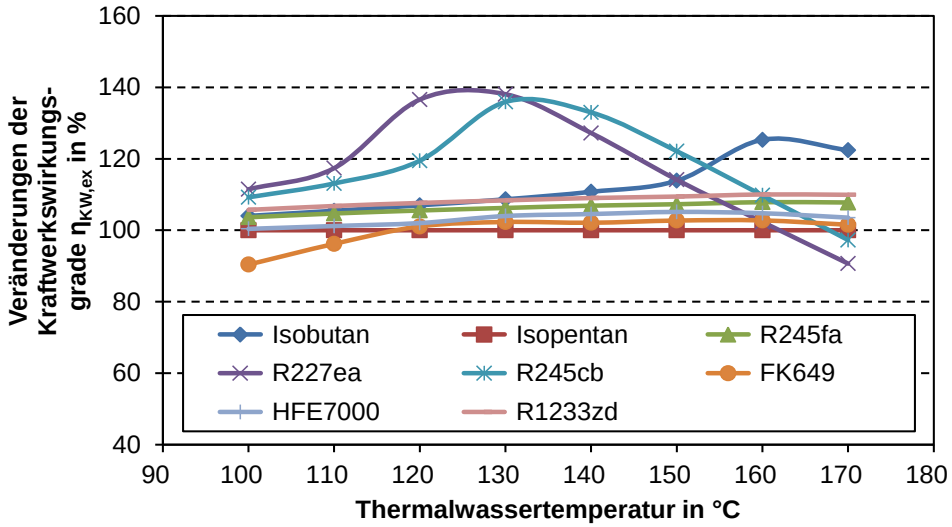


In Abbildung 15 sind zusätzlich die exergetischen Wirkungsgrade aus Abbildung 14 dargestellt, sie wurden hier auf den exergetischen Wirkungsgrad eines unterkritischen einstufigen ORC-Konzeptes mit Isopentan normiert[3]. Es wird dabei deutlich, dass beim gegenwärtig in Deutschland häufig verwendeten Arbeitsmittel R245fa kaum Wirkungsgradsteigerungen erreicht werden können.

[2] Für das Arbeitsmittel R1233zd waren im Simulationstool nicht alle Stoffdaten vorhanden. Für die Berechnung der Wirkungsgrade wurden Berechnungen von [43] verwendet.

[3] Es wird hier Isopentan als „Referenzarbeitsmittel“ gewählt, da dieses Arbeitsmittel bisher sehr häufig in geothermischen Kraftwerken eingesetzt wurde und, wie alle infrage kommenden Kohlenwasserstoffe, einen sehr niedriges Treibhauspotenzial (GWP) hat.

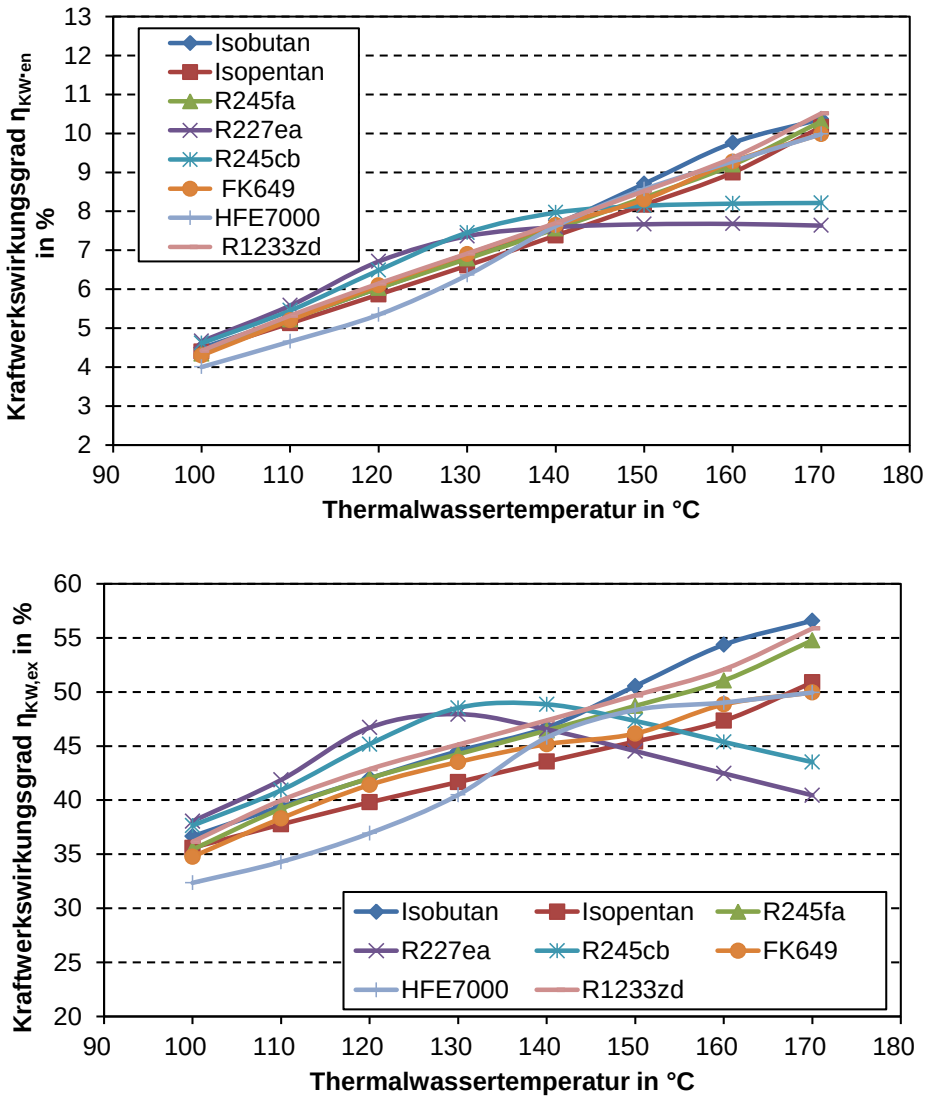
Abbildung 15: Auf den exergetischen Wirkungsgrad eines unterkritischen einstufigen ORC-Konzeptes mit Isopentan normierte exergetische Wirkungsgrade verschiedener Arbeitsmittel für ein einstufiges ORC-Konzept.[4]



Für das in Kapitel 2.3.2.1 beschriebene zweistufige ORC-Konzept und die im Standard-ORC-Konzept untersuchten Arbeitsmittel (Abbildung 14) zeigt Abbildung 16 die energetischen und exergetischen Kraftwerkswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur. Durch ein zweistufiges ORC-Kraftwerk können die energetischen und exergetischen Wirkungsgrade insgesamt im Vergleich zum ORC-Standardkonzept gesteigert werden.

[4] Für das Arbeitsmittel R1233zd waren im Simulationstool nicht alle Stoffdaten vorhanden. Für die Berechnung der Wirkungsgrade wurden Berechnungen von [43] verwendet.

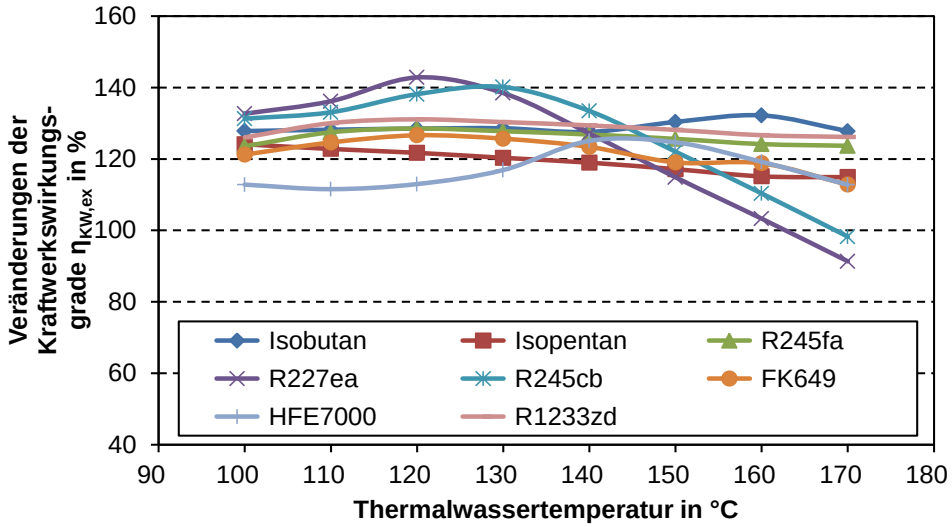
Abbildung 16: Energetische (oben) und exergetische (unten) Kraftwerkswirkungsgrade für ein zweistufiges ORC-Konzept.[5]



Werden die in Abbildung 16 dargestellten exergetischen Wirkungsgrade auf den exergetischen Wirkungsgrad von Isopentan in einem einstufigen ORC-Kraftwerk bezogen, so zeigt sich, dass für die Arbeitsmittel Isobutan, FK649, R227ea und R245cb insbesondere bei geringen Thermalwassertemperaturen Steigerungen des exergetischen Wirkungsgrades von max. 40 % zu erwarten sind (Abbildung 17). Insbesondere die Verwendung von HFE7000 in einer mehrstufigen ORC-Anlage erscheint dagegen bei sehr geringen Temperaturen weniger sinnvoll; hier werden nur sehr geringe Steigerungen des exergetischen Wirkungsgrades erreicht.

[5] Für das Arbeitsmittel R1233zd waren im Simulationstool nicht alle Stoffdaten vorhanden. Für die Berechnung der Wirkungsgrade wurden Berechnungen von [43] verwendet.

Abbildung 17: Auf den exergetischen Wirkungsgrad eines unterkritischen einstufigen ORC-Konzeptes mit Isopentan normierte exergetische Wirkungsgrade verschiedener Arbeitsmittel für ein zweistufiges ORC-Konzept.[6]



Angaben aus der Literatur zeigen ähnliche Tendenzen [17], [18].

Ein Vergleich mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerken zeigt, dass die energetischen Wirkungsgrade zum Teil höher liegen; moderne Kraftwerke besitzen derzeit energetische Wirkungsgrade von rund 45 %. Die energetischen und exergetischen Wirkungsgrade bei konventionellen Kraftwerken sind nahezu identisch, bei geothermischen Kraftwerken liegen die exergetischen Wirkungsgrade zum Teil deutlich höher als die energetischen.

3.3.2.2 Modellanlagen

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus der Simulation der Modellanlagen diskutiert. Hierzu zeigen Abbildung 18 und Abbildung 19 die installierte elektrischen Leistungen sowie die energetischen Anlagenwirkungsgrade und Gütegrade der untersuchten Modelltypen für die gegenwärtig am häufigsten in Deutschland eingesetzten Arbeitsmittel; zusätzlich dazu wurde das neue Arbeitsmittel HFE7000 betrachtet (bei einem mittleren GWP des Arbeitsmittels sind hier im entsprechenden Temperaturbereich vielversprechende Effizienzsteigerungen zu erwarten). Ausführliche technische Kenndaten sind dem Anhang A, Tabelle 12 und Tabelle 13 beigefügt.

Für die Modellanlagen Typ 1 – Standard ORC liegen die Ergebnisse mit den Arbeitsmitteln Isopentan, R245fa und HFE7000 auf einem vergleichbaren Niveau. Für die Modellanlagen Typ 1 – Standard ORC mit dem Arbeitsmittel Isobutan werden die höchsten Ergebnisse (d. h. für elektrische Leistung, Anlagenwirkungsgrad und Gütegrad) berechnet.

[6] Für das Arbeitsmittel R1233zd, waren im Simulationstool nicht alle Stoffdaten vorhanden. Für die Berechnung der Wirkungsgrade wurden Berechnungen von [43] verwendet.

Abbildung 18: Installierte elektrische Leistungen der simulierten Modellanlagen.

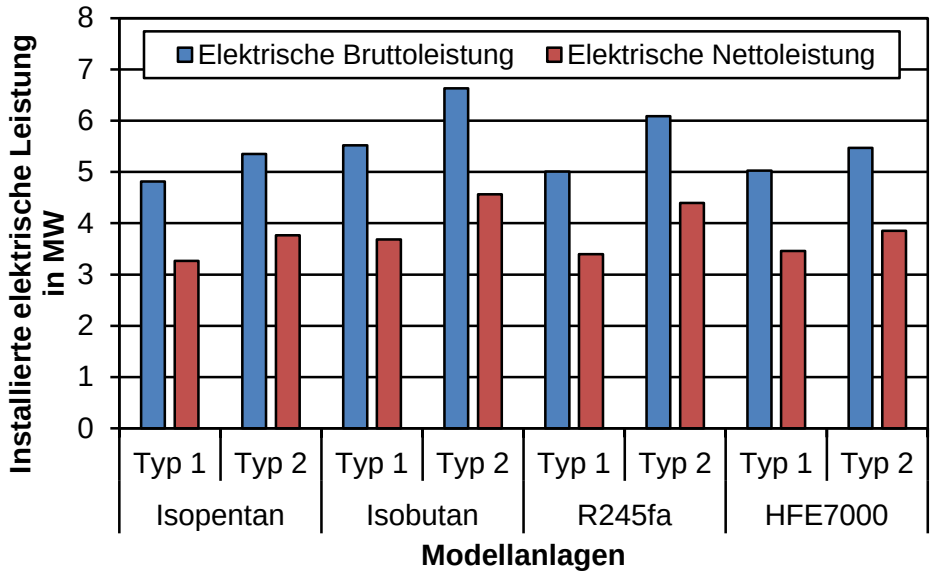
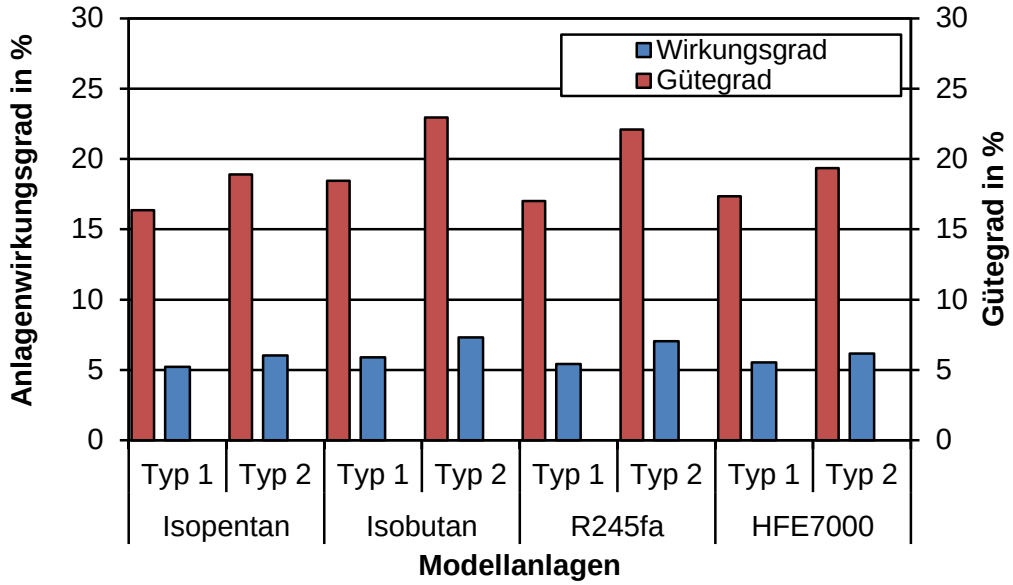


Abbildung 19: Anlagenwirkungsgrade und Gütegrade der simulierten Modellanlagen.



Die Ergebnisse für die Modellanlagen Typ 2 – Zweistufiger ORC sind jeweils im Vergleich zu den Modellanlagen Typ 1 – Standard ORC höher. Hier werden ausgehend von der gleichen geothermischen Förderleistung höhere Anlagenwirkungsgrade und somit elektrische Leistungen berechnet und es werden entsprechend höhere Mengen an elektrischer Energie produziert. Grund für die Steigerung des Wirkungsgrades sind die Reduzierungen der exergetischen Verluste bei der Umwandlung der geothermischen Wärme in elektrischen Strom, was zu einer Annäherung an der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Dreiecksprozess führt. Bei einem Einsatz der Arbeitsmittel Isopentan und HFE7000 werden bei den Modellanlagen Typ 2 – Zweistufiger ORC die geringsten Ergebnisse berechnet. Höhere Ergebnisse ergeben sich bei einem Einsatz von R245fa; die höchsten elektrischen Leistungen und Anlagenwirkungsgrade werden für die Modellanlage in dem das Arbeitsmittel Isobutan eingesetzt wird erreicht.

Für die beiden untersuchten Modelltypen werden die höchsten Effizienzwerte mit dem Arbeitsmittel Isobutan erreicht.

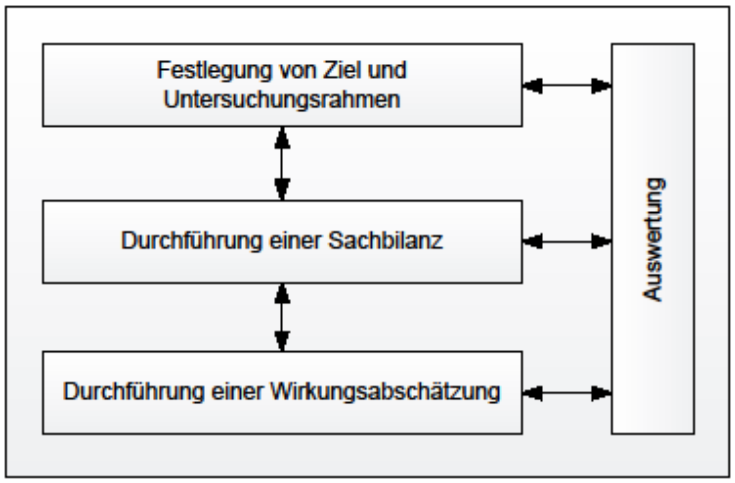
4 Ökologische Analyse

Für die in Kapitel 3.3 dargestellten Modellanlagen wurde eine ökologische Analyse durchgeführt. Im Folgenden werden die methodische Vorgehensweise dargestellt und die Ergebnisse der ökologischen Analyse diskutiert sowie eine Parametervariation vorgenommen.

4.1 Vorgehen und Rahmenannahmen

Für die Bewertung der Umweltwirkungen von Technologien zur Energiebereitstellung wurde bei der ökobilanziellen Betrachtung das methodische Vorgehen nach den Normen EN ISO-14040 [19] und EN ISO-14044 [20] angewandt, aber z. B. auf die Durchführung einer kritischen Begutachtung durch einen unabhängigen Sachverständigen oder ein Prüfungsgremium verzichtet. Das Ziel einer Ökobilanz, alle Effekte und Stoffströme zu erfassen und zu analysieren, die dem zu untersuchenden Produkt über den gesamten Lebensweg zuzuordnen sind, wird auch bei der vorliegenden ökobilanziellen Betrachtung verfolgt. Bei der Geothermie sind die Produkte die abgegebene Wärme und/oder der Strom. Die ökobilanzielle Betrachtung umfasst Rohstofferschließung und -gewinnung, Produktion und Nutzung sowie Entsorgung bzw. Recycling. Nach den Regeln der Ökobilanzierung gliedert sich der methodische Aufbau der ökobilanziellen Betrachtung [20] in vier Hauptschritte (Abbildung 20); die Vorgehensweise kann hierbei iterativ erfolgen.

Abbildung 20: Methodische Vorgehensweise bei der ökobilanziellen Betrachtung.



Im ersten Schritt werden die zu untersuchende Fragestellung, das Ziel und die Randbedingungen festgelegt. Ziel dieser ökobilanziellen Betrachtung ist die Ermittlung der potenziellen Umweltwirkungen verschiedener Anlagen zur kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung aus Geothermie. Folgende Randbedingungen wurden festgelegt:

- Der Betrachtungszeitraum beträgt 20 Jahre.
- Als funktionelle Einheit wird die Brutto- und die Nettoerzeugung einer GWh Strom sowie einer GWh Wärme definiert.
- Für den Energieverbrauch werden Emissions- und Substitutionsfaktoren des Umweltbundesamtes verwendet [21].
- Referenzstandort ist die Bundesrepublik Deutschland und das Referenzjahr ist 2012.

Im zweiten Arbeitsschritt, der Sachbilanz, werden die Ein- und Ausgangsgrößen, differenziert nach den Lebenswegabschnitten (d. h. Bau, Betrieb und Rückbau), quantifiziert. Dafür werden die betrachteten Prozesse in einem Stoffstromnetz mit Hilfe der Modellierungs-Software Umberto 5.6 abgebildet und Datenrecherchen zur Bestimmung der Stoffströme durchgeführt.

Umberto 5.6 ist ein Ökobilanzierungstool, mit dessen Hilfe Prozesse und Prozessketten hinsichtlich Massen- und Energiebilanzen untersucht werden. Emissionen und Energieverbräuche von Systemen können so über ihren gesamten Lebenszyklus unter Berücksichtigung aller Vorketten ermittelt werden. Zur Bilanzierung der Vorketten von Prozessen und Materialien wird die Datenbank Ecoinvent V2.2 des Swiss Centre for Life Cycle Inventories verwendet [22]. Hier sind alle Stoffdaten und Vorketten berücksichtigt, dies schließt – außer bei den Arbeitsmitteln – auch die Produktionsprozesse, z. B. von Stahl, Beton etc., ein.

Für den Untertageteil (d. h. Aufschluss des tiefen Untergrundes, Kapitel 2.2) wurden die Energie- und Materialaufwendungen aus der Literatur entnommen (Ergebnisse aus der Literaturrecherche befinden sich in Tabelle 23, Anhang B). Für den Obertageteil (Thermalwasserkreislauf, Kraft- bzw. Heizkraftwerk) wurde über Fragebögen eine Datenerhebung der errichteten Geothermieanlagen durchgeführt (Tabelle 22, Anhang B). Die Emissionsfaktoren für die Freisetzung das Arbeitsmittels aus dem ORC bzw. Kalina-Kreislauf wurden, wie bereits in Kapitel 3.1 angegeben, für Bau mit 2 %, für den Betrieb mit 4 % pro Jahr und für den Rückbau mit 20 % der Arbeitsmittelfüllmenge festgelegt. Angaben für das Treibhauspotenzial (GWP) der verschiedenen Arbeitsmittel wurden der Literatur [23] entnommen bzw. in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt) [24] zur Verfügung gestellt.

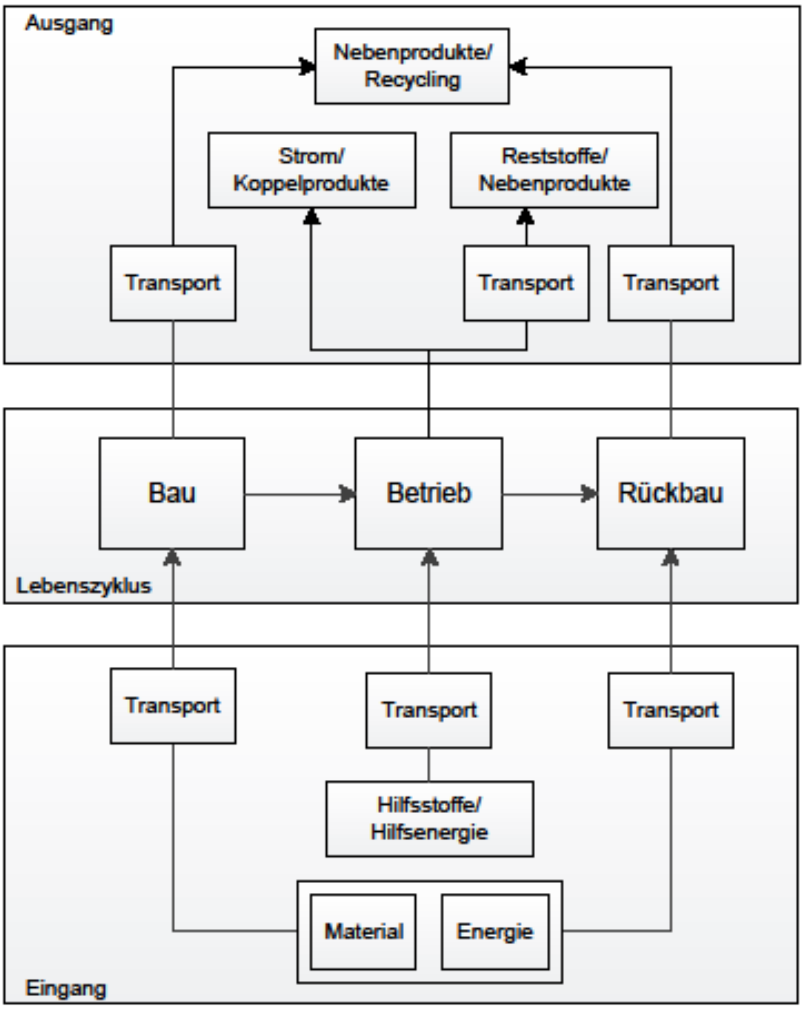
Die Sachbilanzierung erfolgt in einer Prozesskettenanalyse. Dabei wird das System (d. h. das geothermische Heizkraftwerk) entlang des Lebenszyklus in die übergeordneten Prozesse Bau, Betrieb und Rückbau der Geothermieanlage gegliedert. Jeder dieser übergeordneten Prozesse ist zusätzlich durch vor- und nachgelagerte Prozesse gekennzeichnet (Abbildung 21).

Im dritten Arbeitsschritt, der Wirkungsabschätzung, erfolgt mit Hilfe der in der Sachbilanz erhobenen Stoffströme eine Berechnung der möglichen Umweltwirkungen. Die Umweltwirkungen für jede Modellanlage werden aus der Summe der Einzelwirkungen berechnet.

$$E_G = E_{Bau} + E_{Betrieb} + E_{Rückbau} \qquad \text{Gleichung 10}$$

E_G	Umweltwirkung Gesamt
E_{Bau}	Umweltwirkung beim Bau
$E_{Betrieb}$	Umweltwirkung beim Betrieb
$E_{Rückbau}$	Umweltwirkung beim Rückbau

Abbildung 21: Schematische Darstellung einer Prozesskettenanalyse am Beispiel eines geothermischen Heizkraftwerkes [26].



Bei Anlagen mit gekoppelter Strom- und Wärmebereitstellung wird eine exergetische Allokation durchgeführt, d. h. die Umweltwirkungen werden der eigentlichen Quelle z. B. dem Strom (hier werden anteilig die Bohrung und der Thermalwasserkreislauf sowie vollständig das Kraftwerk berücksichtigt) oder der Wärme (hier werden anteilig die Bohrung und der Thermalwasserkreislauf sowie vollständig das Heizwerk berücksichtigt) zugeteilt. Dadurch ist es möglich, die höhere Qualität des elektrischen Stroms im Vergleich zur Wärme zu berücksichtigen. Die Berechnung der Allokationsfaktoren für den bereitgestellten Strom bzw. die bereitgestellte Wärme folgt dabei aus [26]:

$$a_{el} = \frac{W_{el}\, e_{el}}{W_{el}\, e_{el} + Q_{th} e_{th}}$$ Gleichung 11

$$a_{th} = \frac{W_{th}\, e_{th}}{W_{el}\, e_{el} + Q_{th} e_{th}}$$ Gleichung 12

a_{el} Allokationsfaktor für den bereitgestellten Strom
a_{th} Allokationsfaktor für die bereitgestellte Wärme
W_{el} Bereitgestellte elektrische Energie
e_{el} Exergiefaktor elektrische Energie
Q_{th} Bereitgestellte thermische Energie
e_{th} Exergiefaktor bereitgestellte thermische Energie

Der Exergiefaktor e_{el} für die elektrische Energie hat den Wert 1 (elektrische Energie kann unter idealen Bedingungen verlustfrei in mechanische Arbeit umgewandelt werden [25], [26]). Für die bereitgestellte Wärme wird der Exergiefaktor e_{th} berechnet nach [26].

$$e_{th} = 1 - \frac{T_U}{T_{HW,m}} \qquad \text{Gleichung 13}$$

mit

$$T_{HW,m} = \frac{(T_{Th1} - T_{Th2})}{ln\left(\frac{T_{Th1}}{T_{Th2}}\right)} \qquad \text{Gleichung 14}$$

T_U Umgebungstemperatur (T_U = 288,15 K).

T_{Th1} Vorlauftemperatur des Wärmenetzes (T_{Th1} = 343,15 K).

T_{Th2} Rücklauftemperatur des Wärmenetzes (T_{Th2} = 323,15 K).

Die Ergebnisse der Sachbilanz werden den Wirkungen auf die natürliche Umwelt zugeordnet. Dabei können eine Vielzahl von Umweltwirkungen betrachtet werden. In der Literatur werden als Umweltwirkungen für Energiebereitstellungsanlagen vorwiegend der anthropogene Treibhauseffekt, die Versauerung von Böden und Gewässern, die Eutrophierung natürlicher Ökosysteme und der kumulierte fossile Energieaufwand betrachtet [1], [3]; dies wird hier übernommen (Tabelle 4). Dadurch kann ein Vergleich mit ausgewählten Literaturwerten erfolgen. Weitere Wirkungskategorien wie beispielsweise Landschaftsverbrauch wurden in der Untersuchung nicht berücksichtigt; hier können separate Untersuchungen durchgeführt werden.

Tabelle 4: Bilanzierte Umweltwirkungen [1]

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Substanzen
Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen	fossiler Energieaufwand	Erdöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Uran
Treibhauspotenzial (GWP)	CO_2-Äquivalente	CO_2 (1)[a], CH_4 (25)[a], N_2O (310)[a], SF_6 (22 200)[a], CF4 (5 700)[a], C_2F_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_2S (1,88)[b]
Eutrophierung natürlicher Ökosysteme	PO_4-Äquivalente	PO_4(1)[c], NO_x als NO_2 (0,13), NH_3 (0,35)

[a] Wichtungsfaktoren bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren in kg CO_2-Äquivalenten je kg Schadstoff; [b] Wichtungsfaktoren in kg SO_2-Äquivalenten je kg Schadstoff; [c] Wichtungsfaktoren kg PO_4 - Äquivalenten je kg Schadstoff

Letzter Arbeitsschritt ist die Bewertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse, die teilweise bei jedem Iterationsschritt erfolgt.

Zusätzlich zu den oben dargestellten Umweltwirkungen werden spezifische Vermeidungsfaktoren für CO_2-Äquivalentemissionen für die untersuchten Modellanlagen berechnet. Die Methode zur Bestimmung der spezifischen Vermeidungsfaktoren wurde der Literatur entnommen [21].

4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung werden nachfolgend für die simulierten Modellanlagen (Kapitel 3.3) diskutiert.

Zunächst wird detailliert auf die Ergebnisse für den Obertageanlagenteil der betrachteten Modellanlagen eingegangen. Hier werden für die ökobilanzielle Betrachtung die obertägigen Anlagenteile

(d. h. Thermalwasserkreislauf mit Tiefpumpe, Kraft- bzw. Heizkraftwerk) berücksichtigt. Die Ergebnisse werden jeweils für die bei den Modellrechnungen berücksichtigten Arbeitsmittel, die gegenwärtig am häufigsten in Deutschland eingesetzten und HFE7000, angegeben.

Abschließend werden die Ergebnisse für die Gesamtanlage (d. h. die Erschließung des tiefen Untergrundes und die Obertageanlage) betrachtet. Dadurch wird es möglich die Ergebnisse mit entsprechenden Literaturwerten zu vergleichen.

Entsprechend der beschriebenen Methodik werden jeweils Umweltwirkungen für die Strom- und die Wärmeproduktion berechnet[7].

4.2.1 Obertageanlage

Die Ergebnisse der untersuchten Umweltwirkungen für die simulierten Modellanlagen für die Obertageanlage (Kapitel 3.3) zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Strominduzierte Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung für die Obertageanlage bestehend aus Thermalwasserkreislauf mit Tiefpumpe und Kraftwerk, jeweils für Nettostromeinspeisung (Netto) und Bruttostromeinspeisung (Brutto)

Modelltyp 1 Standard ORC	Einheit	Isopentan		Isobutan		R245fa		HFE7000	
		Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto
Verbrauch von Primärenergie	GJ/GWh	316	3.314	291	3.399	303	3.308	318	3.213
CO_2-Äquivalente	t/GWh	19	201	18	206	150	323	61	234
SO_2-Äquivalente	kg/GWh	79	339	73	344	76	337	80	330
PO_4-Äquivalente	kg/GWh	5	915	5	946	5	916	5	885
Modelltyp 2 Zweistufiger ORC	**Einheit**	**Isopentan**		**Isobutan**		**R245fa**		**HFE7000**	
		Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto
Verbrauch von Primärenergie	GJ/GWh	275	3.055	241	3.163	236	2.847	243	3.048
CO_2-Äquivalente	t/GWh	18	186	15	192	116	268	57	224
SO_2-Äquivalente	kg/GWh	78	318	55	314	61	290	59	310
PO_4-Äquivalente	kg/GWh	4	844	4	884	4	790	4	843

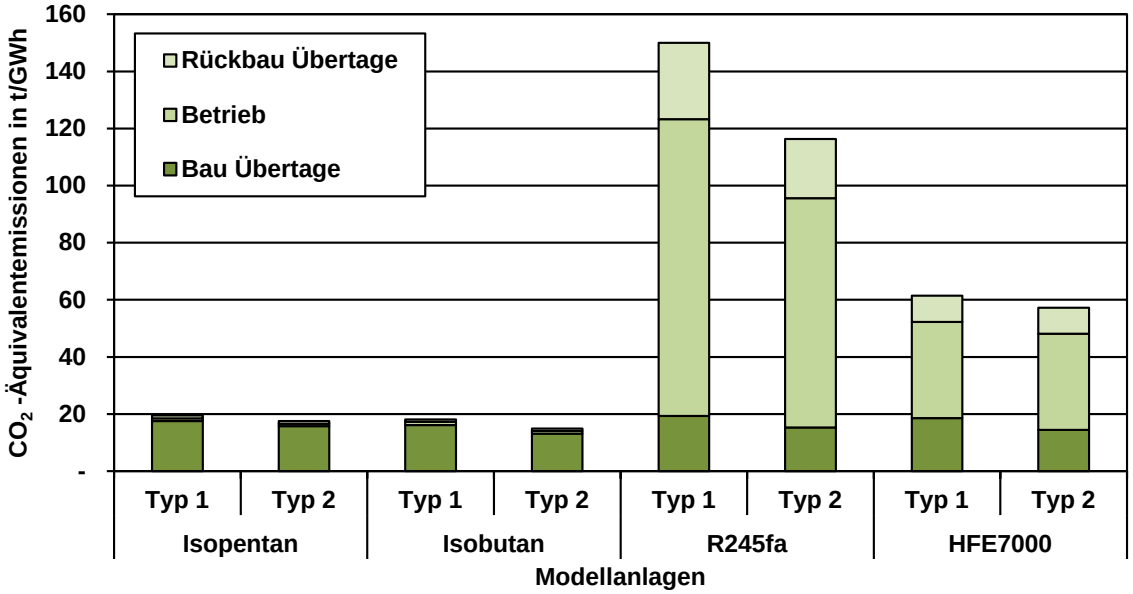
Die mit dem Bau, Betrieb und Rückbau für die Obertageanlage der verschiedenen Modellanlagen verbundenen Umweltwirkungen liegen in einer großen Bandbreite. Beispielsweise liegen die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen bei einer Nettostrombetrachtung zwischen 15 und 150 Tonnen pro Gigawattstunde (Abbildung 22).

Für die Modellanlagen Typ 2 – Zweistufiger ORC ergeben sich unabhängig vom verwendeten Arbeitsmittel geringere strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen. Obwohl sich bei den ORC-Kraftwerken der Modellanlagen Typ 2 – Zweistufiger ORC, wegen des höheren apparativen Aufwandes (siehe Kapitel 2.3.2, zwei parallele Kreisläufe, etc.), höhere Energie- und Materialaufwendungen

[7] Strom induzierte Umweltwirkungen beschreiben Umweltwirkungen, die mit der Strombereitstellung verbunden sind; Wärme induzierte Umweltwirkungen beschreiben Umweltwirkungen. die aus der Wärmebereitstellung resultieren.

für den Bau ergeben, werden diese durch die Steigerungen der Effizienz (siehe Kapitel 3.3.2) wieder aufgefangen. Mit den Modellanlagen Typ 2 – Zweistufiger ORC wurden ausgehend von der gleichen geothermischen Förderleistung höhere Wirkungsgrade im Vergleich zum Modelltyp 1 – Standard ORC und somit höhere elektrische Leistungen berechnet; es werden entsprechend höhere Mengen an elektrischer Energie produziert. Dies führt dann insgesamt zu geringeren spezifischen Emissionen.

Abbildung 22: Strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen der simulierten Modellanlagen (Obertageanlage) bei einer Nettostrombetrachtung.



Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen der Modellanlagen deutlich durch das eingesetzte Arbeitsmittel bestimmt werden. So ergeben sich unabhängig vom Modellanlagentyp die geringsten strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen als Arbeitsmittel (z. B. Isopentan und Isobutan, Abbildung 22). Wird als Arbeitsmittel aber ein teilfluorierter Kohlenwasserstoff oder ein Hydrofluorether eingesetzt (Abbildung 22, R245fa bzw. HFE7000), fallen trotz zum Teil höherer Wirkungsgrade und einer höheren Energiebereitstellung durch das Kraftwerk (Kapitel 3.3.2) sehr hohe CO_2-Äquivalentemissionen für die Obertageanlage an. Grund für diese besonders hohen CO_2-Äquivalentemissionen sind die mit dem Betrieb und dem Rückbau verbundenen direkten Emissionen des Arbeitsmittels R245fa und HFE7000 mit einem deutlich höheren Treibhauspotenzial (GWP) als Kohlenwasserstoffe (GWP R245fa –1.030, GWP HFE7000 – 370, GWP Isopentan – 5, Tabelle 16, Tabelle 19 und Tabelle 15). Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Vorkette der Arbeitsmittel der Herstellungsprozess nicht berücksichtigt wurde und daher die Werte für die fluorierten Stoffe noch höher als hier berechnet ausfallen können. Demgegenüber sind die Unterschiede, die aus der auf die Arbeitsmittel angepassten Bauweise der Anlagen resultieren (Abbildung 22), gering.

Bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen als Arbeitsmittel betragen die Anteile der strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen für den Betrieb und für den Rückbau jeweils rund 5 bis 6 %. Wird das teilfluorierte Arbeitsmittel R245fa eingesetzt, so betragen die Anteile der strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen für den Betrieb etwa 70 % und für den Rückbau etwa 20 %.

Es zeigt sich somit, dass die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen für die Obertageanlage der untersuchten Modelltypen durch die Art des Anlagentyps und durch das eingesetzte Arbeitsmittel bestimmt werden. Für den Modelltyp 2 – Zweistufiger ORC wurden im Vergleich zum Modelltyp – Standard ORC unabhängig vom verwendeten Arbeitsmittel geringere strominduzierte CO_2-

Äquivalentemissionen berechnet. Beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen fallen aber deutlich geringere strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen für die Obertageanlage an; die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen werden hier durch den Bau der Obertageanlage bestimmt. Demgegenüber fallen deutlich höhere strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen für die Obertageanlage bei einer Verwendung von teilfluorierten Arbeitsmitteln (z. B. R245fa) an; hier werden die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen für die Obertageanlage durch den Rückbau und den Betrieb bestimmt.

Bei den weiteren strominduzierten spezifischen Umweltwirkungen (d. h. Primärenergieaufwendungen, Emissionen mit versauernder und eutrophierender Wirkung) sind hinsichtlich des Anlagentyps ähnliche Ergebnisse zu beobachten; unabhängig vom verwendeten Arbeitsmittel werden auch hier mit den Modellanlagen Typ 2 – Zweistufiger ORC geringere strominduzierte spezifischen Umweltwirkungen für die Obertageanlage berechnet. Der Einfluss der eingesetzten Arbeitsmittel auf die untersuchten Umweltwirkungen ist hier deutlich geringer. Das GWP des Arbeitsmittels hat im Rahmen des Bilanzmodells (ohne Vorkette der Herstellung und atmosphärische Abbauprodukte) auf diese Umweltwirkungen keinen unmittelbaren Einfluss (Tabelle 5).

Wird im Unterschied zu der oben beschriebenen Nettostrombetrachtung eine Bruttoeinspeisung unterstellt, d. h. der gesamte geothermisch erzeugte Strom wird in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist und die zum Betrieb der Anlage benötigte Energie wird aus dem Netz bezogen, ergeben sich deutlich höhere Umweltwirkungen. Grund hierfür ist der aus dem Netz bezogene Strom, der durch einen höheren kumulierten fossilen Energieaufwand gekennzeichnet ist und für den höhere Emissionen anzurechnen sind.

4.2.2 Gesamtanlage

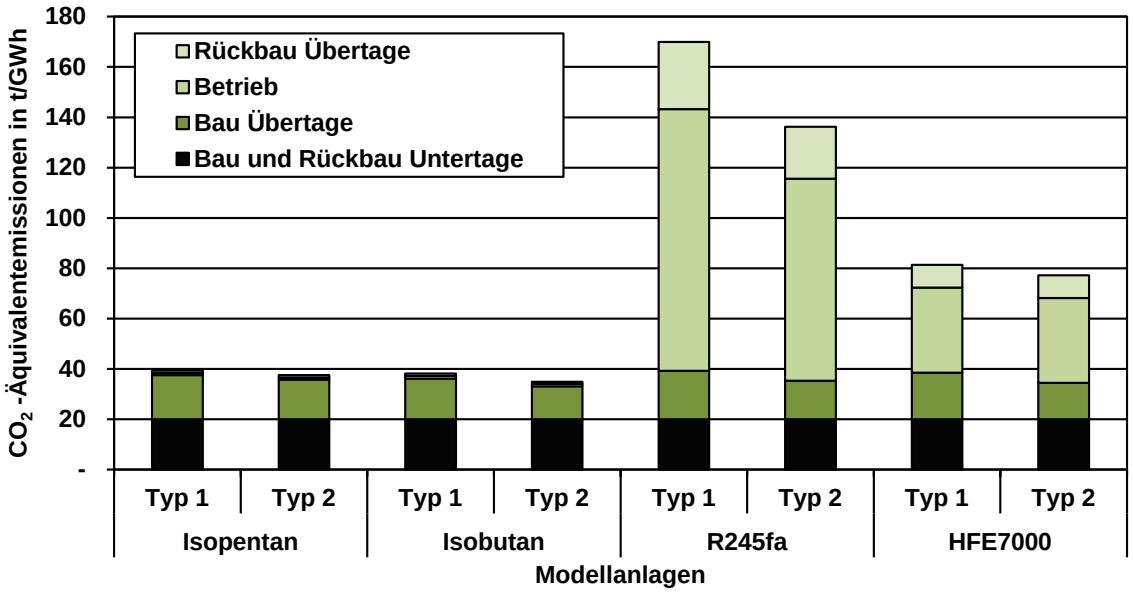
Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse für die Umweltwirkungen für die Gesamtanlage (d. h. Obertageanlage (vgl. Kapitel 4.2.1) zuzüglich Erschließung und Rückbau des tiefen Untergrundes). Tendenziell gelten die beschriebenen Zusammenhänge für die Obertageanlage auch hier. Zusätzlich zu den spezifischen Umweltkenngrößen für die Obertageanlage (Tabelle 5) müssen aber die Aufwendungen für Erschließung und Rückbau des tiefen Untergrundes berücksichtigt werden. Dies führt insgesamt zu höheren spezifischen Umweltwirkungen; wegen der einheitlichen Bohrtiefe von ca. 3.700 m und Förderrate fallen für alle Modellanlagen die gleichen Aufwendungen für den Untertageteil an (Abbildung 23).

Tabelle 6: Strominduzierte Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung für die Gesamtanlage (Erschließung und Rückbau des tiefen Untergrundes und Obertageanlage)

Modelltyp 1 Standard ORC	Einheit	Isopentan		Isobutan		R245fa		HFE7000	
		Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto
Verbrauch von Primärenergie	GJ/GWh	757	3.620	732	3.705	744	3.614	759	3.519
CO_2-Äquivalente	t/GWh	39	215	38	220	170	337	81	248
SO_2-Äquivalente	kg/GWh	272	473	266	478	269	471	273	464
PO_4-Äquivalente	kg/GWh	57	933	57	964	57	934	57	903
Modelltyp 2 Zweistufiger ORC	**Einheit**	**Isopentan**		**Isobutan**		**R245fa**		**HFE7000**	
		Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto	Netto	Brutto
Verbrauch von Primärenergie	GJ/GWh	716	3.361	683	3.469	677	3.153	684	3.354
CO_2-Äquivalente	t/GWh	38	200	35	206	136	282	77	238
SO_2-Äquivalente	kg/GWh	271	452	248	448	254	424	252	444
PO_4-Äquivalente	kg/GWh	56	862	56	902	55	808	56	861

Auch hier ergeben sich bei einer Bruttoeinspeisung (d. h. der gesamte geothermisch erzeugte Strom wird in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist und die zum Betrieb der Anlage benötigte Energie wird aus dem Netz bezogen) deutlich höhere Umweltwirkungen, wegen der anzurechnenden fossilen Emissionen.

Abbildung 23: Strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen der simulierten Modellanlagen (Gesamtanlage) bei einer Nettostrombetrachtung.



Die Ergebnisse der wärmeinduzierten Umweltwirkungen sind innerhalb eines Anlagentyps gleich (Tabelle 7). Hier wurden die Ergebnisse durch den Aufwand im Betrieb bestimmt, der mit der Bereitstellung der Spitzenlast verbunden ist. Die Rahmenannahmen für das Heizwerk waren für alle Modellanlagen identisch (thermische Leistung: 5 MW; fossile Spitzenlast: 20 %).

Tabelle 7: Wärmeinduzierte Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung für die Gesamtanlage (Erschließung des tiefen Untergrundes und Obertageanlage)

Umweltwirkung	Einheit	Wert
Primärenergie	GJ/GWh	1.564
CO_2-Äquivalente	t/GWh	55
SO_2-Äquivalente	kg/GWh	95
PO_4-Äquivalente	kg/GWh	7

Die Ergebnisse anderer Untersuchungen sind den oben dargestellten ähnlich [1], [3]; als CO_2-Äquivalentemissionen werden 22 bis 55 Tonnen pro Gigawattstunde angegeben. Allerdings ist in der Literatur die Verteilung der Umweltwirkungen anders. So liegen die Anteile für den Untertageteil in der Literatur höher und für den Obertageteil niedriger. In anderen Untersuchungen wurden die Energie- und Materialaufwendungen für die Obertageanlage z. T. aber nicht vollständig bilanziert. Zudem wurde in der Literatur der Einfluss von fluorierten Arbeitsmitteln nicht berücksichtigt, da zum Berichtszeitpunkt keine derartige Anlage betrieben wurde.

Tabelle 8 zeigt die durch die simulierten Modellanlagen potenziell vermeidbaren Emissionen. Je größer der spezifische Vermeidungsfaktor, umso mehr CO_2-Äquivalentemissionen werden vermieden.

Tabelle 8: Vermeidbare CO_2-Äquivalentemissionen und spezifische Vermeidungsfaktoren für CO_2-Äquivalentemissionen der modellierten Modellanlagen (Gesamtanlage)

Modelltyp	Arbeitsmittel	Verursachte Emissionen CO_2-Äquivalente, fossil in t	Verursachte Emissionen CO_2-Äquivalente, Geothermie in t	Bilanz in t	Spezifischer Vermeidungsfaktor in t/GWh
Typ 1	Isopentan	25.807	6.721	19.086	610
	Isobutan	29.598	7.901	21.697	605
	R245fa	26.850	10.960	15.889	488
	HFE7000	26.929	8.089	18.841	577
Typ 2	Isopentan	28.686	6.940	21.746	625
	Isobutan	35.532	8.864	26.667	619
	R245fa	32.647	11.167	21.480	543
	HFE7000	29.322	8.470	20.851	586

Mit den Modellanlagen Typ 2 – Zweistufiger ORC wird mit jedem Arbeitsmittel jeweils ein höherer spezifischer Vermeidungsfaktor als mit den Modellanlagen Typ 1 – Standard ORC berechnet; insgesamt werden also in dem Zweistufigen ORC mehr CO_2-Äquivalentemissionen vermieden. Mit den Kohlenwasserstoffen Isopentan und Isobutan werden jeweils die meisten CO_2-Äquivalentemissionen und mit den teilfluorierten Arbeitsmittel R245fa und HFE7000 jeweils die geringsten CO_2-Äquivalentemissionen vermieden.

Insgesamt liegen die hier berechneten Ergebnisse für die spezifischen Vermeidungsfaktoren in einer ähnlichen Bandbreite wie in der Literatur angegeben [20]. Dort ergab sich ein spezifischer Vermeidungsfaktor für die CO_2-Äquivalentemissionen von rund 607 t/GWh [21].

Ein zusätzlicher Vergleich der spezifischen SO_2-Äquivalentemissionen der Stromerzeugung aus fossilen Energien zeigt, dass bei einer geothermischen Energiebereitstellung auch geringere SO_2-

Äquivalentemissionen im Vergleich zu einer Stromerzeugung aus fossilen Energien anfallen [21] (Tabelle 9).

Tabelle 9: Vergleich der SO_2-Äquivalentemissionen [21]

Technologie	Einheit	SO_2-Äquivalentemissionen
Strommix[1]	kg/GWh	760
Tiefe Geothermie [2]	kg/GWh	457

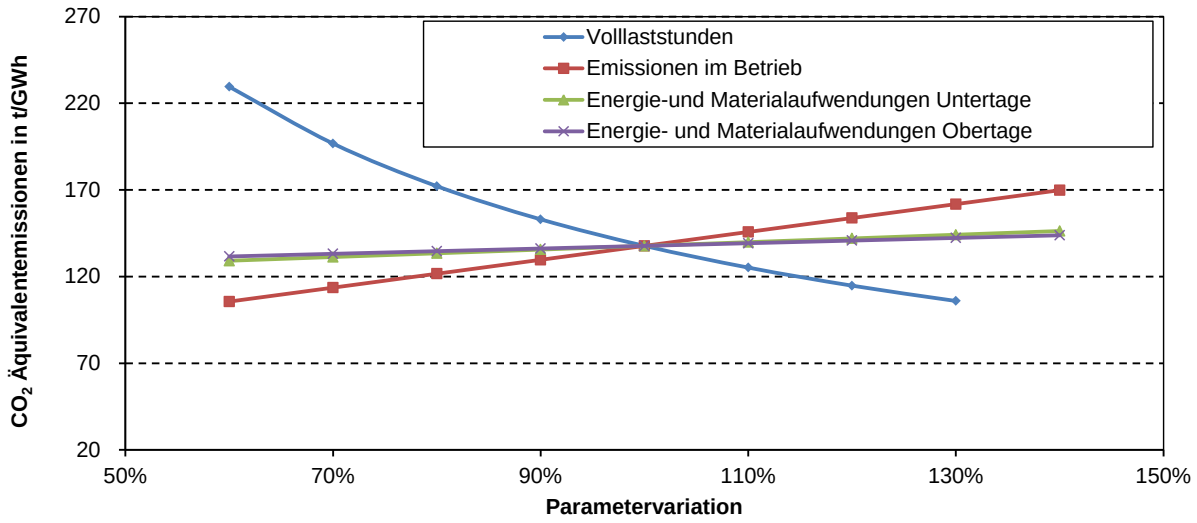
[1] Berechnet anhand der in [21] für Geothermie angegebenen Substitutionsfaktoren,
[2] Durchschnittliche strominduzierte SO_2-Äquivalentemissionen der untersuchten geothermischen Modellanlagen (Bruttostrombetrachtung)

4.3 Parametervariation

Im Gegensatz zum Vorgehen nach EN ISO-Normen 14040 und 14044 wurden im Folgenden nur einige Parameter variiert. Für eine Abschätzung der Bedeutung bestimmter Einflüsse zeigt Abbildung 24 eine Variation wesentlicher sensitiver Parameter am Beispiel der Modellanlage Typ 2 – Zweistufiger ORC mit R245fa bei einer Netzeinspeisung der Nettostromerzeugung.

Danach haben die Volllaststunden und der damit verbundene Energieertrag den größten Einfluss auf die CO_2-Äquivalentemissionen. Erhöhen sich die Stillstandszeiten des Kraftwerks, kann weniger Strom erzeugt werden und die CO_2-Äquivalentemissionen des Anteils bei der Anlagenherstellung erhalten mehr Gewicht. Umgekehrt sind bei einer maximalen Auslastung der Anlagen (8.000 Volllaststunden und mehr) geringere CO_2-Äquivalentemissionen möglich. Auch die Leckagen des eingesetzten fluorierten Arbeitsmittels R245fa haben einen dominanten Einfluss; erhöhen sich die direkten Emissionen durch höhere Leckageraten, sind damit deutlich höhere Emissionen verbunden. Die Material- und Energieaufwendungen für den Bau des Untertage- und Übertageteils in Bezug auf die CO_2-Äquivalentemissionen sind dagegen nur von untergeordneter Bedeutung (dies gilt für die anderen Modellanlagen analog).

Abbildung 24: Parametervariation für die CO_2-Äquivalentemissionen am Beispiel der Modellanlage Typ 2 (Zweistufiger ORC mit R245fa, Gesamtanlage).



5 Rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Arbeitsmittelverwendung

Die Entscheidung für den Einsatz von Stoffen und Zubereitungen als Arbeitsmittel[8] in ORC-Anlagen hängt nicht nur von der erreichbaren Energieeffizienz ab. Ebenfalls relevant sind die Wirkungen auf Menschen und die Umwelt, einschließlich derer durch Betriebsstörungen, aber auch Aspekte wie Preisentwicklungen und Verfügbarkeit.

Die folgende Zusammenstellung der beim Bau und Betrieb geothermischer Kraftwerke zu berücksichtigenden Wirkungen auf Menschen und Umwelt sowie Rechtsvorschriften zu deren Begrenzung soll diese Aspekte nur illustrieren. Eine umfassende Analyse der Anforderungen der Rechtsvorschriften an ORC-Anlagen ist hier nicht möglich, da diese von Konstruktion und Größe einzelner Anlagenteile sowie dem Standort abhängig sind. Die Darstellung der zu berücksichtigenden Wirkungen und Rechtsvorschriften[9] erfolgt hier am Beispiel des teilfluorierten Kohlenwasserstoffs R245fa und der brennbaren Kohlenwasserstoffe Isopentan und Isobutan. Relevant für die Wirkungen sind insbesondere die in Tabelle 10 angegebenen Stoffeigenschaften. In der Tabelle stehen die Daten für die reinen Stoffe. Es ist zu beachten, dass die Eigenschaften der tatsächlich verwendeten Arbeitsmittel durch Verunreinigungen oder Zusätze, z. B. Kälteöle, erheblich abweichen können. Auch können sich die Eigenschaften der Arbeitsmittel im Gebrauch erheblich verändern.

Im Einzelnen müssen Maßnahmen zur Produktsicherheit, zur Betriebssicherheit, zum Brand- und Explosionsschutz, zum Gewässerschutz, zur Verhinderung und Begrenzung vor Störfällen und zum Klimaschutz berücksichtigt werden.

[8] Die von der Betriebssicherheitsverordnung abweichende Definition von „Arbeitsmittel“ in diesem Bericht ist zu beachten und wird auch in diesem Kapitel beibehalten.

[9] Bei den betrachteten Verordnungen wurden Änderungen bis zum 01.07.2015 berücksichtigt.

Tabelle 10: Einstufung der betrachteten Arbeitsmittel (Stoffe)

	R245fa	Isopentan	Isobutan
Einstufung (gemäß CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008) [27]	Verdichtetes Gas [10]	Entzündbare Flüssigkeit, Kategorie 1 Aspirationsgefahr, Kategorie 1 Spezifische Zielorgan-Toxizität, Kategorie 3 Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 2	Entzündbare Gase, Kategorie 1 Gase unter Druck, verflüssigtes Gas[11]
Gefahrenhinweise	H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren	H224: Flüssigkeit und Dampf extrem entzündbar. H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein. H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen. H411: Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.	H220: Extrem entzündbares Gas. H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.
Flammpunkt	-	‹ –56°C	–83°C
Untere Explosionsgrenze		1,3 Vol.% / 38 g/m³	1,5 Vol. % / 37 g/m³
Obere Explosionsgrenze		7,6 Vol. % / 230 g/m³	9,4 Vol. % / 231 g/m³
Zündtemperatur	412°C (Zersetzungstemperatur ›250°C)	420°C	460°C
Temperaturklasse	T2	T2	T1
Einstufung hinsichtlich der Gewässergefährdung[12]	schwach wassergefährdend (WGK 1)	(deutlich) wassergefährdend (WGK 2)	nicht wassergefährdender Stoff
Treibhauspotential (GWP_{100})	1.030	5	3

5.1 Produktsicherheit

5.1.1 Maschinenverordnung

Teile der ORC-Anlagen stellen Maschinen dar bzw. die ORC-Anlage könnte auch als Gesamtheit von Maschinen angesehen werden. Die Maschinen in ORC-Anlagen unterliegen bzw. die ORC-Anlage insgesamt unterliegt daher der Maschinenverordnung (9. Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz) [28].

Der Hersteller oder sein Bevollmächtigter darf die Maschinen oder die Gesamtheit von Maschinen nur in den Verkehr bringen oder in Betrieb nehmen, wenn sie bei ordnungsgemäßer Installation und Wartung und bei bestimmungsgemäßer Verwendung oder vorhersehbarer Fehlanwendung die Sicherheit und die Gesundheit von Personen und die Sicherheit von Haustieren und Gütern und, soweit

[10] Gemäß Datenbank Gestis, abgerufen 01.07.2015

[11] Gemäß Datenbank Gestis, abgerufen 01.07.2015

[12] UBA Datenbank Rigoletto, abgerufen 01.07.2015

anwendbar, die Umwelt nicht gefährden. Der Hersteller oder sein Bevollmächtigter hat daher ein Konformitätsbewertungsverfahren durchzuführen, um nachzuweisen, dass die Maschine mit den Bestimmungen übereinstimmt. Der Hersteller der Maschinen oder der Gesamtheit von Maschinen oder sein Bevollmächtigter hat dafür zu sorgen, dass eine Risikobeurteilung vorgenommen wird, um die für die Maschine geltenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen zu ermitteln. Die Maschine muss dann unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Risikobeurteilung konstruiert werden.

Bei der Risikobeurteilung sind auch Risiken durch sonstige Gefährdungen zu berücksichtigen. Hierzu gehören auch Risiken durch Druck, Brände oder Explosionen. Die Maschinen bzw. die Gesamtheit von Maschinen muss so konstruiert und gebaut sein, dass jedes Brand-, Überhitzungs- und Explosionsrisiko vermieden wird, das von der Maschine selbst oder von Gasen, Flüssigkeiten, Stäuben, Dämpfen und anderen von der Maschine freigesetzten oder verwendeten Stoffen ausgeht.

Für die Einhaltung der Anforderungen der Maschinenverordnung ist der Betreiber dann selbst verantwortlich, wenn er die ORC-Anlage nicht schlüsselfertig vom Hersteller erworben hat, sondern die Anlage aus verschiedenen Anlagenteilen fertigstellt.

Der Aufwand der Risikobeurteilung und insbesondere der Folgen für die Konstruktion der Maschinen bzw. der Gesamtheit von Maschinen wird entsprechend der unterschiedlichen Eigenschaften von R245fa, Isopentan und Isobutan unterschiedlich sein. Es ist anzunehmen, dass der Aufwand in der genannten Reihenfolge zunehmen wird.

5.1.2 Druckgeräteverordnung

Teile der ORC-Anlage sind Druckgeräte und unterliegen damit – einschließlich ihrer Schutzsysteme aufgrund von Druckgefahren – der Druckgeräteverordnung (14. Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz) [29]. Ausgenommen hiervon ist allerdings die Turbine gemäß § 1 Abs. 2 Nr. 10 14. ProdSV.

Die daraus folgenden Anforderungen hängen einerseits von den zulässigen Betriebsdrücken und den Volumina der entsprechenden Anlagen bzw. Anlagenteile ab. Andererseits kann die Einstufung der Arbeitsmittel in Fluide der Gruppen 1 oder 2 gemäß Artikel 13 Abs. 1 der Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) [30] einen Einfluss haben.

Isobutan und Isopentan sind Fluide der Gruppe 1 und R245fa ist ein Fluid der Gruppe 2. Damit können sich geringere Beschaffenheits- und Betriebsanforderungen bei der Nutzung von R245fa ergeben. Dies muss allerdings unter Kenntnis der zulässigen Betriebsdrücke und Volumina der einzelnen relevanten Anlagenteile der ORC-Anlagen verifiziert werden.

5.1.3 Explosionsschutzverordnung

Da Isobutan ein entzündbares Gas ist und Isopentan eine entzündliche Flüssigkeit, können sich bei Mischung des Gases bzw. des Dampfes mit Luft gefährliche explosionsfähige Atmosphären bilden. Bei Austritt des Gases bzw. des Dampfes können sich diese in der Umgebung von Anlagenteilen oder bei Eindringen von Luft in die Anlage in Anlagenteilen bilden. Soweit dies möglich ist, sind Bereiche der Anlage, in denen diese Atmosphären eintreten können, in der Regel (s.u. zu GefahrstoffV [31], Kapitel 5.3) in Zonen einzuteilen. Anlagenteile, die in diesen Zonen betrieben werden sollen, sowie zugehörige Schutzsysteme, für den Explosionsschutz eingesetzte Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen müssen den Anforderungen der jeweiligen Art von Zone und den relevanten Eigenschaften des Arbeitsmittels entsprechen.

Es ist zu erwarten, dass bei R245fa auf eine Zonenausweisung verzichtet werden kann[13], während diese für Isopentan und Isobutan erforderlich werden dürfte. Bei Nutzung von R245fa kann damit voraussichtlich auf den Einsatz von der 11. ProdSV [32] unterliegenden „Ex-Geräten“ verzichtet werden, während die Anforderungen an „Ex-Geräte“ bei Nutzung von Isobutan und Isopentan zu erfüllen sind.

Eine genauere Bewertung ist nur auf der Basis einer belastbaren Zoneneinteilung möglich, die belastbarer Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Leckagen und von zu Leckagen führenden Störungen bedarf.

5.2 Betriebssicherheitsverordnung

Ziel der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) [33] ist es, die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln[14] zu gewährleisten. Dies soll insbesondere erreicht werden durch

1. die Auswahl geeigneter Arbeitsmittel (i. S. d. BetrSichV) und deren sichere Verwendung,
2. die für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignete Gestaltung von Arbeits- und Fertigungsverfahren sowie
3. die Qualifikation und Unterweisung der Beschäftigten.

Die BetrSichV regelt hinsichtlich der in ihrem Anhang 2 genannten überwachungsbedürftigen Anlagen zugleich Maßnahmen zum Schutz anderer Personen im Gefahrenbereich, soweit diese aufgrund der Verwendung dieser Anlagen durch Arbeitgeber gefährdet werden können.

Arbeitsmittel im Sinne der BetrSichV sind Werkzeuge, Geräte, Maschinen oder Anlagen, die für die Arbeit verwendet werden, sowie überwachungsbedürftige Anlagen.

Überwachungsbedürftige Anlagen sind Anlagen nach § 2 Nummer 30 des Produktsicherheitsgesetzes [34], soweit sie in Anhang 2 BetrSichV genannt sind. Dies sind insbesondere:

1. Druckanlagen und
2. Arbeitsmittel (i. S. d. BetrSichV) in explosionsgefährdeten Bereichen.

Eine überwachungsbedürftige Anlage in explosionsgefährdeten Bereichen ist in diesem Zusammenhang die Gesamtheit der explosionsschutzrelevanten Arbeitsmittel (i. S. d. BetrSichV) einschließlich der Verbindungselemente sowie der explosionsschutzrelevanten Gebäudeteile.

Grundlegende Instrumente der BetrSichV sind die Gefährdungsbeurteilung gemäß § 3 durch den Arbeitgeber und die daraus abgeleiteten Schutzmaßnahmen. Insbesondere hat der Arbeitgeber vor der Verwendung von Arbeitsmitteln (i. S. d. BetrSichV) die auftretenden Gefährdungen zu beurteilen und daraus notwendige und geeignete Schutzmaßnahmen abzuleiten.

In die Gefährdungsbeurteilung sind alle Gefährdungen einzubeziehen, die bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (i. S. d. BetrSichV) ausgehen, und zwar von

1. den Arbeitsmitteln (i. S. d. BetrSichV) selbst,

---

[13] Bei der Beurteilung der Explosionsrisiken ist zu beachten, dass Entzündbarkeit und Explosionsgrenzen von Stoff/Luft-Gemischen von Temperatur und Druck abhängig sind. Werden ORC-Anlagen bei hohen Temperaturen betrieben (etwa unter Nutzung von Abwärme von Rauchgasen), so muss dies beachtet werden und kann deshalb ein Explosionsrisiko bei Nutzung von R245fa nicht vorab grundsätzlich ausgeschlossen werden.

[14] Zur Verwendung des Begriffes „Arbeitsmittel“ im Sinne der Betriebssicherheitsverordnung, die von der bisherigen abweicht, siehe folgenden Text.

2. der Arbeitsumgebung und
3. den Arbeitsgegenständen, an denen Tätigkeiten mit Arbeitsmitteln (i. S. d. BetrSichV) durchgeführt werden.

Zur Gefährdungsbeurteilung gehört neben sicherheits- und gesundheitsrelevanten Zusammenhängen auch die Berücksichtigung von eventuellen Betriebsstörungen.

Arbeitsmittel (i. S. d. BetrSichV) dürfen erst verwendet werden, nachdem der Arbeitgeber

1. eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt hat,
2. die dabei ermittelten Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik getroffen hat und
3. festgestellt hat, dass die Verwendung der Arbeitsmittel (i. S. d. BetrSichV) nach dem Stand der Technik sicher ist.

Weiterer wesentlicher Regelungsgegenstand sind Pflichten der Arbeitgeber zur Prüfung von Arbeitsmitteln (i. S. d. BetrSichV). Der Arbeitgeber hat Art und Umfang erforderlicher Prüfungen von Arbeitsmitteln (i. S. d. BetrSichV) sowie die Fristen von wiederkehrenden Prüfungen zu ermitteln und festzulegen, soweit die BetrSichV nicht bereits entsprechende Vorgaben enthält.

Der Arbeitgeber hat Arbeitsmittel (i. S. d. BetrSichV), deren Sicherheit von den Montagebedingungen abhängt, vor der erstmaligen Verwendung von einer zur Prüfung befähigten Person prüfen zu lassen. Die Prüfung umfasst Folgendes:

1. die Kontrolle der vorschriftsmäßigen Montage oder Installation und der sicheren Funktion dieser Arbeitsmittel (i. S. d. BetrSichV),
2. die rechtzeitige Feststellung von Schäden und
3. die Feststellung, ob die getroffenen sicherheitstechnischen Maßnahmen wirksam sind.

Prüfinhalte, die im Rahmen eines Konformitätsbewertungsverfahrens geprüft und dokumentiert wurden, müssen nicht erneut geprüft werden. Bei Schäden verursachenden Einflüssen, bestimmten Änderungen, außergewöhnlichen Einflüssen und gemäß in Anhang 3 der BetrSichV genannten Fristen sind diese Prüfungen zu wiederholen.

ORC-Anlagen für die drei betrachteten Arbeitsmittel beinhalten eine überwachungsbedürftige Druckanlage. Daher gelten weitergehende Anforderungen nach Abschnitt 3 BetrSichV (§ 15 ff.) an die Prüfung dieser Druckanlage. Im Fall von Isobutan und Isopentan sind zusätzlich eine oder mehrere überwachungsbedürftige Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen vorhanden, womit weitere Prüfschritte für diese Anlagenteile erforderlich werden.

Der Arbeitgeber hat gemäß § 15 BetrSichV sicherzustellen, dass eine überwachungsbedürftige Anlage vor erstmaliger Inbetriebnahme und vor Wiederinbetriebnahme nach prüfpflichtigen Änderungen nach Maßgabe der in Anhang 2 genannten Vorgaben geprüft wird. Bei der Prüfung ist festzustellen,

1. ob die für die Prüfung benötigten technischen Unterlagen, wie beispielsweise eine EG-Konformitätserklärung, vorhanden sind und ihr Inhalt plausibel ist und
2. ob die Anlage einschließlich der Anlagenteile entsprechend dieser Verordnung errichtet ist und sich auch unter Berücksichtigung der Aufstellbedingungen in einem sicheren Zustand befindet.

Die Prüfung ist nach Maßgabe der in Anhang 2 BetrSichV genannten Vorgaben durchzuführen. Prüfinhalte, die im Rahmen von Konformitätsbewertungsverfahren geprüft und dokumentiert wurden, müssen nicht erneut geprüft werden.

Bei der Prüfung vor erstmaliger Inbetriebnahme ist auch festzustellen,

1. ob die getroffenen sicherheitstechnischen Maßnahmen geeignet und wirksam sind und
2. ob die Frist für die nächste wiederkehrende Prüfung nach § 3 Absatz 6 zutreffend festgelegt wurde.

Weiter hat der Arbeitgeber gemäß § 16 BetrSichV sicherzustellen, dass überwachungsbedürftige Anlagen nach Maßgabe der in Anhang 2 genannten Vorgaben wiederkehrend auf ihren sicheren Zustand hinsichtlich des Betriebs geprüft werden.

Ein Teil der Prüfungen kann von befähigten Personen durchgeführt werden, ein anderer Teil muss von zugelassenen Überwachungsstellen durchgeführt werden. In Anhang 2 der BetrSichV wird eine Abgrenzung vorgenommen und es werden nähere Anforderungen an Prüfungen bestimmt.

Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen, soweit in ORC-Anlagen gegeben, können gemäß Anhang 2 Abschnitt 3 der BetrSichV durch befähigte Personen geprüft werden, an deren Berufsausbildung, Berufserfahrung und berufliche Tätigkeit spezielle Anforderungen gestellt werden.

Sie sind vor der erstmaligen Inbetriebnahme, nach prüfpflichtigen Änderungen, nach Instandsetzung und mindestens alle sechs Jahre wiederkehrend auf Explosionssicherheit zu prüfen. Hierbei sind das im Explosionsschutzdokument nach § 6 Absatz 9 Nummer 2 der Gefahrstoffverordnung dargelegte Explosionsschutzkonzept und die Zoneneinteilung zu berücksichtigen.

Bei den Prüfungen vor Inbetriebnahme und nach prüfpflichtigen Änderungen ist festzustellen, ob

a) die für die Prüfung benötigten technischen Unterlagen vollständig vorhanden sind,
b) die Anlage entsprechend dieser Verordnung errichtet und in einem sicheren Zustand ist und
c) die festgelegten technischen und organisatorischen Maßnahmen wirksam sind.

Vergleichbare Anforderungen gelten für die wiederkehrenden Prüfungen.

Für die Anforderungen an die Prüfung von ORC-Anlagen als Druckbehälteranlage sind die Eigenschaften der enthaltenen Stoffe, die zulässigen Betriebsdrücke und die Volumina einzelner Anlagenteile relevant. Da nicht alle diese Daten vorliegen, ist eine abschließende Angabe der Anforderungen hier nicht möglich.

Die Grundanforderungen an die Gegenstände von Prüfungen entsprechen den obengenannten.

Bei den Prüfungen wird unterschieden zwischen äußerer Prüfung, innerer Prüfung und Festigkeitsprüfung. Bei Druckanlagen darf eine Prüffrist maximal zehn Jahre betragen. Soweit eine Prüfung durch eine zugelassene Überwachungsstelle erforderlich ist, beträgt bei Druckanlagen die Höchstfrist für die äußere Prüfung zwei Jahre, für die innere Prüfung fünf Jahre und für die Festigkeitsprüfung zehn Jahre.

Voraussichtlich wird für alle Arten von Arbeitsmitteln und Anlagengrößen eine Prüfung der Druckbehälteranlage vor Inbetriebnahme durch eine zugelassene Überwachungsstelle erforderlich. Bei den wiederkehrenden Prüfungen ist bei Anlagen mit kleineren Volumina ggf. eine Prüfung durch eine befähigte Person und Eigenfestlegung der Fristen für wiederkehrende Prüfungen möglich. Bei Anlagen mit größeren Volumina sind diese Prüfungen durch zugelassene Überwachungsstellen durch zuführen und es gelten die Höchstfristen: äußere Prüfung: zwei Jahre, innere Prüfung: fünf Jahre und Festigkeitsprüfung: zehn Jahre.

Neben diesen Anforderungen an Prüfungen und Prüfer ist auch die Art der Prüfung von hoher Bedeutung. Für die innere und Festigkeitsprüfung muss die Anlage in der Regel entleert werden. Dies gestaltet sich naturgemäß bei Gasen aufwändiger als bei Flüssigkeiten, so dass bei Isobutan bei den fünfjährlichen inneren Prüfungen mit einem höheren Aufwand zu rechnen ist.

5.3 Gefahrstoffverordnung

Die Gefahrstoffverordnung [31] dient insbesondere dem Schutz der Beschäftigten und anderer Personen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, wie den hier betrachteten Arbeitsmitteln. Zentrales Instrument hierzu ist die Gefährdungsbeurteilung nach § 6 GefahrstoffV, die bei Gefährdungen durch gefährliche explosionsfähige Gemische ein Explosionsschutzdokument beinhalten muss[15].

Im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung hat der Arbeitgeber festzustellen, ob die Beschäftigten Tätigkeiten mit Gefahrstoffen ausüben oder ob bei Tätigkeiten Gefahrstoffe entstehen oder freigesetzt werden können. Ist dies der Fall, so hat er alle hiervon ausgehenden Gefährdungen der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten unter folgenden Gesichtspunkten zu beurteilen:

1. gefährliche Eigenschaften der Stoffe oder Zubereitungen, einschließlich ihrer physikalisch-chemischen Wirkungen,
2. Informationen des Herstellers oder Inverkehrbringers zum Gesundheitsschutz und zur Sicherheit insbesondere im Sicherheitsdatenblatt,
3. Art und Ausmaß der Exposition unter Berücksichtigung aller Expositionswege; dabei sind die Ergebnisse der Messungen und Ermittlungen nach § 7 Absatz 8 GefahrstoffV zu berücksichtigen,
4. Möglichkeiten einer Substitution,
5. Arbeitsbedingungen und Verfahren, einschließlich der Arbeitsmittel und der Gefahrstoffmenge,
6. Arbeitsplatzgrenzwerte und biologische Grenzwerte,
7. Wirksamkeit der ergriffenen oder zu ergreifenden Schutzmaßnahmen,
8. Erkenntnisse aus arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen nach der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge.

Der Arbeitgeber hat festzustellen, ob die verwendeten Stoffe, Gemische und Erzeugnisse bei Tätigkeiten, auch unter Berücksichtigung verwendeter Arbeitsmittel, Verfahren und der Arbeitsumgebung sowie ihrer möglichen Wechselwirkungen, zu Brand- oder Explosionsgefährdungen führen können. Ist dies der Fall, so hat er ein Explosionsschutzdokument zu erstellen. Daraus muss insbesondere hervorgehen,

1. dass die Explosionsgefährdungen ermittelt und einer Bewertung unterzogen worden sind,
2. dass angemessene Vorkehrungen getroffen werden, um die Ziele des Explosionsschutzes zu erreichen (Darlegung eines Explosionsschutzkonzeptes),
3. ob und welche Bereiche entsprechend Anhang I Nummer 1.7 GefahrstoffV in Zonen eingeteilt wurden,
4. für welche Bereiche Explosionsschutzmaßnahmen nach § 11 und Anhang I Nummer 1 GefahrstoffV getroffen wurden,
5. wie die Vorgaben nach § 15 GefahrstoffV umgesetzt werden und

[15] BetrSichV und GefahrstoffV fordern beide eine Gefährdungsbeurteilung, sie fordern aufgrund ihrer unterschiedlichen Ziele jedoch unterschiedliche Inhalte.

6. welche Überprüfungen nach § 7 Absatz 7 GefahrstoffV und welche Prüfungen zum Explosionsschutz nach Anhang 2 Abschnitt 3 der Betriebssicherheitsverordnung durchzuführen sind.

Gemäß § 11 GefahrstoffV hat der Arbeitgeber zur Vermeidung von Brand- und Explosionsgefährdungen Maßnahmen nach folgender Rangfolge zu ergreifen:

1. gefährliche Mengen oder Konzentrationen von Gefahrstoffen, die zu Brand- oder Explosionsgefährdungen führen können, sind zu vermeiden,
2. Zündquellen oder Bedingungen, die Brände oder Explosionen auslösen können, sind zu vermeiden,
3. schädliche Auswirkungen von Bränden oder Explosionen auf die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten und anderer Personen sind so weit wie möglich zu verringern.

Gemäß Anhang I Nr. 1.6 GefahrstoffV sind bei der Festlegung von Schutzmaßnahmen nach § 11 Absatz 2 Nummer 1 GefahrstoffV insbesondere Maßnahmen nach folgender Rangfolge zu ergreifen:

1. es sind Stoffe und Zubereitungen einzusetzen, die keine explosionsfähigen Gemische bilden können, soweit dies nach dem Stand der Technik möglich ist,
2. ist dies nicht möglich, ist die Bildung von gefährlichen explosionsfähigen Gemischen zu verhindern oder einzuschränken, soweit dies nach dem Stand der Technik möglich ist,
3. gefährliche explosionsfähige Gemische sind gefahrlos nach dem Stand der Technik zu beseitigen.

Kann das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Gemische nicht sicher verhindert werden, hat der Arbeitgeber Schutzmaßnahmen zu ergreifen, um eine Zündung zu vermeiden. Für die Festlegung von Maßnahmen und die Auswahl der Arbeitsmittel kann der Arbeitgeber explosionsgefährdete Bereiche nach Nummer 1.7 in Zonen einteilen und entsprechende Zuordnungen nach Nummer 1.8 vornehmen.

Für ORC-Anlagen sind gemäß Nummer 1.8 des Anhangs I GefahrstoffV in explosionsgefährdeten Bereichen, die in Zonen eingeteilt sind, folgende Kategorien von Geräten zu verwenden:

- in Zone 0: Geräte der Kategorie 1,
- in Zone 1: Geräte der Kategorie 1 oder der Kategorie 2,
- in Zone 2: Geräte der Kategorie 1, der Kategorie 2 oder der Kategorie 3.

Eine Gefährdungsbeurteilung (gemäß GefahrstoffV) ist für alle drei betrachteten Arbeitsmittel erforderlich, die Anforderungen an den Explosionsschutz aus § 11 und Anhang I GefahrstoffV dürften jedoch nur bei Einsatz von Isopentan und Isobutan zu erfüllen sein. Dies sind insbesondere:

- Erstellung eines Explosionsschutzdokuments,
- besondere Schutzmaßnahmen gemäß § 11 GefahrstoffV,
- Maßnahmen nach Anhang I Nummer 1.6 GefahrstoffV,
- ggf. Ausweisung von Zonen explosionsgefährdeter Bereiche nach Anhang I Nummer 1.6 GefahrstoffV,
- Pflicht zum Einsatz entsprechender Geräte nach Anhang I Nummer 1.8 GefahrstoffV.

Sowohl organisatorische Anforderungen als auch Anforderungen an die Beschaffenheit und den Betrieb der Anlagentechnik sind daher bei den hier betrachteten reinen Kohlenwasserstoffen gegenüber R245fa erhöht.

Eine eigene Qualität stellen die Pflichten zur Substitution nach § 6 Absatz 1 Nummer 4 und Anhang I Nummer 1.6 GefahrstoffV dar. Hiernach ist es grundsätzlich geboten, die Kohlenwasserstoffe durch einen anderen nicht entzündlichen Stoff, wie R245fa, zu ersetzen, da hierdurch Brand- und Explosionsgefährdungen vermieden werden. Zur Unterstützung von Einzefallentscheidungen des Arbeitgebers ist die Technische Regel für Gefahrstoffe 600 „Substitution“[16] erschienen. Diese beschreibt, wie eine Prüfung der Substitutionsmöglichkeiten durch einen Arbeitgeber durchzuführen ist. Sie beschreibt hierzu mehrere Vorgehensweisen, die die vorliegende Problematik – Abwägung von physikalisch-chemischer Gefährdung von Menschen gegen Klimaschutz – jedoch nicht lösen.

5.4 Gewässerschutz

Anforderungen an den Schutz von Gewässern – was das Grundwasser einschließt – werden in den §§ 62 und 63 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [35] geregelt. Derzeit[17] werden die Anforderungen durch die Verordnungen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS)[18] der Länder konkretisiert. Dem überwiegenden Teil dieser Verordnungen liegt zwar eine Muster-VAwS zu Grunde, jedoch gibt es eine Reihe von Abweichungen und sogar methodisch grundsätzlich abweichende VAwS. Aus diesem Grunde erscheint es sinnvoll, die möglichen Anforderungen an ORC-Anlagen auf der Basis der im Entwurf befindlichen Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)[19] des Bundes, die die VAwS der Länder ersetzen soll, zu prüfen, auch wenn derzeit nicht absehbar ist, ob, wann und mit welchen Anforderungen im Einzelnen diese verabschiedet wird.

Nach § 1 Abs.1 soll die AwSV keine Anwendung finden auf im Bundesanzeiger veröffentlichte, nicht wassergefährdende Stoffe. Sie wird damit voraussichtlich bei Verwendung von Isobutan als Reinstoff keine Anwendung finden.

Weiter soll die AwSV nach § 1 Abs. 3 keine Anwendung finden, wenn das Volumen flüssiger wassergefährdender Stoffe 0,22 m³ nicht überschreitet. Hierbei sind nicht nur die Volumina der Arbeitsmittel, sondern auch sonstiger wassergefährdender Stoffe, wie etwa Hydraulikölen, zu berücksichtigen da sich der Wert von 0,22 m³ auf das gesamte Volumen der vorhandenen flüssigen wassergefährdenden Stoffe bezieht. Insofern ist davon auszugehen, dass die AwSV nur auf kleinere ORC-Anlagen keine Anwendung findet, wobei dies insbesondere für die Anlagen mit R245fa gelten dürfte.

Da ORC-Anlagen im Geothermiebereich in den meisten Fällen höhere Leistungen als 1 MW_{el} haben, dürften die Volumina an Arbeitsmitteln bei diesen Anlagen so hoch sein, dass das o. g. Mindestvolumen für die Anwendbarkeit der AwSV überschritten wird. Legt man den im Bericht unterstellten Bedarf an Arbeitsmittel für die Modellanlagen (Isopentan: 42 t und R245fa: 60 t, Tabelle 12 und Tabelle 13) zu Grunde, so ist die AwSV wegen der Arbeitsmittel bei der Verwendung von Isopentan und bei der Verwendung von R245fa anzuwenden.

Nicht auf ORC-Anlagen anwendbar dürfte die Ausnahmeregelung in § 34 AwSV, die den Verzicht auf Rückhaltevorrichtungen bei Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe im Bereich der Energieversorgung betrifft, sein. Hiernach bemessen sich ausschließlich die Anforderungen

1. an die Verwendung von Stoffen mit WGK 1 oder WGK 2,

---

16 TRGS 600, Technische Regeln für Gefahrstoffe „Substitution“, Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2008

17 Stand 01.07.2015

18 Nähere Informationen unter http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/binnengewaesser/wasser-binnengewaesser-download/artikel/awsv-verordnung-ueber-anlagen-zum-umgang-mit-wassergefaehrdenden-stoffen

19 Nähere Informationen unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/awsv_bf.pdf

2. die in derartigen Anlagen als Kühl-, Schmier- oder Isoliermittel oder als Hydraulikflüssigkeit eingesetzt werden und
3. maximal mit einem Volumen von 10 m³ vorhanden sind,

ausschließlich nach § 34 Absatz 2 und 3 AwSV.

Da die Arbeitsmittel in ORC-Anlagen zu anderen als den genannten Zwecken verwandt werden, gilt diese Spezialregelung grundsätzlich nicht für die gesamte ORC-Anlage, sondern nur für die Teile, in denen die in § 34 AwSV genannten Stoffe eingesetzt werden. Dies könnte Kühl-, Schmier- oder Isoliermittel oder Hydraulikflüssigkeit für die Turbinen betreffen.

Die Grundsatzanforderungen an Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe finden sich in § 17 Absatz 1 AwSV:

Anlagen müssen so geplant und errichtet werden, beschaffen sein und betrieben werden, dass

1. wassergefährdende Stoffe nicht austreten können,
2. Undichtheiten aller Anlagenteile, die mit wassergefährdenden Stoffen in Berührung stehen, schnell und zuverlässig erkennbar sind,
3. austretende wassergefährdende Stoffe schnell und zuverlässig erkannt und zurückgehalten sowie ordnungsgemäß entsorgt werden; dies gilt auch für betriebsbedingt auftretende Spritz- und Tropfverluste, und
4. bei einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs der Anlage (Betriebsstörung) anfallende Gemische, die ausgetretene wassergefährdende Stoffe enthalten können, zurückgehalten und ordnungsgemäß als Abfall entsorgt oder als Abwasser beseitigt werden.

Eine Darstellung der darauf folgenden, einzelnen, präzisierenden Regelungen ist hier nicht möglich.

Eine Pflicht zur Prüfung der ORC-Anlage durch Sachverständige nach § 47 ergibt sich nach § 46 AwSV in Verbindung mit Anlage 5 ab der Gefährdungsstufe B gemäß § 39, woraus dann gemäß § 40 AwSV auch eine Anzeigepflicht bei Errichtung und wesentlicher Änderung resultiert. Die Gefährdungsstufe B wird bei WGK 1 ab dem Vorhandensein von mehr als 100 m³ und bei WGK 2 ab dem Vorhandensein von mehr als 1 m³ erreicht. Hierbei ist zu beachten, dass wiederum alle wassergefährdenden Stoffe in der ORC-Anlage in diese Volumina entsprechend ihrer WGK einzubeziehen sind. Berücksichtigt man nur die ORC-Arbeitsmittel, so würde die Gefährdungsstufe B bei Einsatz von R245fa als Arbeitsmittel ab 100 m³ und bei Einsatz von Isopentan als Arbeitsmittel ab 1 m³ erreicht.

5.5 Störfall-Verordnung

Betriebsbereiche, in denen größere Mengen bestimmter gefährlicher Stoffe vorhanden sind, unterliegen der Störfall-Verordnung [36], die spezielle Sicherheitsanforderungen enthält, um Störfälle zu verhindern und Auswirkungen dennoch eintretender Störfälle zu begrenzen. Hierbei wird zwischen den Grundpflichten, die für alle Betriebsbereiche gelten, und den erweiterten Pflichten, die erst ab höheren Schwellwerten der gefährlichen Stoffe gelten, unterschieden.

Wichtigste Grundpflichten sind:

- Die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren zur Verhinderung von Störfällen erforderlichen Vorkehrungen zu treffen,
- unabhängig davon, vorbeugende Maßnahmen zu treffen, um die Auswirkungen (von dennoch eintretenden) Störfällen so gering wie möglich zu halten,
- Beschaffenheit und Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs müssen dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen,
- ein Konzept zur Verhinderung von Störfällen ist zu erarbeiten und anzuwenden,

- ein Sicherheitsmanagementsystem ist zu erarbeiten und anzuwenden,
- Störfälle, Ereignisse mit „Lernpotential“ und Ereignisse, die Gefahren verursachten, zu melden.

Zu den wichtigsten erweiterten Pflichten gehört:

- Die Erarbeitung eines Sicherheitsberichts,
- die Erstellung interner Alarm- und Gefahrenabwehrpläne,
- die Information aller Personen, die (von einem Störfall) betroffen werden könnten.

Entsprechend dem Anhang I der Seveso-III-Richtlinie [37], auf dessen Basis ein Entwurf zur Novellierung der Störfall-Verordnung vorliegt, findet die Störfall-Verordnung aufgrund des Vorhandenseins

- von R245fa keine Anwendung,
- von Isopentan ab 10.000 kg mit den Grundpflichten und 50.000 kg mit den erweiterten Pflichten,
- von Isobutan ab 10.000 kg mit den Grundpflichten und 50.000 kg mit den erweiterten Pflichten

Anwendung. Mit den in Tabelle 12 und Tabelle 13 (Isopentan: 42.000/47.000 kg und Isobutan: 49.000/58.000 kg) genannten Werten für den Arbeitsmittelbedarf lässt sich abschätzen, dass eine Anwendung der Störfall-Verordnung aufgrund des Arbeitsmittels Isopentan sowie Isobutans mit den Grundpflichten bzw. erweiterten Pflichten möglich ist.

Allerdings sind bei der konkreten Prüfung der Anwendbarkeit der Störfall-Verordnung auch noch ggf. vorhandene sonstige Volumina und sonstige gefährliche Stoffe zu berücksichtigen, einschließlich derer bei denen vernünftigerweise vorhersehbar ist, dass sie bei außer Kontrolle geratenen Prozessen, einschließlich Lagerungstätigkeiten, anfallen. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn das geförderte Wasser Schwefelwasserstoff enthalten sollte.

5.6 Klimaschutz

Die im Jahr 2014 in Kraft getretene europäische Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase [38] sieht seit dem 1. Januar 2015 für ORC-Anlagen mit fluorierten Treibhausgasen wie R245fa als Arbeitsmittel neue Pflichten vor. Dies sind insbesondere regelmäßige Dichtheitskontrollen nach Artikel 4 der Verordnung, für deren Durchführung der Betreiber die Verantwortung trägt. Leckage-Erkennungssysteme sind für ORC-Anlagen mit fluorierten Treibhausgasen vorgeschrieben, die ab dem 1. Januar 2017 installiert werden und deren Arbeitsmittel-Füllmenge einem Treibhauspotenzial (GWP) von mindestens 500 t CO_2-Äquivalenten entspricht. Bei R245fa mit einem GWP von 1.030 träfe das auf Anlagen mit einer Arbeitsmittelmenge ab 485 kg zu.

Betreiber sind verpflichtet Aufzeichnungen zu fluorierten Treibhausgasen zu führen (Artikel 6), die Rückgewinnung muss durch angemessen qualifizierte Personen erfolgen (Artikel 8 (3)) und die Anlagen sind nach Artikel 12 zu kennzeichnen.

Ziel der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 ist eine Reduktion der Emissionen der fluorierten Treibhausgase. Dieses Ziel soll im Wesentlichen durch eine schrittweise Reduktion der am Markt verfügbaren Menge an fluorierten Treibhausgasen, gemessen in CO_2-Äquivalenten, erreicht werden (sogenanntes Phase down). So wird die im Jahr 2015 verfügbare Menge fluorierter Treibhausgase in CO_2-Äquivalenten bis zum Jahr 2030 um 79% reduziert werden. Daher ist mit erheblichen Veränderungen der Marktsituation für fluorierte Treibhausgase bezüglich Preis und Verfügbarkeit zu rechnen.

5.7 Kosten und Verfügbarkeit

Die untersuchten Arbeitsmittel Isopentan, Isobutan und R245fa sind derzeit (2014) auf dem Markt verfügbar. Die Preise für die Arbeitsmittel Isobutan und Isopentan sind auf einem ähnlichen Niveau. Der Preis für das Arbeitsmittel R245fa wird derzeit (2014) als doppelt so hoch angegeben [39].

Bei fluorierten Arbeitsmitteln wie R245fa mit hohem Treibhauspotenzial (GWP), sind durch das Phase down (siehe Kapital 5.6) Verfügbarkeits- oder Lieferengpässe und Preisanstiege zu erwarten.

5.8 Zusammenfassung

Die drei betrachteten Arbeitsmittel haben unterschiedliche Eigenschaften wodurch sich unterschiedliche rechtliche Anforderungen ergeben (Tabelle 11).

Als nicht entzündbares Gas bedarf R245fa keiner aufwendigen Maßnahmen zur Minderung von Brand- und Explosionsrisiken für Menschen und Umwelt. Die Gewässergefährdung des Reinstoffes ist nur schwach (WGK 1), weshalb sich signifikante Anforderungen (Rückhaltevorrichtungen, Maßnahmenpläne etc.) erst bei größeren Mengen als Arbeitsmittel ergeben werden. Die konkreten Anforderungen legt letztlich die für die Anlagengenehmigung zuständige Stelle fest. Aufgrund des enthaltenen Fluors und seines hohen Treibhauspotentials zählt R245fa zu den mittel- bis langfristig in der EU durch Stoffe mit geringerem Treibhauspotential zu substituierenden Stoffen. Die für den Einsatz von fluorierten Gasen bis zu deren Substitution erforderlichen Dichtigkeitskontrollen entsprechen denen, die nach GefahrstoffV und BetrSichV für entzündliche Gase und Dämpfe aus Gründen des Explosionsschutzes erforderlich sind. Die Forderung nach einem Leckageerkennungssystem ist grundsätzlich eine zusätzliche Anforderung, jedoch werden derartige Systeme auch oft in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt. Offen ist die Frage, wie die Emissionen von R245fa gemindert werden sollen, wenn die Anlage für Instandhaltungsmaßnahmen, innere oder Festigkeitsprüfungen entleert werden muss. Bei den hohen Arbeitsmittelmengen sind hier Freisetzungen großer Mengen fluorierter Treibhausgase möglich.

Aufgrund der Entzündlichkeit und des Wassergefährdungspotenzials (WGK 2) von Isopentan sind Arten und Ausmaß der lokal zu berücksichtigenden Gefahren deutlich höher als bei R245fa. Gemäß GefahrstoffV ist grundsätzlich zu prüfen, ob das Arbeitsmittel durch einen anderen, nicht entzündlichen Stoff ersetzt werden kann. Kommt Isopentan zum Einsatz, wie in mindestens zwei Geothermie-ORC-Anlagen in Deutschland, müssen grundsätzlich die Brand- und Explosionsrisiken bei Auslegung, Errichtung und Betrieb beachtet werden, was jeweils zu einem erhöhten Aufwand führt. Die Gewässergefährdung wird technische und organisatorische Maßnahmen erforderlich machen; insbesondere kann eine Pflicht zur Prüfung durch Sachverständige sowie zur Anzeige vor Errichtung und prüfpflichtigen Änderungen bestehen.

Für Isobutan gilt in Bezug auf die Entzündlichkeit das für Isopentan Gesagte, wobei der Aufwand zur Minimierung der Brand- und Explosionsrisiken bei Auslegung, Errichtung und Betrieb höher ist. Dafür entfallen Maßnahmen zum Gewässerschutz. Zu klären ist, wie das Isobutan aufgefangen werden kann, wenn die ORC-Anlage entleert werden muss oder Teile davon entleert werden müssen um Instandhaltungsmaßnahmen, innere oder Festigkeitsprüfungen durchzuführen.

Die Betrachtung der Anforderungen des Arbeitsschutz- und Umweltrechts an ORC Anlagen am Beispiel der drei Arbeitsmittel R245fa, Isobutan und Isopentan zeigt Zielkonflikte sowohl zwischen Arbeitsschutz- und Umweltrecht als auch innerhalb des Umweltrechts auf. Sind Isobutan und Isopentan aus Gründen des Klimaschutzes vorzuziehen, so sind sie aus Gründen des Brand- und Explosionsschutzes ungünstig, wohin gegen es sich bei R245fa genau umgekehrt verhält. Insgesamt erscheint es daher sinnvoll, weiter zu prüfen, ob es als Arbeitsmittel geeignetere Stoffe gibt, die beiden Arten von Zielen stärker gerecht werden.

Tabelle 11: Übersicht rechtlicher Anforderungen an die Arbeitsmittelverwendung

		R245fa	Isopentan	Isobutan
Maschinenverordnung		Risikobeurteilung unter Beachtung Druck	Risikobeurteilung unter Beachtung Druck sowie Brand- und Explosionsgefahren	
Druckgeräteverordnung		Anlagenteile als Druckgeräte auslegen und errichten		
		Fluid Gruppe 2	Fluid Gruppe 1	Fluid Gruppe 1
Explosionsschutzverordnung		nicht relevant	Anlagenteile mit Ex-Schutz auslegen und errichten	
Betriebssicherheitsverordnung		Prüfungen der Druckanlage		
		bei Entleerung für Instandhaltung:		
		innere oder Festigkeitsprüfung:		
		Aufwand Rückgewinnung	Emissionsminderung erforderlich	
		-	Prüfung der Anlagenteile in explosionsgefährdeten Bereichen	
Gefahrstoffverordnung		-	**Substitutionsprüfung erforderlich**	
		-	Explosionsschutz erforderlich (Explosionsschutzkonzept, Explosionsschutzdokument und Geräte mit geeigneter Kategorie)	
Gewässerschutz	WGK	1	**2**	nicht wassergefährdend
(Einordnung basierend auf WGK des Reinstoffes, Maßnahmen sind im speziellen Anwendungsfall zu prüfen.)	Prüfung durch Sachverständige ab	100 m³	**1 m³**	-
	Anzeigepflichten ab			
Störfall-Verordnung		nicht relevant	hohe Schwellen	hohe Schwellen
Klimaschutz	GWP	1.030	5	3
		ab 2017 und 485 kg Füllmenge Leckageerkennungssystem erforderlich;		
		seit 2015 Beschränkung der Marktverfügbarkeit		

6 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

In dieser Arbeit wurden Daten von realen ORC-Anlagen zur Stromgewinnung aus geothermischer Wärme erhoben. Daraus konnten vier Grundtypen von Anlagen abgeleitet werden. Diese Grundtypen wurden für vergleichende Berechnungen der erzielbaren elektrischen Leistungen und die Wirkung von Effizienzsteigerungsmaßnahmen verwendet.

Die Anlagengrundtypen 1 – Standard-ORC und Typ 2 – zweistufige ORC-Anlage wurden in Modellanlagen überführt, um sie mit einer Fließschemasimulationssoftware zu modellieren. Bestimmt wurden mit der Simulation energetische und exergetische Kraftwerks- und (Gesamt-)Anlagenwirkungsgrade für die in Deutschland typischen Thermalwassertemperaturen und für verschiedene Arbeitsmittel.

Im Vergleich zu den Modellanlagen des Typs 1 – Standard ORC ergeben sich in den Modellanlagen des Typs 2 – Zweistufiger ORC bei gleichen geothermischen Förderleistungen höhere Anlagenwirkungsgrade und es kann entsprechend mehr elektrische Energie erzeugt werden. Unter den hier unterstellten Randbedingungen werden die höchsten elektrischen Leistungen und Anlagenwirkungsgrade bei beiden Modellanlagentypen mit dem Arbeitsmittel Isobutan erreicht.

Im zweiten Schritt wurde für die Modellanlagen eine ökologische Analyse erstellt. Für die Obertageanlage sind die strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen abhängig vom Anlagentyp und dem Arbeitsmittel. Für den Modelltyp 2 – Zweistufiger ORC wurden bei allen betrachteten Arbeitsmitteln geringere strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen als für Modelltyp 1 – Standard ORC berechnet. Bei der Verwendung von Isobutan und Isopentan als Arbeitsmittel fallen deutlich geringere strominduzierte CO_2-Äquivalentemissionen für die Obertageanlage an als beim Einsatz von fluorierten Arbeitsmitteln (z. B. R245fa). Bei Isobutan und Isopentan dominieren die CO_2-Emissionen beim Bau der Obertageanlage die Höhe der strominduzierten CO_2-Äquivalentemissionen, bei fluorierten Arbeitsmitteln sind dagegen die direkten Emissionen des Arbeitsmittels beim Rückbau und Betrieb der Anlage für die Bilanz bestimmend.

Für weitere spezifische strominduzierte Umweltwirkungen, wie der Verbrauch von fossiler Energie und Emissionen mit versauernder und eutrophierender Wirkung, ergeben sich bei Modelltyp 2 – Zweistufiger ORC für die Obertageanlage geringere Verbräuche fossiler Energie und weniger Emissionen wegen der höheren energetischen Anlageneffizienz im Vergleich mit Modelltyp 1 – Standard ORC. Die Änderung des Arbeitsmittels beeinflusst, in dem hier betrachteten Bilanzrahmen, die Ergebnisse kaum.

Die ökobilanzierende Betrachtung ergibt somit, ausgehend von den hier untersuchten Modellanlagen und unterstellten Randbedingungen, für ORC-Anlagen mit effizienzsteigernden Maßnahmen in Kombination mit Kohlenwasserstoffen wie Isobutan und Isopentan als Arbeitsmittel die geringsten Umweltauswirkungen und die geringsten treibhausgasbedingten Emissionen. Aus gegenwärtiger Sicht wird erwartet, dass in den kommenden Jahren weitere Effizienzsteigerungsmaßnahmen, z. B. überkritische Kraftwerke, am Markt umgesetzt werden. Es wäre sinnvoll, diese neuen Konzepte ökobilanziell zu untersuchen, sobald eine ausreichende Datenlage besteht.

Die Betrachtung der Anforderungen des Arbeitsschutz- und Umweltrechts an ORC Anlagen am Beispiel der drei Arbeitsmittel R245fa, Isobutan und Isopentan zeigt Zielkonflikte sowohl zwischen Arbeitsschutz- und Umweltrecht als auch innerhalb des Umweltrechts auf. Sind Isobutan und Isopentan aus Gründen des Klimaschutzes vorzuziehen, so sind sie aus Gründen des Brand- und Explosionsschutzes ungünstig, wohin gegen es sich bei R245fa genau umgekehrt verhält. Insgesamt erscheint es daher sinnvoll, weiter zu prüfen, ob es als Arbeitsmittel geeignetere Stoffe gibt, die beiden Arten von Zielen stärker gerecht werden.

7 Literatur

[1] 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, Abschlussbericht, Institut für Energetik und Umwelt Leipzig, 2007.

[2] Heberle, F., Obermeier, A., Brüggemann, D.: Mögliche Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie durch den Einsatz von F-Gasen im Energiewandlungsprozess mittels ORC, Climate Change 16/2012, November 2012.

[3] Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 5. Auflage. Springer Berlin 2013.

[4] Janczik, S., Kock, N., Kaltschmitt, M.: Techniksysteme und Entwicklungstendenzen, in: Böttcher, J. (Hrsg.): Geothermie-Vorhaben: Tiefe Geothermie: Recht, Technik und Finanzierung, Oldenbourg Verlag, München, 2014.

[5] Janczik, S., Kock, N., Kaltschmitt, M.: Geothermische Stromerzeugung, In: Gerhard, M., Rüschen, Th., Sandhövel, A. (Hrg.): Finanzierung Erneuerbarer Energien, Frankfurt School Verlag GmbH, 2011.

[6] Janczik, S.; Kupfermann, G., Saadat, A., Kaltschmitt, M.: Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2014 gemäß § 65 EEG, Technische Universität Hamburg Harburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft und GeoForschungsZentrum Potsdam, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Zwischenbericht Juli 2014.

[7] Strauß, K.: Kraftwerkstechnik, 5. Auflage, Springer Verlag, 2006.

[8] Köhler, S.: Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse Analyse und Prozessvergleich binärer Kraftwerke, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2005.

[9] Janczik, S., Kaltschmitt. M.: Nutzung der Tiefen Geothermie in Deutschland und weltweit – Statusreport 2014, Erdöl, Erdgas, Kohle 130 (2014), 7/8, S. 298 – 303.

[10] Agemar, T., Weber, J. Schulz, R.: Deep Geothermal Energy Production in Germany, Energies 7 (2014), 7, S. 4397–4416.

[11] GtV - Bundesverband Geothermie e.V.: www.geothermie.de, Projekte, (Stand 2014).

[12] Informationsportal Tiefe Geothermie: www.tiefegeothermie.de, News, (Stand 2014).

[13] Geothermal Energy Association: Annual U.S and Global Geothermal Power Production Report, April 2014.

[14] Umweltbundesamt: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012. Climate Change 24/2014, Juli 2014. [Kapitel 4.7.9.9, S. 395 ff.].

[15] Heberle, F: Untersuchungen zum Einsatz von zeotropen Fluidgemischen im Organic Rankine Cycle für die geothermische Stromerzeugung, Universität Bayreuth, Dissertation, 2013.

[16] Aspen physical property system: Physical property methods and models 11.1 URL: http://www.aspentech.com/products/aspen-process-manual.aspx (Stand 10.10.2012).

[17] Heberle, F., Preißinger, M., Brüggemann, D.: Konzepte zur effizienteren geothermischen Stromerzeugung auf Basis des Organic Rankine Cycle, Der Geothermiekongress 2009.

[18] Heberle, F., Brüggemann, D.: Thermodynamische Grundlagen des ORC und aktuelle Forschungstätigkeiten, Jahrestagung des ORC Fachverbandes e. V., 2012.

[19] International Organization for Standardization: DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.

[20] International Organization for Standardization: DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.

[21] Memmler, M., et al.: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012, Umweltbundesamt, 2013.

[22] Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Online Datenbank Ecoinvent. Unter: http://www.ecoinvent.org/database/. (Stand: 23.10.2012).

[23] Vierter Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate Change 2007, Working Group I: The Physical Science. (IPCC 4th AR).

[24] UBA 2014: persönliche Kommunikation zum Treibhauspotenzial fluorierter Stoffe.

[25] Baehr, H. D., Kabelac, S.: Thermodynamik, Springer Berlin, 15. Auflage, 2012.

[26] Frick, S., Kaltschmitt, M., Schröder, G.: Life Cycle Assessment of Geothermal Binary Power Plants Using Enhanced Low-Temperature Reservoirs, Energy 35 (2010), 5, S. 2281 – 2294.

[27] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.

[28] Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), die zuletzt durch Artikel 19 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist. (Stand: Zuletzt geändert durch Art. 19 G v. 8.11.2011 I 2178).

[29] Druckgeräteverordnung vom 27. September 2002 (BGBl. I S. 3777, 3806), die zuletzt durch Artikel 24 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist. (Stand: Zuletzt geändert durch Art. 24 G v. 8.11.2011 I 2178).

[30] Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt (Neufassung).

[31] Gefahrstoffverordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49) geändert worden ist. (Stand: Zuletzt geändert durch Art. 2 V v. 15.7.2013 I 2514).

[32] Elfte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Explosionsschutzverordnung) vom 12. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1914), die zuletzt durch Artikel 21 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist. (Stand: Zuletzt geändert durch Art. 21 G v. 8.11.2011 I 2178).

[33] Betriebssicherheitsverordnung vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2015 (BGBl. I S. 1187) geändert worden ist. (Stand: Geändert durch Art. 1 V v. 13.7.2015 I 1187 Ersetzt V 805-3-9 v. 27.9.2002 I 3777 (BetrSichV)).

[34] Produktsicherheitsgesetz vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178, 2179; 2012 I S. 131). (Stand: 2012).

[35] Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. November 2014 (BGBl. I S. 1724) geändert worden ist. (Stand: Zuletzt geändert durch Art. 320 V v. 15.11.2014 I S. 1724).

[36] Störfall-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. Juni 2005 (BGBl. I S. 1598), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3230) geändert worden ist. (Stand: 2013).

[37] Richtlinie 2012/18/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates.

[38] Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Amtsblatt der Europäischen Union L 150/195 vom 20.5.2014.

[39] Reiff, J.: Vergleichende und bewertende Betrachtung ausgewählter Arbeitsmittel für den ORC-Prozess in geothermischen Kraftwerken für Bayern, Masterarbeit, 2013, Hochschule Amberg – Weiden.

[40] Sulbaek Andersen, M. P., Nilsson, E. J. K., Nielsen, O. J., Johnson, M. S., Hurley, M. D., Wallington, T. J.: Atmospheric chemistry of trans-CF3CHCHCl: Kinetics of the gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals, and O3. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 199 (2008), S. 92–97.

[41] Dritter Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis. (IPCC 3rdAR).

[42] Hodnebrog, M. Etminan, J. S. Fuglestvedt, G. Marston, G. Myhre, C. J. Nielsen, K. P. Shine, T. J. Wallington: Global Warming Potentials and radiative efficiencies of halocarbons and related compounds: a comprehensive review. Reviews of Geophysics 51 (2013), 2, S. 300 - 378.

[43] Huck, P.: Identification and test of low global warming potential alternatives to HFC-245fa in Organic Rankine Cycle, 2nd International Seminar on ORC Power Systems (ASME ORC), Rotterdam, 2013.

8 Anhang

Anhang A – Technische Analyse

Tabelle 12: Technische Kenndaten der Modellanlage Typ 1

Kennwert	Einheit	Isopentan	Isobutan	R245fa	HFE7000
Elektrische Bruttoleistung	MW	4,8	5,5	5,0	5,0
Elektrische Leistung Speise-pumpe	MW	0,1	0,4	0,2	0,1
Elektrische Leistung Kondensa-tor	MW	0,5	0,5	0,5	0,5
Elektrische Leistung Tiefpumpe	MW	0,9	0,9	0,9	0,9
Elektrische Nettoleistung	MW	3,3	3,7	3,4	3,5
Anlagenwirkungsgrad	%	5,2	5,9	5,4	5,5
Gütegrad	%	16,4	18,5	17,0	17,3
Arbeitsmittelfüllmenge	t	42	49	60	50
Allokationsfaktor - Strom	-	0,9	0,9	0,9	0,9
Allokationsfaktor - Wärme	-	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabelle 13: Technische Kenndaten der Modellanlage Typ 2

Arbeitsmittel	Einheit	Isopentan	Isobutan	R245fa	HFE7000
Elektrische Bruttoleistung	MW	5,4	6,6	6,1	5,5
Elektrische Leistung Speise-pumpe	MW	0,1	0,6	0,2	0,2
Elektrische Leistung Kondensa-tor	MW	0,5	0,5	0,5	0,5
Elektrische Leistung Tiefpumpe	MW	0,9	0,9	0,9	0,9
Elektrische Nettoleistung	MW	3,8	4,6	4,4	3,8
Anlagenwirkungsgrad	%	6,0	7,3	7,1	6,2
Gütegrad	%	18,9	22,9	22,1	19,3
Arbeitsmittelfüllmenge	t	47	58	60	56
Allokationsfaktor - Strom	-	0,9	0,9	0,9	0,9
Allokationsfaktor - Wärme	-	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabelle 14: Kenndaten zum Arbeitsmittel Isobutan

Bezeichnung	Kennwert
Name	Isobutan, R600a, 2-Methylpropan
Summenformel	C_4H_{10}
CAS-Nummer	75-28-5
Kurzbeschreibung	farbloses, fast geruchloses Gas
Molare Masse	58,12 $g \cdot mol^{-1}$
Aggregatzustand	gasförmig
Dichte	2,70 $kg \cdot m^{-3}$
Schmelzpunkt	-159,42 °C
Siedepunkt	-11,7 °C
Dampfdruck bei 20 °C	3,01 bar
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	49 $mg \cdot l^{-1}$
Stoffgruppe	Kohlenwasserstoffe
Treibhauspotential (GWP) [23]	3

Tabelle 15: Kenndaten zum Arbeitsmittel Isopentan

Bezeichnung	Kennwert
Name	Isopentan, R601a, 2-Methylbutan
Summenformel	C_5H_{12}
CAS-Nummer	78-78-4
Kurzbeschreibung	farblose Flüssigkeit mit benzinartigem Geruch
Molare Masse	72,15 $g \cdot mol^{-1}$
Aggregatzustand	flüssig
Dichte	0,62 $kg \cdot m^{-3}$
Schmelzpunkt	-159,9 °C
Siedepunkt	28 °C
Dampfdruck bei 20 °C	0,76 bar
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	48 $mg \cdot l^{-1}$
Stoffgruppe	Kohlenwasserstoffe
Treibhauspotential (GWP) [23]	5

Tabelle 16: Kenndaten zum Arbeitsmittel R245fa

Bezeichnung	Kennwert
Name	1,1,1,3,3-Pentafluorpropan, R245fa
Summenformel	$C_3H_3F_5$
CAS-Nummer	460-73-1
Kurzbeschreibung	K. A.
Molare Masse	134,05 g mol^{-1}
Aggregatzustand	gasförmig
Dichte	5,84 kg·m^{-3}
Schmelzpunkt	-103 °C
Siedepunkt	15,3 °C
Dampfdruck bei 20 °C	-1,227 bar
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	130 mg·l^{-1}
Stoffgruppe	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW)
Treibhauspotential (GWP) [23]	1.030

Tabelle 17: Kenndaten zum Arbeitsmittel R227ea

Bezeichnung	Kennwert
Name	1,1,1,2,3,3,3-Heptafluorpropan, R227ea
Summenformel	C_3HF_7
CAS-Nummer	431-89-0
Kurzbeschreibung	farbloses Gas mit ätherischem Geruch
Molare Masse	170,03 g·mol^{-1}
Aggregatzustand	gasförmig
Dichte	7,3525 kg·m^{-3}
Schmelzpunkt	-131 °C
Siedepunkt	-17,3 °C
Dampfdruck bei 20 °C	3,993 bar
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	108 mg·l^{-1}
Stoffgruppe	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW)
Treibhauspotential (GWP) [41]	3.500

Tabelle 18: Kenndaten zum Arbeitsmittel R245cb

Bezeichnung	Kennwert
Name	1,1,1,2,2-Pentafluorpropan, R245cb
Summenformel	$C_3H_3F_5$
CAS-Nummer	1814-88-6
Kurzbeschreibung	k. A.
Molare Masse	134,05 $g \cdot mol^{-1}$
Aggregatzustand	gasförmig
Dichte	k. A.
Schmelzpunkt	-81 °C
Siedepunkt	-18,3 °C
Dampfdruck bei 20 °C	k. A.
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	k.A.
Stoffgruppe	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW)
Treibhauspotential (GWP) [42]	4.620

Tabelle 19: Kenndaten zum Arbeitsmittel HFE7000

Bezeichnung	Kennwert
Name	Novec 7000 (Handelsname)
Summenformel	$C_4F_9OCH_3$
CAS-Nummer	375-03-1
Kurzbeschreibung	k. A.
Molare Masse	200 $g \cdot mol^{-1}$
Aggregatzustand	flüssig
Dichte	1,4 $kg \cdot m^{-3}$
Schmelzpunkt	-122,5 °C
Siedepunkt	34 °C
Dampfdruck bei 20 °C	0,646 bar
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	60 $mg \cdot l^{-1}$
Stoffgruppe	Hydrofluorether (HFE)
Treibhauspotential (GWP) [24]	370

Tabelle 20: Kenndaten zum Arbeitsmittel FK649

Bezeichnung	Kennwert
Name	Novec 649 (Handelsname)
Summenformel	C_6-Fluorketon
CAS-Nummer	k. A.
Kurzbeschreibung	k. A.
Molare Masse	316,04 $g \cdot mol^{-1}$
Aggregatzustand	flüssig
Dichte	1,6 $kg \cdot m^{-3}$
Schmelzpunkt	-108 °C
Siedepunkt	49 °C
Dampfdruck bei 20 °C	0,404 bar
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	10 $mg \cdot l^{-1}$
Stoffgruppe	Fluorketone (FK)
Treibhauspotential (GWP) [24]	1

Tabelle 21: Kenndaten zum Arbeitsmittel R1233zd (E)

Bezeichnung	Kennwert
Name	R1233zd(E), Trans1 chlor-3,3,3-trifluor-propen
Summenformel	$C_3H_2ClF_3$
CAS-Nummer	102687-65-0
Kurzbeschreibung	leichter Geruch
Molare Masse	130,49619 $g \cdot mol^{-1}$
Aggregatzustand	flüssig
Dichte	1,27 $kg \cdot m^{-3}$
Schmelzpunkt	< - 90 °C
Siedepunkt	19 °C
Dampfdruck bei 20 °C	1,516 bar
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	1,90 g/l
Stoffgruppe	Ungesättigte teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
Treibhauspotential (GWP) [40]	7

Anhang B – Ökologische Analyse

Tabelle 22: Fragebogen Primärstatistische Datenerhebung

1. Allgemeine Angaben

- Kraftwerksstandort: Standort
- Zeitpunkt der Inbetriebnahme: Datum

2. Angaben zum Kraftwerk

- Kraftwerkskonzept: Angabe – z.B. ORC-Standard/Kalina
- Arbeitsmittel (wenn möglich bitte Datenblatt beifügen):

  Bezeichnung: Angabe – z. B. Isopentan
  Hersteller: Angabe

- Leckageerkennungssystem: Ja oder Nein

  Weitere Einrichtungen: Angabe

- Installierte elektrische Leistung in kW_{el}:

  Geplant: Angabe in kW_{el}
  Tatsächlich (aus Leistungstest): Angabe in kW_{el}

- Temperatur der Thermalwässer am Kraftwerk in °C:

  Eintritt: Angabe in °C
  Austritt: Angabe in °C

- Wärmeübertragerflüssigkeit (falls ein Zwischenkreislauf zwischen Thermalwasser und Kraftwerk genutzt wird):

  Bezeichnung: Angabe
  Masse in kg: Angabe in kg
  Dichte in kg/m^3: Angabe in kg/m^3

- Anlagenwirkungsgrad in %:

  Brutto: Angabe in %
  Netto: Angabe in %

- Betriebsdrücke in bar:

Verdampfungsdruck: Angabe in bar
Kondensationsdruck: Angabe in bar

- Wärmeübertrager in kW_{th}:

Aggregat	**in kW_{th}**
Vorwärmer	Angabe in kW_{th}
Verdampfer	Angabe in kW_{th}
Kondensator	Angabe in kW_{th}
Weiteres Aggregat	Angabe in kW_{th}
Weiteres Aggregat	Angabe in kW_{th}

- Eigenverbrauch in kW_{el}:

Aggregat	**in kW_{el}**
Tiefpumpe	Angabe in kW_{el}
Speisepumpe	Angabe in kW_{el}
Kondensationsanlage	Angabe in kW_{el}
Weiteres Aggregat	Angabe in kW_{el}
Weiteres Aggregat	Angabe in kW_{el}

- Technische Verfügbarkeit in %:

2011	**2012**
Verfügbarkeit bezogen auf x h – z. B. 8200 h	Verfügbarkeit bezogen auf x h
Angabe in %	Angabe in %

- Betriebsstunden in h/a:

2011	**2012**
Angabe in h/a	Angabe in h/a

3. Angaben zum Heizwerk (KWK)

- Geothermische Wärmeauskopplung in kW_{th}:

Geplant: Angabe in kW_{th}
Tatsächlich (aus Leistungstest): Angabe in kW_{th}

- Geothermischer Deckungsgrad in %: Angabe in %

- Durchschnittliche Temperatur Wärmenetz in °C:

Vorlauf in °C	**Rücklauf in °C**
Angabe in °C	Angabe in °C

- Technische Verfügbarkeit in %:

2011	**2012**
Verfügbarkeit bezogen auf x h	Verfügbarkeit bezogen auf x h
Angabe in %	Angabe in %

- Betriebsstunden in h/a:

2011	**2012**
Angabe in h/a	Angabe in h/a

4. Energie und Materialaufwendungen für den Bau

- Thermalwasserkreislauf:

Aufwendung	**Menge**	**Einheit**
Diesel/el. Strom	Menge	Einheit
Hochlegierter Stahl	Menge	Einheit
Niedriglegierter Stahl	Menge	Einheit
Zement	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

- Tiefpumpe:

Aufwendung	**Menge**	**Einheit**
Diesel/el. Strom	Menge	Einheit
Hochlegierter Stahl	Menge	Einheit
Niedriglegierter Stahl	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

- Wärmeübertrager:

Aufwendung	**Menge**	**Einheit**
Diesel/el. Strom	Menge	Einheit
Hochlegierter Stahl	Menge	Einheit
Niedriglegierter Stahl	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

- Kraftwerk:

Aufwendung	**Menge**	**Einheit**
Diesel/el. Strom	Menge	Einheit
Arbeitsmittel	Menge	Einheit
Hochlegierter Stahl	Menge	Einheit
Niedriglegierter Stahl	Menge	Einheit
Kupfer	Menge	Einheit
Zement	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

- Kondensationsanlage:

Aufwendung	**Menge**	**Einheit**
Diesel/el. Strom	Menge	Einheit
Hochlegierter Stahl	Menge	Einheit

Niedriglegierter Stahl	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

- Gebäude:

Aufwendung	**Menge**	**Einheit**
Diesel/el. Strom	Menge	Einheit
Hochlegierter Stahl	Menge	Einheit
Niedriglegierter Stahl	Menge	Einheit
Zement/Beton	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

- Redundanz- und Spitzenlastaggregate:

Aufwendung	**Menge**	**Einheit**
Diesel/el. Strom	Menge	Einheit
Hochlegierter Stahl	Menge	Einheit
Niedriglegierter Stahl	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

5. Energie und Materialaufwendungen für den Betrieb

- Ersatzaufwendungen:

Aggregat	**Menge**
Tiefpumpe	Menge
Weiteres Aggregat	Menge
Weiteres Aggregat	Menge
Weiteres Aggregat	Menge

- Angaben zum Arbeitsmitteleinsatz:

Nachfüllen zum Ausgleich von Leckagen:

Bezeichnung Arbeitsmittel	**Menge**	**Einheit**
Bezeichnung	Menge	Einheit
Bezeichnung	Menge	Einheit

Sonstige Gründe für das Nachfüllen: Angabe

Leckagen pro Jahr in %: Angabe in %

- Filter:

Materialaufwendung	**Einheit**
Materialaufwendungen	Einheit
Materialaufwendungen	Einheit

- Spitzenlast:

	Menge	**Einheit**
Erdgas/Erdöl	Menge	Einheit
Weiteres	Menge	Einheit

Tabelle 23: Primär- und Sekundärstatistische Datenerhebung; Energie- und Materialaufwendungen [1]

Abschnitt	Tätigkeit und Aufwand	Kennwert		Material
Quelle		**[1]**	**Datenabfrage[20]**	
Bau				
Untertage				
	Bohrplatz-einrichtung			
	Energie	20 GJ	-	Diesel
	Material	300 kg	-	Zement
	Bohrung			
	Energie	7,5 GJ/m	-	Diesel
	Bohrspülung			
	Energie	0,2 GJ/m	-	Diesel
	Material	7,7 kg/m	-	Betonit
		7 kg/m	-	Anorganische Materialien
		13 kg/m	-	Stärke
		5 kg/m	-	Kalk
		671 kg/m	-	Entk. Wasser
		6,7 kg/m	-	Calciumkarbonat
		460 kg/m	-	Bohrklein
	Verrohrung und Zementation			
	Material	69 kg/m	-	Niedriglegierter Stahl

[20] Durchschnittliche Kennwerte.

		34 kg/m	-	Hochlegierter Stahl
		24 kg/m	-	Portlandzement
		7 kg/m	-	Quarzsand
		7 kg/m	-	Zement
		17 kg/m	-	Entk. Wasser
	Stimulation			
	Energie	3.000 GJ	-	Diesel
	Material	260.000 t	-	Entk. Wasser
	Transport	413.000 tkm	-	Schienenfahr-zeuge
		144.000 tkm	-	Lastkraftwagen
Übertage				
	Thermalwasser-kreislauf			
	Energie	7,6 MJ/m	[21]	
	Material	94 kg/(m³/h)	31 kg/(m³/h)	Hochlegierter Stahl
		190 kg/(m³/h)	20 kg/(m³/h)	Niedriglegierter Stahl
		-	10 m³	Beton
	Transport	40 km	-	Lastkraftwagen
		405 km	-	Schienenfahr-zeuge
	Tiefpumpe			
		-	4 t	Hochlegierter Stahl

[21] Siehe Kraftwerk.

		-	40 t	Niedriglegierter Stahl
	Wärme-übertrager			
	Material	7 kg/kW_{th}	0,5 kg/kW_{th}	Hochlegierter Stahl
			2 kg/kW_{th}	Niedriglegierter Stahl
		-	80 m^3	Beton
	Kraftwerk			
	Energie	1 GJ	1.500 l	Diesel
		-	22.000 kWh	Strom
	Material	38 kg/kW_{el}	31 kg/kW_{el}	Niedriglegierter Stahl
			4 kg/kW_{el}	Hochlegierter Stahl
		1,2 kg/kW_{el}	6 kg/kW_{el}	Kupfer
		0,3 kg/kW_{el}	9 kg/kW_{el}	Org. Arbeitsmittel
		-	500 m^3	Beton
	(Kondensationsanlage)	1.500 kg/MW_{th}	16.000 kg/MW_{th}	Niedriglegierter Stahl
			100 m^3	Beton
	Transport	50 km	-	Lastkraftwagen
		2.000 km	-	Schienenfahrzeuge
	Gebäude			
	Material	16 m^3	1.140 m^3	Beton
		1.250 kg	165.000 kg	Niedriglegierter Stahl

			38 t	Dämmung
	Energie		6.000 l	Diesel
	Transport	50 km	-	Lastkraftwagen
		2.000 km	-	Schienenfahr-zeuge
	Wärmeüber-trager (KWK)			
	Material	7 kg/kW_{th}	-	Hochlegierter Stahl
	Redundanz- bzw. Spit-zenlastanlage (KWK)			
	Material	2,6 kg/kW_{th}	-	Niedriglegierter Stahl
Betrieb				
	Tiefpumpe			
	Material	-	4 t	Hochlegierter Stahl
		4,5 t	-	Niedriglegierter Stahl
	Filter			
	Material	1,5 kg/a/(m^3/h)	-	Sondermüll
	Redundanz- bzw. Spit-zenlastanlage (KWK)			
	Material	12 kWh/kWh	-	Erdgas
Rückbau				
	Bohrung			
	Material	51 kg/m	-	Kies

		5 kg/m	-	Zement
	Thermalwasser-kreislauf			
	Material	567 kg/(m³/h)	[22]	Niedriglegierter Stahl
	Gebäude			
	Material	16 m³	[22]	Beton
		1.250 kg (25 % Recycling)	[22]	Niedriglegierter Stahl
	Kraftwerk			
	Material	1,2 kg/kW_{el}	[22]	Kupfer
		38 kg/kW_{el}	[22]	Niedriglegierter Stahl
		600 kg/kW_{el}	[22]	Sonderabfällen
	(Kondensati-onsanlagen)	1.500 kg/kW_{th}	[22]	Niedriglegierter Stahl
	Nahwärmenetz (KWK)			
	Material	48 kg/m		Niedriglegierter Stahl
		15 kg/m		Polyethylen
		10 kg/m		Polyurethan

[22] Wie Bau