

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik

Professur für Thermische Energiemaschinen und –anlagen

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Gampe

Abschlussbericht

Entwicklung und Demonstration eines neuartigen Prozesses (Konvektionsgenerator) zur Stromerzeugung aus niederenthalper Wärme

Auftraggeber: Friedrich-und-Elisabeth-BOYSEN-Stiftung
Sonnenweg 29
70619 Stuttgart

Förderkennzeichen: Kz BOY06-Nr.37, Prof. Gampe

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Tilo Baumung
Dr. Guntram Buchheim

Textseiten: 21

Anlagen: -

ERSTELLT Datum Signum	QS-GEPRÜFT Datum Signum	FREIGEgeben Datum Signum	FILE_CODE
REVISION	DATUM	SEITEN	
VERTEILER: 1 x Friedrich-und-Elisabeth-BOYSEN-Stiftung 1 x TU Dresden			

Die Veröffentlichung des vorliegenden Berichtes – auch auszugsweise – bedarf unserer Zustimmung. Ohne unsere schriftliche Zustimmung darf der Bericht nicht – auch nicht auszugsweise – vervielfältigt werden.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung und Zielstellung	4
2 Anlagenkonzept, Messtechnik und Engineering einer Versuchsanlage des Konvektionsgenerators	6
3 Thermodynamische Modellierung des Prozesses	13
4 Systemstudien für Energieanlagen auf Basis des Konvektionsgenerators	16
5 Ausblick, Verwertung der Ergebnisse	20
Danksagung	20
Literatur	21

Formelzeichen

c	J/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität
DN	mm	Nenndurchmesser
g	m ² /s	mittlere Erdbeschleunigung
h	kJ/kg	massenspezifische Enthalpie
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massestrom
p	bar	statischer Druck
\dot{Q}	W	Wärmestrom
r	kJ/kg	massenspezifische Verdampfungswärme
s	kJ/(kg·K)	massenspezifische Entropie
T	°C, K	Temperatur
v	m ³ /kg	spezifisches Volumen
V	m ³	Volumen
Z	m	geodätische Höhe
α, x	-	Dampfmasseanteil
β	-	Dampfvolumenanteil
ζ	-	Verlustbeiwert
ρ	kg/m ³	Dichte

Indizes

0	Ausgangszustand
ab	abgegeben, abgeführt
G	Gas
K	Kondensat, am Kondensator
L	Flüssigkeitsphase
M	Gemisch Gas/Flüssigkeit
p	bei konstantem Druck
WÜ	am Wärmeübertrager
zu	zugeführt

1 Einleitung und Zielstellung

Durch Nutzung der Geothermie, z. B. Thermalwasser, ist eine emissionsfreie und ressourcenschonende, dezentrale Wärme- und Elektroenergieversorgung möglich. Da die Geothermie kaum jahres- und tageszeitlichen Schwankungen unterliegt, bietet sie außerdem den Vorteil einer grundlastfähigen Energieversorgung. Um die Nutzung der Erdwärme in Deutschland auszubauen, ist insbesondere mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz ein wichtiges Förderinstrument gegeben. Zur Zeit befindet sich ein Geothermie-Kraftwerk mit einer installierten Leistung von 160 kW in Neustadt-Glewe/ Mecklenburg im Betrieb. Weitere Anlagen sind z. B. in Unterhaching/ Bayern, Soultz-sous-Forets/ Elsass, Landau/ Pfalz und Groß-Schönebeck/ Brandenburg geplant.

Alle ausgeführten und derzeit geplanten Anlagen basieren auf einem Dampfkreisprozess mit organischem Wärmeträger (ORC-Prozess) oder dem Kalina-Prozess, bei dem es sich um einen Zweistoffprozess handelt. Der sogenannte Konvektionsgenerator (KG), Bild 1, stellt eine vorteilhafte Alternative und Ergänzung zu diesen Prozessen dar, da es möglich ist, deutlich geringere Temperaturdifferenzen zwischen Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr zur Elektroenergieerzeugung zu nutzen. Ebenso wie beim ORC-Prozess kommen organische Kreislauffluidе zum Einsatz. Im Unterschied zum ORC-Prozess erfolgt beim Konvektionsgenerator die Verdampfung jedoch nicht bei einer festen Siedetemperatur, sondern mit einem gleitenden Siedepunkt. Somit kann die Niedertemperaturwärme der Wärmequelle besser genutzt werden. Daraus resultiert eine im Vergleich zum ORC-Prozess höhere Effizienz [1], [5].

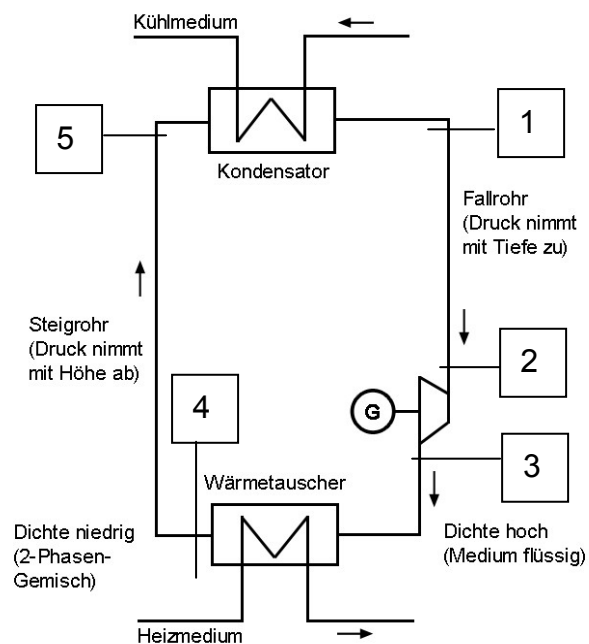


Bild 1:
Prinzip des Konvektionsgenerators

Der Konvektionsgenerator arbeitet mit einem Aufstiegsrohr, in dem das Fluid verdampft und einem Fallrohr mit dem kondensierten Fluid, durch das der Systemdruck im Kreislauf erzeugt wird. Für eine Energieanlage mit Isobutan als Wärmeträger und einer Leistungsgröße von 300 kW wird z. B. eine Bauhöhe von 350 m benötigt.

Am Eintritt in das Fallrohr (Zustandspunkt 1) hat das flüssige Isobutan eine Temperatur von 17 °C und einen Druck von 2,7 bar, der sich bis zum Eintritt in die Turbine (Zustandspunkt 2) auf 20 bar erhöht. Bei idealer Isolierung des Fallrohres ist die Zustandsänderung zwischen 1 und 2 isotherm. Die Turbine befindet sich im unteren Abschnitt des Fallrohres. Durch die Abgabe technischer Arbeit fällt der Druck am Turbinenausstritt auf 5,7 bar (Zustandspunkt 3). Durch die Wärmezufuhr des Thermalwassers, das den der Turbine nachgeschalteten Wärmeübertrager durchströmt, wird das Isobutan, z. B. auf Siedetemperatur erwärmt (Zustandspunkt 4, Temperatur 42,9 °C). Im Aufstiegsrohr nimmt der Dampfanteil aufgrund des sich vermindernenden Drucks stetig zu und das Fluid kühlt sich ab. Die isobare Wärmeabfuhr zwischen den Zustandspunkten 5 und 1 schließt den Kreisprozess.

Bisher gibt es zum Prozess des Konvektionsgenerators lediglich erste thermodynamische Voruntersuchungen sowie eine Flüssigkeitsturbine [2], die im Prozess mit Isobutan als Arbeitsfluid eingesetzt werden kann. Zum Betriebsverhalten des Prozesses (Teillast, dynamisches Verhalten, d.h. Anfahren, Einfluss von Schwankungen der Umgebungsbedingungen) gibt es bislang keine Untersuchungen. Außerdem wird aufgrund der geringen thermischen Leistungsdichten die Minimierung von Energieumwandlungsverlusten erfolgskritisch sein. Auch die Suche nach Alternativen zum Arbeitsfluid Isobutan ist in Hinblick auf eine künftige Realisierung aus sicherheitstechnischen Überlegungen von Bedeutung. Um diese Lücken zu schließen, bedarf es neben theoretischen Untersuchungen unbedingt auch einer Versuchsanlage, die den Prozess mit zulässigen Vereinfachungen und in einer für Laboruntersuchungen darstellbaren Baugröße simuliert. Ein solcher Demonstrator bildet die Grundvoraussetzung für eine Weiterverfolgung des Konvektionsgenerator-Konzepts in Hinblick auf eine künftige geothermische Energieanlage im größeren Maßstab.

Zielstellung des von der Friedrich-und-Elisabeth-BOYSEN-Stiftung geförderten Projektes war es, eine Versuchsanlage im Labormaßstab zu konzipieren und aufzubauen, mit der der Prozess des Konvektionsgenerators demonstriert werden kann und mit der die theoretischen Untersuchungen zur Prozessthermodynamik durch experimentelle ergänzt werden können. Weiterhin sollten Systemstudien für Energieanlagen auf Basis des Konvektionsgenerators durchgeführt werden.

2 Anlagenkonzept, Messtechnik und Engineering einer Versuchsanlage des Konvektionsgenerators

Anlagenkonzept

Bei der Konzipierung einer Versuchsanlage zur Demonstration und Untersuchung des Prinzips des Konvektionsgenerators, der bei einer Leistungsgröße von 300 kW immerhin eine Bauhöhe von rund 350 m erfordert, muss das physikalische Grundprinzip des Prozesses im Labormaßstab realitätsnah simuliert werden. Der Strömungsumlauf wird wie im realen Prozess allein durch die Wärmezufuhr und –abfuhr erzeugt und entspricht somit dem Prinzip des Naturumlaufs. Auf diese Weise ist es möglich, in einem nur 3 m langen Aufstiegsrohr das Verhalten des Arbeitsfluids (Isobutan) bei unterschiedlichem Druck (entsprechend der geodätischen Höhe) und Temperatur (Steuerung des Wärmeflusses im Wärmeübertrager) zu untersuchen. Die Druckminderung durch die Turbine soll in der Versuchsanlage nicht berücksichtigt werden, so dass die Zustandspunkte 2 und 3 zusammenfallen. Zur Simulation dieses Kreisprozesses 1-3-4-5 entsprechend Bild 2 und 3 wird die Versuchsanlage mit einer leichten Unterkühlung konzipiert. Wie im realen Prozess des Konvektionsgenerators beträgt der maximale Druck 5,7 bar und der minimale Druck 2,7 bar. Die höchste Temperatur herrscht am Prozesspunkt 4 mit 42,9°C, die niedrigste Temperatur kann bei leichter Unterkühlung 15°C betragen. Mit den realen Druckdifferenzen zwischen Ein- und Austritt des Aufstiegsrohres können die Strömungsverhältnisse des rund 350 m hohen Aufstiegsrohres in der Versuchsanlage auf einer Höhe von nur 3 m abgebildet werden.

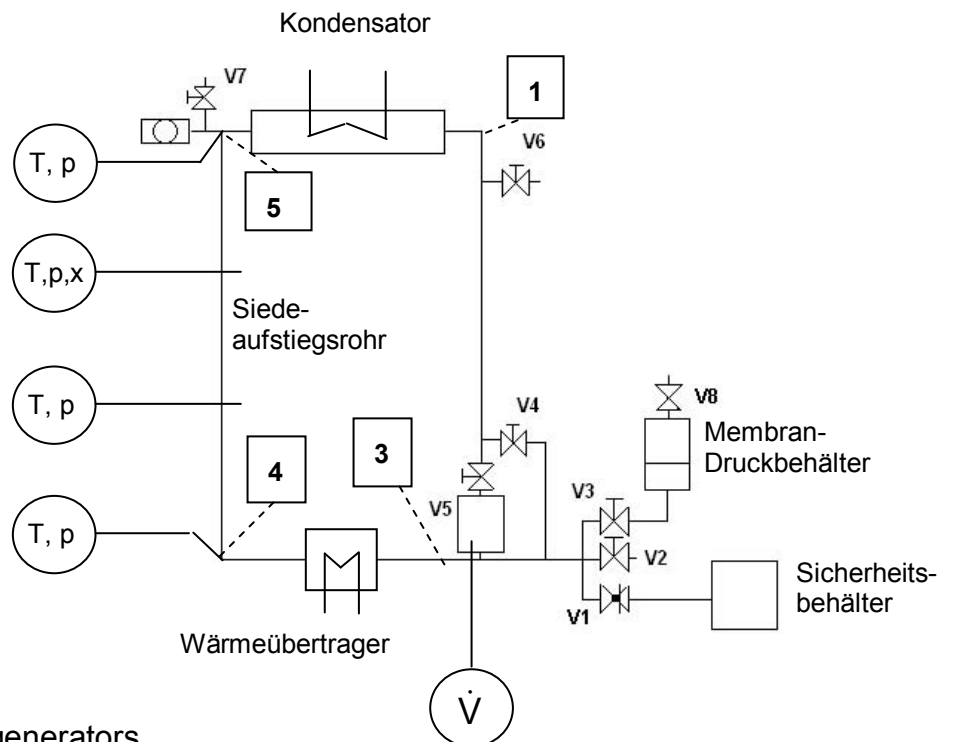


Bild 2:
 Konzept der Versuchsanlage des Konvektionsgenerators

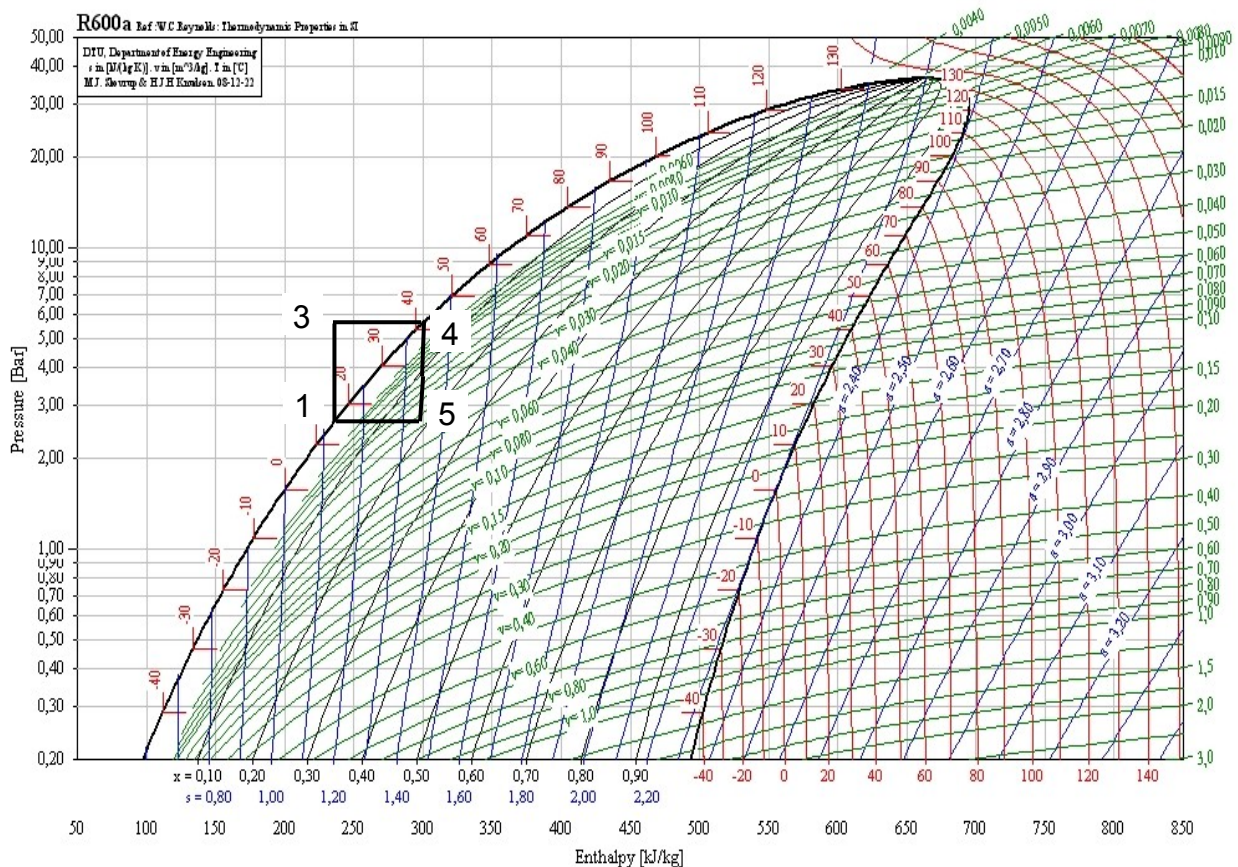


Bild 3:
 Darstellung der Zustandsänderungen in der Versuchsanlage des Konvektionsgenerators

Messkonzept

Mit den im Bild 2 gekennzeichneten Messstellen für Temperatur, Druck, Durchfluss und Dampfgehalt ist es möglich, den Prozess bei unterschiedlichen Betriebszuständen, z. B. Schwankungen des Heizwärmestroms oder Veränderung der Umgebungsbedingungen auf der Seite der Rückkühlung zu bilanzieren und übertragbare Aussagen für eine reale Anlage zu gewinnen.

Um dies in erforderlicher Qualität zu erreichen, sind folgende Anforderungen an die Messsensorik zu stellen:

- Hohe Messgenauigkeit
- Hohe Messdynamik

- Berührungsfreie Messung ohne Beeinflussung des Prozesses
- Vertretbare Kosten
- Verträglichkeit mit dem Arbeitsmedium Isobutan

In /3/ erfolgt eine detaillierte Analyse der auf dem Markt verfügbaren Messtechnik sowie eine Bewertung auf der Grundlage der konkreten Anforderungen der Konvektionsgenerator-Versuchsanlage. Im Ergebnis wird die in Tabelle 1 zusammengestellte Sensortechnik vorgeschlagen.




Mess-aufgabe	Vorgeschlagenes Messprinzip	Beispiel für einen Sensor
Fluidtemperatur	Kontaktlos arbeitender Sensor, der die vom Messobjekt abgestrahlte Infrarot-Energie misst	Sensor OS137-1 der Fa. trenka 
Druck	Piezoelektrischer Sensor : <ul style="list-style-type: none"> • geringe Beeinflussung der Strömung aufgrund geringer Dicke • Applikation im Bereich der Verbindungsflansche zwischen den einzelnen Glasrohrabschnitten möglich, s. Ausführungen zum Engineering der Versuchsanlage • großer Druck- und Temperaturmessbereich 	Sonde GH12P der Fa. Piezocryst 
Durchfluss	Ultraschallsensor: Der Ultraschall wird von einem Sender unter einem möglichst spitzen Winkel gegen die Strömungsrichtung durch das strömende Fluid gesendet und von einem Empfänger aufgenommen. Dadurch gibt es keine Strömungsbeeinflussung.	MoniSonic 4500 Ultraschall Laufzeit-Durchflussmessgerät der Fa. Badger Meter Europa 

Tabelle 1: Messsensorik

Mess-aufgabe	Vorgeschlagenes Messprinzip	Beispiel für einen Sensor
Dampfgehalt	<p>Optische Tomografie: Hierbei wird mit Hilfe einer Vielzahl von optischen Sendern und Detektoren die Ablenkung von Lichtstrahlen an Phasengrenzen festgestellt. Daraus kann in statistischen Verfahren mittels computertomografischer Bildrekonstruktionsverfahren auf die Phasenverteilung im Untersuchungsquerschnitt zurückgerechnet werden. Diese Verfahren befinden sich in Entwicklung und sind dem jeweiligen Einsatzzweck anzupassen.</p>	 <p>Prinzip der Tomografie</p> <p>— Sender — Empfänger</p> <p>Elektronik</p>

Fortsetzung Tabelle 1: Messsensorik

Bei den in Tabelle 1 genannten Messaufgaben stellt die Messung des Dampfgehaltes eine besondere Herausforderung dar. Hier sind nur optische Verfahren erfolgversprechend. Ihre Anwendung erfordert einen optischen Zugang im Siedeaufstiegsrohr.

Engineering der Versuchsanlage

Neben der Dimensionierung der Komponenten und der Konstruktion der Versuchsanlage erfordert die Anlagensicherheit besondere Aufmerksamkeit. Aufgrund der Verwendung des brennbaren Fluids Isobutan und des Betriebsdrucks sind genehmigungsrechtliche Randbedingungen zu beachten. Ziel ist es, die Anlage so zu konzipieren und auszulegen, dass eine CE-Konformitätsbewertung nach Druckgeräterichtlinie vermeidbar ist. Im Ergebnis diesbezüglicher Überlegungen und Berechnungen /4/ erweist sich ein Nenndurchmesser DN 25 als oberer Grenzwert.

Die Übersichtsdarstellung im Bild 4 vermittelt einen Eindruck von der Versuchsanlage, ohne dass jedoch Hilfseinrichtungen zum Betrieb, Befüllen und Entleeren, wie z. B. Ventile und Behälter dargestellt sind.

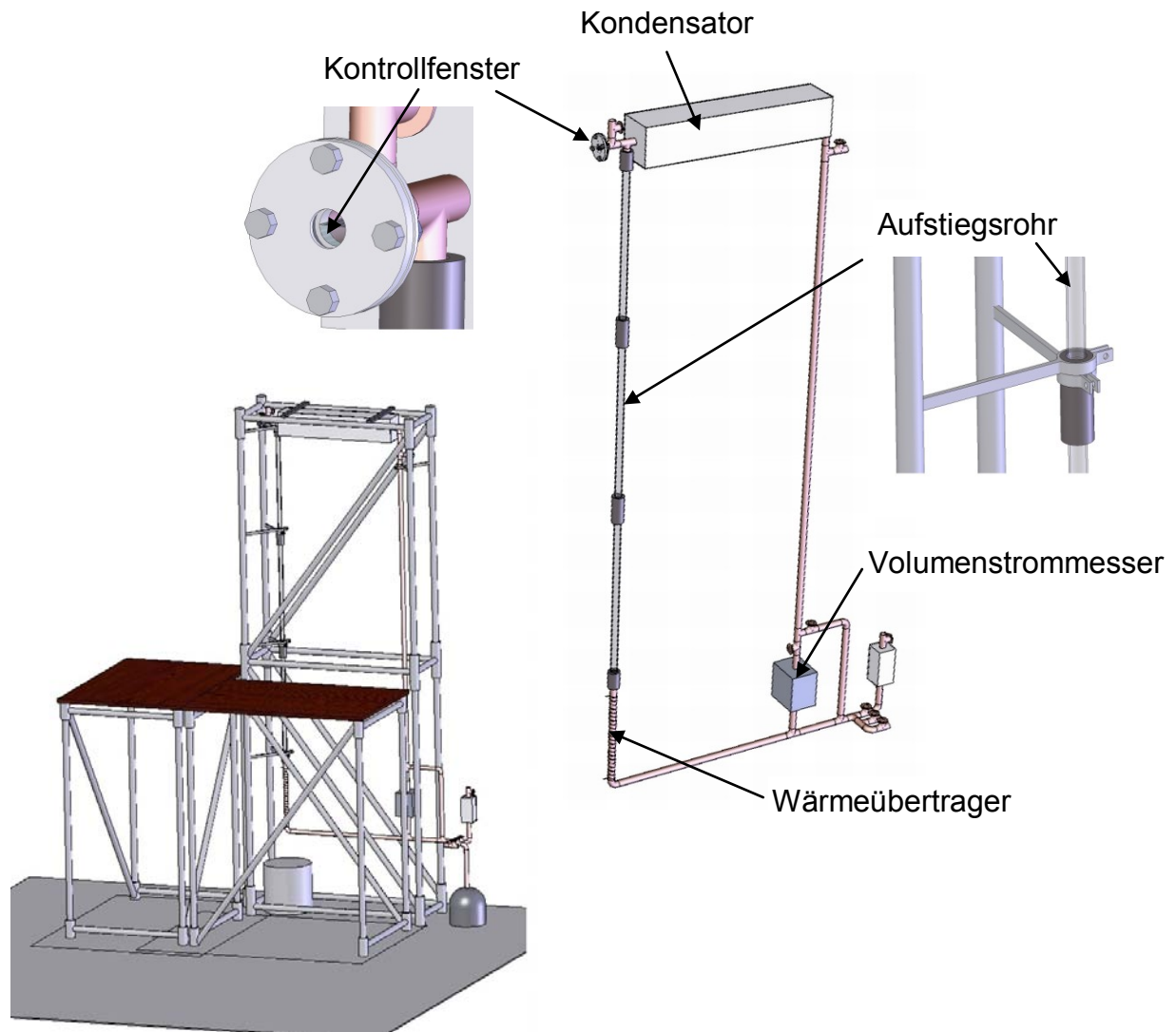
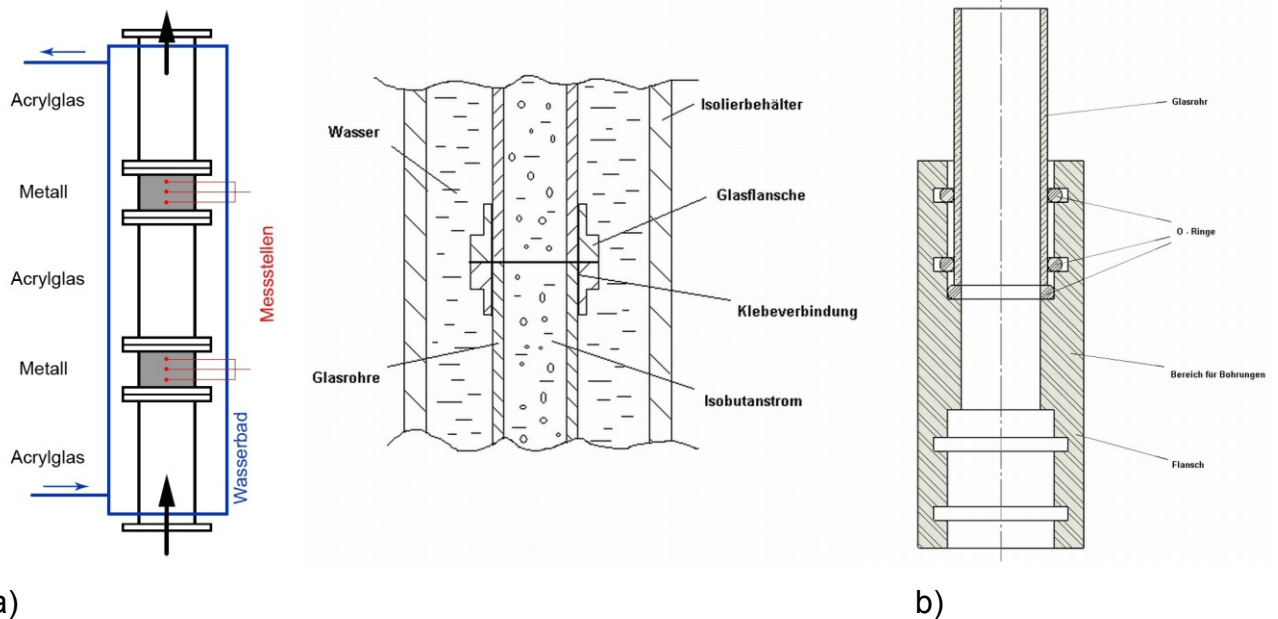


Bild 4: Übersichtsdarstellung der Versuchsanlage

Kernstück der Versuchsanlage bildet das Aufstiegsrohr, in dem in Abhängigkeit vom Systemdruck und der Wärmezufuhr die Verdampfung wie in der realen Anlage erfolgt, allerdings auf einer Höhe von nur 3 m. Zur Erfassung bzw. Visualisierung des Strömungszustandes über der gesamten Höhe des Rohres bei minimalen Wärmeverlusten wurden verschiedene Lösungsvarianten untersucht /4/, Bild 5a und b. Für die Versuchsanlage erwies sich die im Bild 5b dargestellte Variante als günstigste, da die im Bild 5a dargestellte Ausführung mit konzentrischen Rohren und einer thermischen Isolation durch Wasser, dessen Temperatur an die des Aufstiegsrohres angepasst ist, sich als zu aufwändig erwies und außerdem Einschränkungen bei der Strömungsvisualisierung erwarten lässt. Bei der Ausführung gemäß Bild 5b besteht das Aufstiegsrohr aus drei Plexiglassegmenten, die durch

Metallzwischenstücke verbunden und geführt sind. Diese Zwischenstücke verfügen gleichzeitig über Bohrungen zur einfachen Applikation von Messwertaufnehmern. Das gesamte Rohr wird durch modulare Schaumstoff- oder Styroporschalen umhüllt, die für den optischen Zugang abschnittsweise abnehmbar sind.

Vor dem Kondensator befindet sich außerdem noch ein Kontrollfenster, das eine permanente Beobachtung des oberen Teils der Anlage und des Füllstandes ermöglicht, Bild 4.



a) b)

Bild 5:
Varianten für die Ausführung des Steigrohres mit optischem Zugang zur Strömungsvisualisierung

Die Komponenten der Versuchsanlage sind mit ihren Abmessungen und möglichen Lieferanten in Tabelle 2 zusammengestellt.

Anzahl	Komponenten	Abmessungen, Menge	mögliche Lieferanten
3	Glasrohr	di: 28,5 - da: ? - L: 1000	TGI oder Duran oder Kirste
2	Flansch, Stahl	di: 28,5 - da: 60 - L: 100	Dillinger Hütte, Dähmlow, Thyssen Krupp
2	Flansch, Stahl	di: 28,5 - da: 60 - L: 100	Dillinger Hütte, Dähmlow, Thyssen Krupp
1	Rohr, Stahl	di: 28,5 - da: 33,7 ; L(gesamt): 6000	Dillinger Hütte, Dähmlow, Thyssen Krupp
4	Rohrwinkel, Stahl	di:28,5 - 90°	Dillinger Hütte, Dähmlow, Thyssen Krupp
6	T-Stück, Stahl	di:28,5	Dillinger Hütte, Dähmlow, Thyssen Krupp
1	Sichtfenster		Eigenbau und Glaswerke Ilmenau (TGI)
8	Ventil		
1	Heizungspumpe oder		Grundfos, Wilo
1	Volumenstromzähler		
1	Kondensator	28kW	Firma: Günter; Telefon: 035026 - 90806
1	Membrandruckbehälter	2l	Firma: Kahlhorn - Technische Artikel; Telefon: 08196 - 934747
1	Heizdraht	2m	
1	Vakuumpumpe		Sterling SIHI GmbH
1	Heizgebläse		Heisslufttechnik Flocke GmbH, HANNING Elektro-Werke
	Schaumstoffisolierung	d.i = d.a (Glasrohr)	
	Isobutan	10l	Air Liquid, Linde Gas Deutschland, Praxair, Westfalen
1	Stickstoff	Flasche mit 200bar	Air Liquid
2	Gerüst	Baugerüst, Höhe: 2m	Alfix, Layher, itracom GmbH
1	Gerüst	zum Aufbau der Modellanlage	Alfix, Layher, itracom GmbH
1	Leiter		Alfix, Layher, itracom GmbH
2	Gasdetektor		Conrad
	Dichtungen		
1	Ausgleichsbehälter	2l	Firma: Kahlhorn - Technische Artikel; Telefon: 08196 - 934747
4	Drucksensoren		Trenka, TU intern?
1	Messrechner		vorhanden
4	Temperatursensoren		Trenka, TU intern?
	TÜV		
1	Container		

Tabelle 2: Komponentenliste der Versuchsanlage

3 Thermodynamische Modellierung des Prozesses

Zur thermodynamischen Berechnung des Prozesses des Konvektionsgenerators wurde ein MathCad-Berechnungsalgorithmus entwickelt [3]. Die Bereitstellung der Stoffdaten von Isobutan erfolgt dabei durch das Stoffwertberechnungsprogramm „LibButan_Iso“ der Hochschule Zittau/ Görlitz. Mit dem Berechnungsalgorithmus ist es möglich, den Prozess abschnittsweise zu berechnen. Außerdem ist eine Analyse des Prozesses mit alternativen Wärmeträgerfluiden problemlos möglich. Die einzelnen Anlagenabschnitte wurden wie folgt modelliert:

a) Wärmeübertrager der Wärmequelle

Im Wärmeübertrager, in dem in der realen Anlage die Wärmezufuhr vom Thermalwasser erfolgt, wird eine isobare Zustandsänderung angenommen.

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m} \cdot \Delta h_{WÜ} \quad (1)$$

b) Wärmeübertrager der Wärmesenke

Im oberen Teil der Versuchsanlage wird der Wärmeträger vollständig kondensiert und ggf. sogar etwas unterkühlt. Damit befindet sich ausschließlich Flüssigkeit im Fallrohr. Auch im Kondensator wird eine isobare Zustandsänderung angenommen.

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{m} \cdot \Delta h_K \quad (2)$$

c) Fallrohr

Für das Fallrohr wird aufgrund der geringen Höhendifferenz in der Versuchsanlage vereinfacht eine isenthalpe Zustandsänderung angenommen.

d) Steigrohr

Für die Berechnung des Zustandes des Zweiphasengemisches aus Gas (Dampf) und Flüssigkeit und der Druckverteilung über der Aufstiegshöhe wird angenommen, dass die aufsteigende Strömung keine Wärme an die Wand des Steigrohrs abgibt, d. h. es wird von einer idealen Isolierung des Steigrohres ausgegangen. Weiterhin wird auch keine mecha-

nische Arbeit abgegeben, und die Reibung sei zunächst vernachlässigbar. Erst später wird auch die Reibung in die Berechnung mit einbezogen. Die Zustandsänderung im Steigrohr ist somit näherungsweise isentrop (Berechnungsgleichungen (3)-(10) nach /6/, /7/). Für die Änderung der Enthalpie des Flüssigkeits(L)-Gas (G)-Gemisches gilt:

$$dh = \alpha \cdot dh_G + (1 - \alpha) \cdot dh_L + (h_G - h_L) \cdot d\alpha \quad (3)$$

Mit

$$T \cdot ds = dh - v \cdot dp \quad (4)$$

und Annahme eines Gemisches aus einem idealen Gas und einer inkompressiblen Flüssigkeit sowie nach Einführung der Verdampfungswärme r

$$r = h_G - h_L \quad (5)$$

erhält man folgende Bilanzgleichung für die isentrope Zustandsänderung:

$$0 = \alpha \cdot c_{p,G} \cdot dT + (1 - \alpha) \cdot c_{p,L} \cdot dT + r \cdot d\alpha - \alpha \cdot v_G \cdot dp \quad (6)$$

Setzt man für die Änderung des Dampfmasseanteils $d\alpha$

$$d\alpha = \alpha - \alpha_0 \quad (7)$$

so erhält man folgende Gleichung zur Berechnung des Dampfmasseanteils:

$$\alpha = \frac{\alpha_0 \cdot r - c_{p,L} \cdot dT}{c_{p,G} \cdot dT - c_{p,L} \cdot dT - v_G \cdot dp + r} \quad (8)$$

Weitere wichtige Größen für die Prozessberechnung sind der Dampfvolumenteil β

$$\beta = \frac{V_G}{V_L + V_G} = \frac{m_G \cdot v_G}{m_L \cdot v_L + m_G \cdot v_G} = \frac{\frac{m_G}{m_L + m_G} \cdot v_G}{\frac{m_L}{m_L + m_G} \cdot v_L + \frac{m_G}{m_L + m_G} \cdot v_G} = \frac{\alpha \cdot v_G}{(1 - \alpha) \cdot v_L + \alpha \cdot v_G} \quad (9)$$

und die Druckverteilung über der Höhe:

$$dz = -(1 - \alpha) \cdot \frac{v_L}{g} \cdot dp - \alpha \cdot \frac{v_G}{g} \cdot dp = -(1 - \alpha) \cdot \frac{1}{\rho_L \cdot g} \cdot dp - \alpha \cdot \frac{1}{\rho_G \cdot g} \cdot dp = -\frac{dp}{\rho_M \cdot g}$$

(10)

Bei der Berechnung des Prozesses müssen weiterhin die Druckverluste im gesamten System infolge Reibung sowie der Auftrieb berücksichtigt werden, der im Steigrohr durch die Druckdifferenz zum Fallrohr entsteht.

Auf der Grundlage der beschriebenen Modellannahmen wurde ein Algorithmus entwickelt /3/, mit dem der Prozess abschnittsweise berechnet werden kann. Exemplarisch ist diese Berechnung für vier Abschnitte in Tabelle 3 dargestellt.

Intervall	Zustandspunkt	Temperatur [°C]	Druck [bar]	Volumengehalt Dampf Beta [-]	Dampfgehalt Alpha [-]	zugeführte Wärme [W]	Massenstrom [kg/s]	Druck [bar]
1						600	0,172	
0-3m	1 (Eintritt Siede- rohr)	42,9	5,728	0	0			5,728
	2 (Austritt Siede- rohr)	42,051	5,604	0,206	0,00702			5,604
2						1300	0,271	
(3-6m)	1 (Eintritt Siede- rohr)	42,051	5,604	0,206	0,00702			5,604
	2 (Austritt Siede- rohr)	41,318	5,499	0,331	0,01305			5,499
3						2100	0,328	
(6-9m)	1 (Eintritt Siede- rohr)	41,318	5,499	0,331	0,01305			5,499
	2 (Austritt Siede- rohr)	40,667	5,406	0,417	0,01839			5,406
4						3000	0,369	
(9-12m)	1 (Eintritt Siede- rohr)	40,667	5,406	0,417	0,01839			5,406
	2 (Austritt Siede- rohr)	40,075	5,323	0,48	0,02323			5,323

Tabelle 3: Beispiel für die abschnittsweise Berechnung des Konvektionsgenerator-Prozesses

4 Systemstudien für Energieanlagen auf Basis des Konvektionsgenerators

Anwendungsgebiete des Konvektionsgenerators werden über die Ursprungsidee hinaus nunmehr nicht allein in geothermalen Einzelanlagen gesehen, sondern auch in Verbindung mit ORC-Anlagen und auch der Nutzung alternativer Wärmeangebote. Entsprechende Anwendungsmöglichkeiten werden im Folgenden aufgezeigt.

Konvektionsgeneratoranlagen in Einzelaufstellung

Kernstück des Konvektionsgenerator-Prozesses ist das Naturumlaufprinzip mit Bauhöhen von rund 350 m, um eine Druckdifferenz zu erzeugen, mit der eine Energieanlage der Leistungsgröße von 300 kW darstellbar ist. Stillgelegte Bergwerksschächte mit Thermalwasserangebot erscheinen für diesen Zweck bestens geeignet, da die hohen Kosten für die Bohrung entfallen. Eine Konvektionsgeneratoranlage kann aufgrund des modularen Aufbaus der Turbine, Bild 11, und der anderen Systemkomponenten problemlos in einer solchen Schachtanlage ausgeführt und auf die örtlichen Gegebenheiten, insbesondere die Schachthöhe, angepasst werden.

Bild 11:
Test des Prototyps einer
mehrstufigen Isobutan-
Flüssigkeitsturbine in einem
Pumpenprüfstand



Modulare Turbinenbauweise
(im Bild: zweistufige
Ausführung)

Standortentscheidend ist jedoch die nutzbare Erdwärme, die am Beispiel eines potentiellen Einsatzgebietes in Mecklenburg-Vorpommern im Bild 12 dargestellt ist. Weitere Anwendungsgebiete werden in Bayern und Thüringen gesehen.

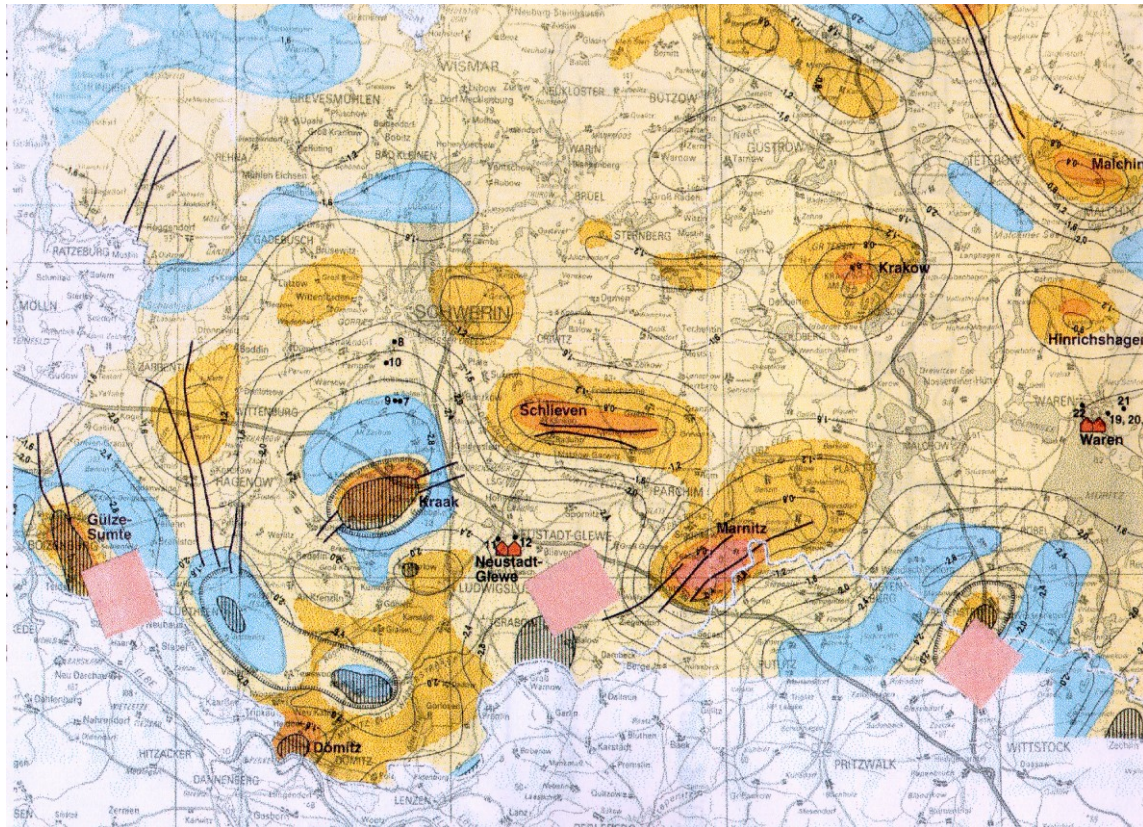


Bild 12: Karte eines Geothermie-Standortes in Mecklenburg-Vorpommern

Die Nutzung stillgelegter Bergwerksschächte ist zwar naheliegend, stößt jedoch an bergbauliche Grenzen. Will man einen stillgelegten Schacht, z. B. des Kupferbergbaus in Thüringen nutzen, so muss dieser ständig unterhalten werden. Das schließt nicht nur den Betrieb sondern auch das Absichern gegen Tektonik und Folgeschäden aus der vorherigen Nutzung ein. Müssen diese Kosten der Schachtanlagennutzung durch den Betreiber des Konvektionsgenerators getragen werden, so ist aufgrund der vergleichsweise geringen Elektroenergieerzeugung kein wirtschaftlicher Betrieb möglich.

Bei der Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten in den Eisenerzbergwerken der Vulkaneifel zeigten sich weitere Schwierigkeiten. Die Kontrolle der Wasserbewegung in den Schachtröhren einiger Anlagen ist nicht realisierbar. Eine zusätzliche Entwässerung aber ist zu kostenaufwändig. Erschwerend kommt weiter hinzu, dass eine Vielzahl der besichtigten Anlagen mit Schrott und Abraum vom Vorbetreiber zugeschüttet sind. Eine Räumung ist deutlich kostenintensiver als eine Neubohrung.

Diese Beispiele zeigen, dass stillliegende Bergwerksschächte nicht wirtschaftlich nutzbar sind. Bei Nutzung noch in Betrieb befindlicher Schachtanlagen würden die genannten Einschränkungen zwar nicht bestehen, aber der Anwendung des Konvektionsgenerators sind andere Grenzen gesetzt. Die Prüfung des Bergwerksstandortes „Glückauf“ in Sondershausen ergab, dass der Betreiber des Schachtes den Konvektionsgenerator aufgrund des brennbaren Wärmeträgers nicht zulassen würde.

Die Anwendung des Konvektionsgenerators erfordert somit separate Bohrungen am Standort.

Kopplung mit ORC-Anlagen

Im Unterschied zum ORC-Prozess erfolgt beim Konvektionsgenerator die Verdampfung nicht bei einer festen Siedetemperatur, sondern mit einem gleitenden Siedepunkt, so dass die verfügbare Wärme der Wärmequelle bedeutend besser genutzt werden kann. Um die beim ORC-Prozess nicht nutzbare Wärme im Temperaturbereich $\leq 100...120$ °C noch zur Elektroenergieerzeugung zu nutzen, bietet sich eine Kopplung mit dem Konvektionsgenerator an. Für eine derartige Kombination wird gerade eine Schutzrechtsanmeldung vorbereitet, so dass zur Schaltung und den Anlagenkomponenten an dieser Stelle keine Ausführungen gemacht werden können.

Allgemein lässt sich zu den Kosten und zur Wirtschaftlichkeit einer derartigen kombinierten ORC–KG-Anlage jedoch folgendes aussagen.

Für die Investitionen untertage sind folgende Positionen zu berücksichtigen:

- Bohrplatz/Bohrkeller
- Baustelleneinrichtung
- Bohrarbeiten
- Verrohrung
- Verfestigung
- Geophysikalische Bohrlochmessung
- Komplettierung
- Testarbeiten
- Entsorgung
- Ingenieurleistungen nach HOAI
- Geowissenschaftliche Leistungen

Hinzu kommen die Anlagenteile übererde:

- Thermalwasserkreislauf
- Produktionsbohrung Konvektionsgenerator - 300 m / 0,85 m
- ORC- und Konvektionsgenerator Anlage
- Rückkühlwerk (Kühlturm)
- Wärmeübertrager
- Wasseraufbereitung
- Siederohr, Fallrohr

Daraus ergeben sich die Gesamtinvestitionskosten für eine Kombianlage. Berücksichtigt man weiterhin die Betriebskosten und die Vergütung aus dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), so kann bei einer 2-MW-Anlage mit jährlicher Volllaststundenzahl von 8000 von einer Rückflussdauer von rund 12 Jahren ausgegangen werden. Damit wäre ein derartiges Anlagenkonzept wirtschaftlich darstellbar.

Weitere Anwendungen des Konvektionsgenerators

Denkbar sind auch Anwendungen über Tage, in dem geodätische Höhenunterschiede ausgenutzt werden, um den Konvektionsgenerator-Prozess auszuführen. Dabei könnten sehr vielfältige Wärmequellen, auch Solarwärme, genutzt werden. Bezüglich diesbezüglicher Anwendungen sind weitere Untersuchungen vorgesehen.

5 Ausblick, Verwertung der Ergebnisse

Im Bearbeitungszeitraum des Projektes wurden alle Voraussetzungen geschaffen, um eine Versuchsanlage nach dem Prinzip des Konvektionsgenerators aufzubauen. Weiterhin wurde der Prozess modelliert und seine Anwendung als autarke Erzeugereinheit sowie in der Kopplung mit einem ORC-Prozess untersucht.

Da sich die NeoThermie AG als Verfahrensentwickler um eine technische Anwendung bemüht, erfolgte bei der Bearbeitung der genannten Aufgaben eine ständige Abstimmung. Das betraf das Konzept der Versuchsanlage für die begrenzte Baugröße, den günstigsten Standort der Versuchsanlage und die weitere Vorgehensweise in Hinblick auf eine geothermale Energieanlage auf Basis des Konvektionsgenerators. Im Ergebnis wurde mit der NeoThermie AG Übereinstimmung erreicht, dass in Hinblick auf die weitere Vermarktung der Technologie und auch vor dem Hintergrund sicherheitstechnischer Fragen im Umgang mit der brennbaren Flüssigkeit Isobutan die Versuchsanlage beim Verfahrensentwickler aufgebaut wird. Die Versuchsanlage soll nunmehr auf der Grundlage der von der TU Dresden im Projekt erstellten Fertigungs- und Beschaffungsunterlagen bei einem Unternehmen des Wärmeübertragerbaus in Berga bei Sondershausen/ Thüringen erfolgen.

Bezüglich einer technischen Umsetzung des Konvektionsgenerators in einer geothermalen Energieanlage zeichnen sich nunmehr konkrete Projekte ab, die von der NeoThermie AG vorbereitet werden. Eine in der Geothermie tätige süddeutsche Firma hat Interesse an einer Pilotanlage in Verbindung mit einem in der Planung befindlichen Geothermieprojekt signalisiert. Realisierungszeitpunkt könnte schon 2010 sein. Eine weitere Anwendung in der Kopplung mit einer ORC-Anlage ist in Mecklenburg-Vorpommern in Vorbereitung.

Um den Schritt zu Anlagen der x00 kW- bis MW-Leistungsgröße zu gehen, ist es jedoch erforderlich, den Prozess in einer Versuchsanlage eingehend zu untersuchen. Deshalb wird die Versuchsanlage im 1. Quartal 2009 nunmehr realisiert.

Danksagung

Die Professur für Thermische Energiemaschinen und –anlagen des Instituts für Energietechnik der TU Dresden bedankt sich bei der Friedrich-und-Elisabeth-BOYSEN-Stiftung für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

Literatur

- /1/ Schwark-Werwach, B.: Die Thermodynamik des Konvektionsgenerators. 1. Thermie-Innovationstag 2008, Sondershausen, 2008
- /2/ Baumung, T. u.a.: Geothermie: Energiequelle mit Perspektive. Erneuerbare Energien, 18. Jahrgang, Ausgabe 8/2008, S. 56-59
- /3/ Baumung, T.; Hammer, Chr.: Thermodynamische Prozesssimulation und messtechnische Konzeption für eine Konvektionsgenerator-Versuchsanlage, Interner Arbeitsbericht, TU Dresden, Institut für Energietechnik, Prof. f. Thermische Energiemaschinen und –anlagen, 2008
- /4/ Baumung, T., Lehmann, F.: Anlagentechnische Konzeptentwicklung und Engineering einer Versuchsanlage nach dem Prinzip des Konvektionsgenerators, Interner Arbeitsbericht, TU Dresden, Institut für Energietechnik, Prof. f. Thermische Energiemaschinen und –anlagen, 2008
- /5/ Schwark-Werwach, B.: Hohe Wirtschaftlichkeit trotz kleiner Temperaturdifferenz; Konvektionsgenerator macht Stromerzeugung aus Thermalwässern rentabler; Energy 2.0 September 2008 (S. 52 – 54), publish-industry Verlag GmbH
- /6/ Schwark-Werwach, B.; Becker, C.: Grundlegende Berechnungen zum Konvektionsgenerator mit Mehrphasengemischen; Institut für Neue Basis-Technologien GbR, Nordhausen 2003
- /7/ Schwark-Werwach, B.: Einführung in die Leistungsberechnung des Konvektionsgenerators, Institut für Neue Basis-Technologien GbR, Nordhausen, 2004