



**STEINBEIS – TRANSFERZENTRUM
ANGEWANDTE THERMODYNAMIK,
ENERGIE- UND VERBRENNUNGSTECHNIK**
in Kooperation mit der Universität Bayreuth
Leiter: Professor Dr.-Ing. Dieter Brüggemann



STZ ATEV • Prof. Brüggemann • Elbering 15 • 95445 Bayreuth

www.stz-atev.de

Leiter

Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann
Tel. / Fax: (0921) 55-7160 / -7165
brueggemann@uni-bayreuth.de

Geschäftsstelle

Elbering 15 • 95445 Bayreuth
Tel. / Fax: (0921) 46094-10 / -11

Besucherschrift

LTTT • FAN-Gebäudeteil C
Universität Bayreuth
Universitätsstr. 30 • 95447 Bayreuth

Bankverbindung

Commerzbank Stuttgart
BLZ: 600 400 71
Kto.-Nr.: 7 272 404
IBAN: DE30 6004 0071 0727 2404 00

Steuernummern

Finanzamt Stuttgart 97106/00540
UID-Nr.: DE190606404

Abschlussbericht

zum Projekt 202/12

Studie zur Stromerzeugung aus Abwärme von Biogas-BHKWs

für die

Bioenergieregion Bayreuth

Regionalmanagement Stadt und Landkreis Bayreuth GbR, Bayreuth

Dr.-Ing. Andreas Obermeier

Dr.-Ing. Florian Heberle

Theresa Weith, M.Sc.

Professor Dr.-Ing. Dieter Brüggemann

November 2014

1 Ziesetzung und Vorgehen

Nicht genutzte Abwärme aus Biogas-Blockheizkraftwerken lässt sich mittels Organic Rankine Cycle (ORC) für eine erweiterte Stromerzeugung einsetzen. Im Rahmen eines von der Bayerischen Forschungstiftung (BFS) geförderten Verbundprojektes wurde unter Federführung des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) der Universität Bayreuth eine neuartige ORC-Versuchs- und Demonstrationsanlage entwickelt und aufgebaut. Die Einkopplung der BHKW-Abwärme in den ORC-Prozess erfolgt bei dieser Anlage über eine innovative Direktverdampfung, zur Dampfentspannung wird eine neu entwickelte Mikro-Expansionsturbine eingesetzt.

Ziel dieser Studie war es, Einsatzmöglichkeiten dieses neuen ORC-Konzeptes sowie weiterer ORC-Schaltungsvarianten bei Biogas-BHKWs in der Region zu untersuchen und zu analysieren.

Hierzu waren zunächst grundlegende technische Daten zu Biogas-BHKWs in der Region zu beschaffen. In diesem Zusammenhang wurde ein Fragebogen entworfen, mit dem ein ausgewogenes Verhältnis zwischen dem Bedarf an möglichst detaillierten Informationen einerseits und dem erforderlichen Aufwand für das Ausfüllen andererseits angestrebt wurde. Die Inhalte des Fragebogens sind in Tab. 1 aufgeführt. Dieser Fragebogen wurde von der Bioenergieregion Bayreuth an die Anlagenbetreiber in der Region verschickt und der eingehende Rücklauf für die weitere Anfertigung der Studie zur Verfügung gestellt. Drei BHKWs wurden für eine Abwärme-Nachverstromung als prinzipiell geeignet identifiziert. Im Zuge von Anlagen-Begehungen wurden für diese BHKWs weitere Detaildaten und Informationen wie z.B. die Temperatur des Abgases und des Motorkühlwassers sowie die Abgaszusammensetzung erhoben. Diese Angaben dienten als Grundlage für computergestützte Modellrechnungen, mit denen sowohl das im BFS-Projekt erarbeitete neue ORC-Anlagendesign als auch weitere geeignet erscheinende Schaltungsvarianten fallbezogen simuliert wurden. Zudem wurde eine überschlägige Einschätzung der Wirtschaftlichkeit vorgenommen. Darauf basierend wurden Schlussfolgerungen abgeleitet, welche die aus der Studie zu ziehenden Erkenntnisse zusammenfassen.

Tab 1: Entwickelter Fragebogen zur Datenerhebung bei Biogas-Blockheizkraftwerken
Erfassung energietechnischer Kenndaten von Biogas-Blockheizkraftwerken

1	Name des BHKW-Herstellers	..........
2	Modell- und Typbezeichnung (möglichst exakte und vollständige Bezeichnung)	..... .....
3	Monat und Jahr der Inbetriebnahme /
4	Motorart: - Gas-Ottomotor <input type="checkbox"/> - Zündstrahlmotor <input type="checkbox"/> (bitte ankreuzen)	
5	Elektrische Leistung	..... kW _{el}
6	Thermische Leistung gesamt - davon aus Motorkühlwasser (bitte angeben, soweit bekannt) - davon aus Motorabgas (bitte angeben, soweit bekannt)	..... kW _{th} kW _{th} kW _{th}
7	Feuerungswärmeleistung	..... kW _{th}
8	BHKW-interne Nutzung von Abgaswärme - Abgasturbolader vorhanden <input type="checkbox"/> ja / <input type="checkbox"/> nein - Abgas-Gasturbine vorhanden <input type="checkbox"/> ja / <input type="checkbox"/> nein (bitte ankreuzen)	
9	Wärmeauskopplung aus BHKW - nur über Motorkühlwasser <input type="checkbox"/> - über Motorkühlwasser <u>und</u> Abgas- Wärmetauscher <input type="checkbox"/> (bitte ankreuzen)	
10	Temperatur Motorkühlwasser - Motorausgang bzw. Heizungsvorlauf - Motoreingang bzw. Heizungsrücklauf	..... °C °C
11	Temperatur Abgas (bitte angeben, soweit bekannt) - Motorausgang - sonstige Stelle im Abgasstrang, und zwar	..... °C °C

Tab 1 (Forts.): Entwickelter Fragebogen zur Datenerhebung bei Biogas-Blockheizkraftwerken
Erfassung der jährlichen Erzeugung von Strom und Nutzwärme

12	Stromerzeugung im Jahr 2011	..... kWh
	Stromerzeugung im Jahr 2012 (falls bereits bekannt)	..... kWh
13	Auslastung der Stromerzeugungskapazitäten (falls keine exakten Angaben möglich sind, bitte Schätzwerte angeben)	
	- im Winter %
	- im Frühjahr %
	- im Sommer %
	- im Herbst %
14	Nutzwärmeerzeugung im Jahr 2011 (falls bekannt)	..... kWh
	Nutzwärmeerzeugung im Jahr 2012 (falls bekannt)	..... kWh
15	Auslastung der Wärmeerzeugungskapazitäten (falls keine exakten Angaben möglich sind, bitte Schätzwerte angeben)	
	- im Winter %
	- im Frühjahr %
	- im Sommer %
	- im Herbst %

Interessenbekundung

16	Sofern das BHKW anhand obenstehender Angaben für eine zusätzliche Stromerzeugung aus ungenutzter Abwärme geeignet erscheint, besteht Interesse an einer <u>kostenlosen und unverbindlichen Detailprüfung</u> durch die Universität Bayreuth.	
	ja	<input type="checkbox"/>
	nein	<input type="checkbox"/>
	(bitte ankreuzen)	

2 Identifizierung der Fallbeispiele

Derzeit befinden sich etwas mehr als 50 Biogasanlagen innerhalb der Bioenergieregion Bayreuth. Mit der Fragebogenaktion wurden insgesamt 14 Anlagen erfasst. Davon wurde bei 9 Anlagen eine für die Nachverstromung zu geringe Wärmeleistung konstatiert bzw. es wurden teils keine näheren Angaben zu Wärmeleistungen gemacht. Bei 2 Anlagen erreichte die vorhandene Nutzwärmeauskopplung zumindest einen solchen Umfang, dass für eine sinnvolle Verstromung der Restwärme kein ausreichendes Potenzial mehr erkennbar war.

Somit verblieben 3 Anlagen, die für die weiteren Untersuchungen als Fallbeispiele herangezogen wurden. Im Rahmen von Vor-Ort-Begehungen wurden für die drei Fallbeispiele weitere Detaildaten und Informationen erhoben. Hierzu zählten z.B. Temperaturwerte des Abgases an verschiedenen Stellen des Abgasstrangs, Angaben zu Abgaszusammensetzungen oder Behelfswerten für eine ersatzweise Berechnung der Abgaszusammensetzung, Kühlwassertemperaturen im Vor- und Rücklauf, die örtliche Platzverfügbarkeit für eine direkte Ankopplung eines ORC und Ähnliches. Wesentliche Kenndaten der drei Anlagen sind in Tab. 2 zusammengefasst. Angaben zu den Standorten und den Betreibern der Anlagen sind in einem separaten Anhang zu dieser Studie aufgeführt.

Tab. 2: Kenndaten der als Fallbeispiele näher untersuchten Biogas-BHKWs

	Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
Motortyp	1 Gas-Ottomotor	2 Gas-Ottomotoren	2 Gas-Ottomotoren
Inbetriebnahme	2006	2005	2000
Brennstoffleistung	946 kW	1006 kW	1741 kW
Elektrische Leistung	380 kW	370 (190 + 180) kW	605 (350 + 255) kW
Thermische Leistung	486 kW	470 kW	859 kW
Wärmenetz	nein	nein	ja
Volllaststunden	7650	8250	7150
Abgastemperatur	460 °C	510 °C	450 °C
Abwärmenutzung	ca. 20 % Heizung, Warmwasserbereitung	ca. 30 % Heizung, Getreidetrocknung	ca. 40 % Industrie, öff. Einrichtungen

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass bei Anlage 3 das kleinere der beiden BHKWs (elektrische Leistung 255 kW) bereits an ein Wärmenetz angeschlossen ist

und selbiges versorgt. Für die weitere Untersuchung wurde daher nur die Wärmeabgabe des größeren BHKW mit einer elektrischen Leistung von 350 kW veranschlagt. An dieses BHKW wurde zwischenzeitlich auch bereits eine ORC-Anlage zur Nachverstromung angeschlossen. Wegen Platzmangel wurde diese ORC-Anlage neben dem Gebäude errichtet, in dem die BHKWs untergebracht sind. Der Betreiber war trotz der inzwischen schon erfolgten Nachrüstung an einer Einbeziehung in die vorliegende Studie weiter interessiert.

Für die beiden Gas-Ottomotoren von Anlage 2 standen seitens des Betreibers keine Angaben zur Abgaszusammensetzung und zur Abgastemperatur zur Verfügung. Auf der Basis von Annahmen über die Abgaszusammensetzung wurde daher die Abgastemperatur rechnerisch ermittelt.

3 Mini-ORC und dessen Simulation

Im Rahmen des eingangs erwähnten, von der BFS mitfinanzierten Verbundprojektes wurde von den beteiligten Projektpartnern, dem LTTT der Universität Bayreuth, der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden sowie der Deprag Schulz GmbH u. Co., Amberg, ein innovativer Mini-ORC entwickelt. Dieser ORC ist durch folgende wesentliche Merkmale charakterisiert, und hebt sich damit von marktverfügbaren ORC-Anlagen ab:

- Ausschließliche Nutzung der Wärmeleistung des Abgases; dies ist insoweit thermodynamisch sinnvoll, als die Abgaswärme mit 450 °C bis 500 °C eine weit höhere Temperatur aufweist als z.B. das Motorkühlwasser mit ca. 85 °C bis 90 °C, und daher bei begrenztem Aufwand ein relativ hoher Wirkungsgrad des ORC realisierbar ist.
- Einsatz von Cyclopentan als Arbeitsmedium; die Auswahl dieses Arbeitsfluids ist auf das o. g. Temperaturniveau der Wärmequelle ausgerichtet und optimiert.
- Direktverdampfung ohne Thermoölkreislauf; dies führt zu einer geringeren Anlagenkomplexität, ermöglicht Kosteneinsparungen und erhöht die Umwandlungseffizienz. Allerdings ist der Gefahr einer Zersetzung des ORC-Fluides entgegenzuwirken, bei Leckage besteht Entzündungsgefahr, und die Pufferwirkung eines ansonsten üblichen Thermoöl- oder Druckwasserkreislaufs muss regelungstechnisch kompensiert werden.
- Verzicht auf einen internen Rekuperator; Voruntersuchungen im Zuge der Anlagenkonzeption haben gezeigt, dass sich ein interner Rekuperator zumindest bei Wärmequellentemperaturen unter 400 °C eher nachteilig auf den Wirkungsgrad auswirkt.
- Einsatz einer neu entwickelten Mikroexpansionsturbine mit einer elektrischen Leistung von 15 kW; die Turbinenbauweise ermöglicht die Beaufschlagung mit höheren Dampftemperaturen, als dies bei herkömmlichen Expansionsaggregaten wie Scroll-

und Schraubenexpandern in dieser Leistungsklasse der Fall ist. Zudem treten keine Probleme hinsichtlich der Beaufschlagung des Arbeitsfluids mit Schmierstoffen auf.

Das Anlagenschema des neu entwickelten Mini-ORC ist in Abb. 1 dargestellt, eine Ansicht der realisierten Versuchsanlage zeigt Abb. 2. Der ORC ist hier nicht an ein BHKW angeschlossen, vielmehr wird Abgas der gewünschten Temperatur durch einen Gasbrenner mit regelbarer Frischluft-Zudosierung bereitgestellt.

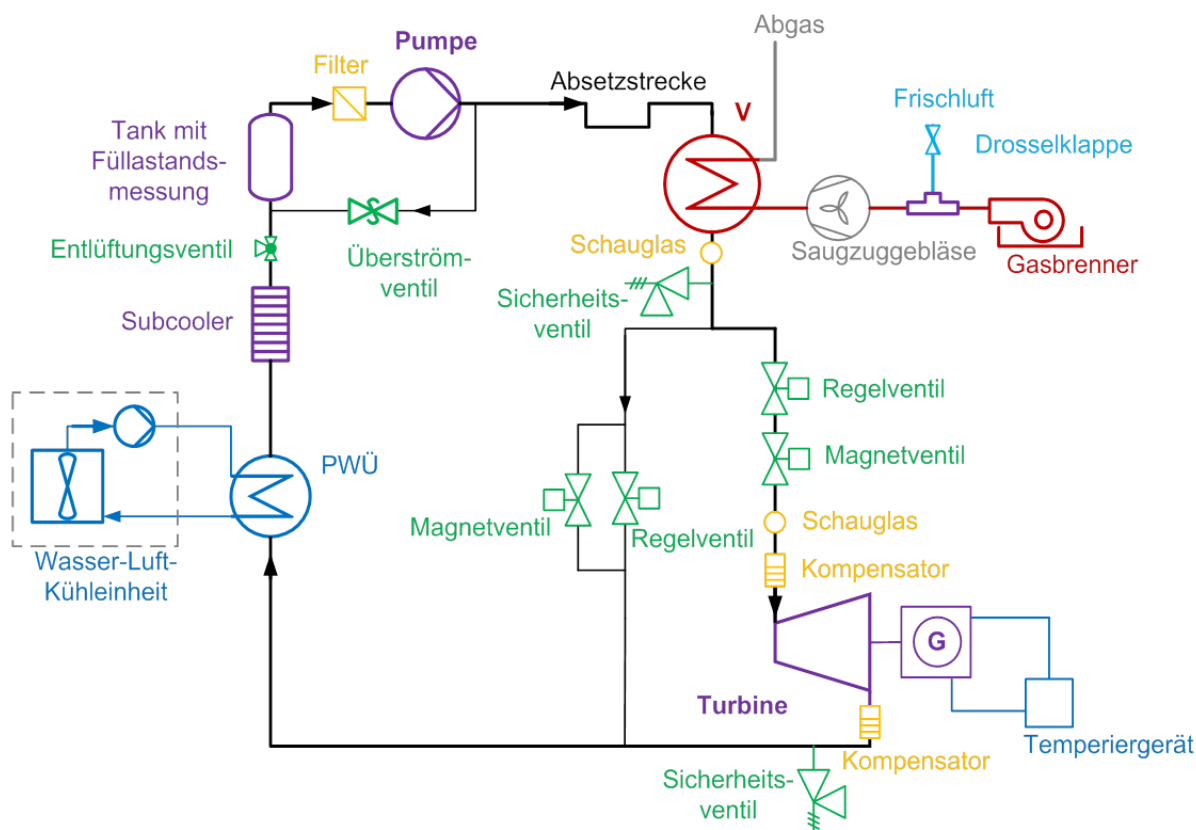


Abb. 1: Anlagenschema des neu entwickelten Mini-ORC

Für die computergestützte Simulation des Mini-ORC sowie aller nachfolgend noch aufgeführten Schaltungsvarianten wurde das an der TU Delft entwickelte Programm Cycle Tempo eingesetzt. Ergänzend wurde auf das Programm FluidProp zurückgegriffen, das der Einbindung von Stoffdatenbanken in Cycle-Tempo dient.



Abb. 2: Ansicht der aufgebauten Mini-ORC-Versuchsanlage

Die mit der einfachen Schaltungsvariante des Mini-ORC gemäß den Simulationen erreichbaren Brutto- und Nettoleistungen sind in Tab. 3 zusammengestellt. Entsprechend der bei den Anlagen verfügbaren Abgaswärmeleistungen und -temperaturen ergeben sich für eine typische Abgasauskühlung auf 180 °C Bruttoleistungen der Stromerzeugung zwischen 20,8 kW und 26,4 kW. Soweit eine Abgasauskühlung auf 120 °C realisiert wird, und damit höhere Abgaswärmeleistungen auf den ORC übertragen werden können, erhöhen sich auch die erzielbaren Brutto- und Nettoleistungen der Stromerzeugung.

Tab. 3: Erreichbare Brutto- und Nettoleistungen der einfachen Schaltungsvariante des Mini-ORC

	Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
Bruttoleistung (Abgasauskühlung 180 °C)	20,8 kW	26,4 kW	21,0 kW
Nettoleistung (Abgasauskühlung 180 °C)	17,6 kW	22,4 kW	17,7 kW
Bruttoleistung (Abgasauskühlung 120 °C)	25,1 kW	30,9 kW	25,4 kW
Nettoleistung (Abgasauskühlung 120 °C)	21,3 kW	26,4 kW	21,6 kW
Abgasauskühlung für 15 kW Bruttoleistung	260 °C	326 °C	259 °C

In Tab. 3 ist weiterhin aufgeführt, auf welche Temperaturen das Abgas in den Fallbeispielen lediglich ausgekühlt werden müsste, um eine 15 kW Mikroexpansionsturbine zu betreiben. Diese Auskühlungstemperaturen bewegen sich bei ca. 260 °C bei den Anlagen 1 und 3 sowie 326 °C bei Anlage 2.

4 Weitere ORC-Varianten und deren Simulation

Der im vorigen Abschnitt beschriebene, einfache ORC-Prozess lässt sich in verschiedenen Varianten verändern und erweitern. Hierunter seien an dieser Stelle aufgeführt:

- Integration eines internen Rekuperators,
- zusätzliche Nutzung des Motorkühlwassers,
- Einsatz von Fluidgemischen,
- Übergang zu transkritischem Prozess,
- zweistufiger ORC,
- Massenstromaufspaltung.

Manche der hier aufgeführten Varianten sind miteinander kombinierbar, teils schließen sie sich aber auch gegenseitig aus. In den weiteren Untersuchungen sollen vor allem die beiden erstgenannten Varianten berücksichtigt werden.

Dies ist zum einen der eingangs schon erwähnte interne Rekuperator (*ORC-Variante IR*). Dieser führt zu einer internen Wärmeübertragung zwischen dem abzukühlenden und dem aufzuwärmenden Fluidmassenstrom. Einem Grundprinzip zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades von Wärmekraftprozessen folgend, wird hierdurch das mittlere Temperaturniveau der Wärmezufuhr angehoben und das mittlere Temperaturniveau der Wärmeabfuhr abgesenkt. Diese Variante, deren Anlagenschema in Abb. 3 dargestellt ist, wird auf das Fallbeispiel der Anlage 1 abgebildet.

Zum anderen ist dies die zusätzliche Nutzung des Motorkühlwassers (*ORC-Variante IR+MKW*) gemäß Abb. 4. Die in den ORC insgesamt einkoppelbare Wärmeleistung lässt sich dadurch zwar steigern. Die Stromerzeugung steigt allerdings nicht in gleichem Maße, da mit einer solchen Einkopplung von Niedertemperaturwärme der Prozesswirkungsgrad tendenziell sinkt. Diese Variante wird auf Anlage 2 angewendet.

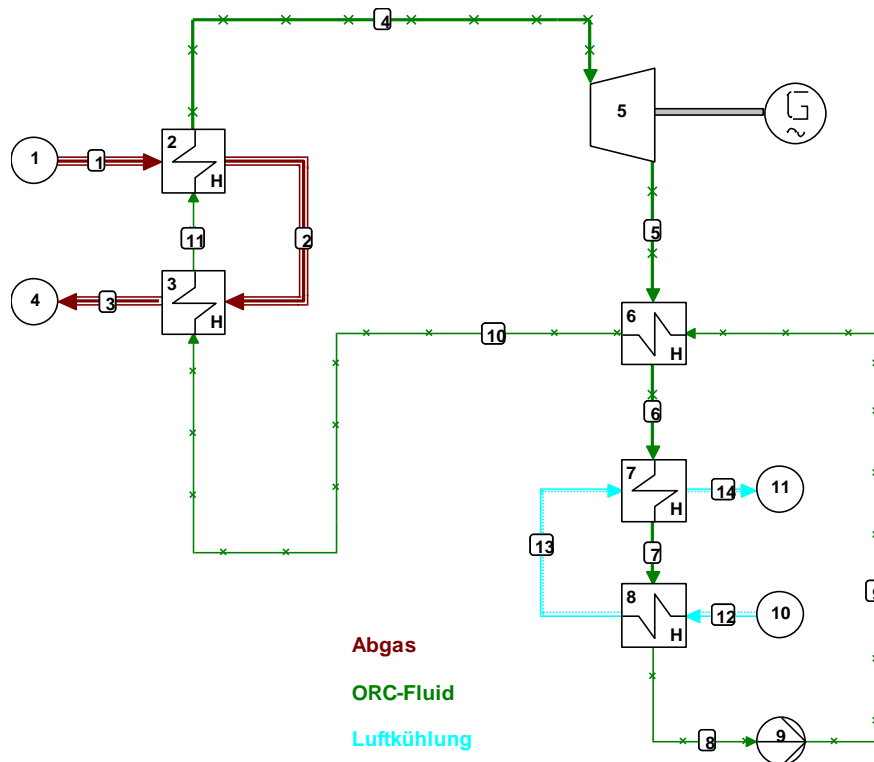


Abb. 3: ORC-Schaltungsvariante „IR“ mit internem Rekuperator (Aggregat Nr. 7)

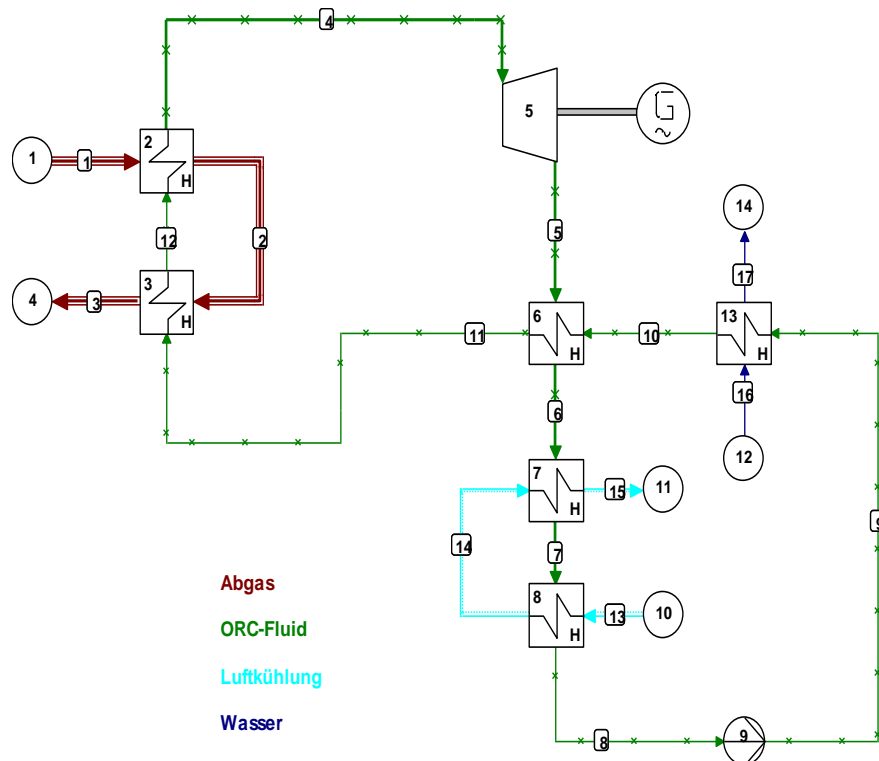


Abb. 4: ORC-Schaltungsvariante „IR+MKW“ mit zusätzlicher Einkopplung von Wärme aus dem Motorkühlwasser (Aggregat Nr. 13)

Als weitere zu untersuchende Variante soll die Einbindung eines separaten Druckwasserkreislaufs betrachtet werden. Da dies gegenüber einer Direktverdampfung grundsätzlich leistungsmindernd wirkt, wird zugleich eine Nutzung des Motorkühlwassers vorgesehen (*ORC-Variante MKW+DWK*). Auf den internen Rekuperator wird unter diesen Umständen verzichtet. Diese Variante findet Einsatz beim Fallbeispiel der Anlage 3, da dort ein ähnlicher ORC-Prozess (allerdings ohne Turbine und mit einem anderen Arbeitsfluid) inzwischen bereits realisiert wurde. Das Anlagenschema ist in Abb. 5 dargestellt.

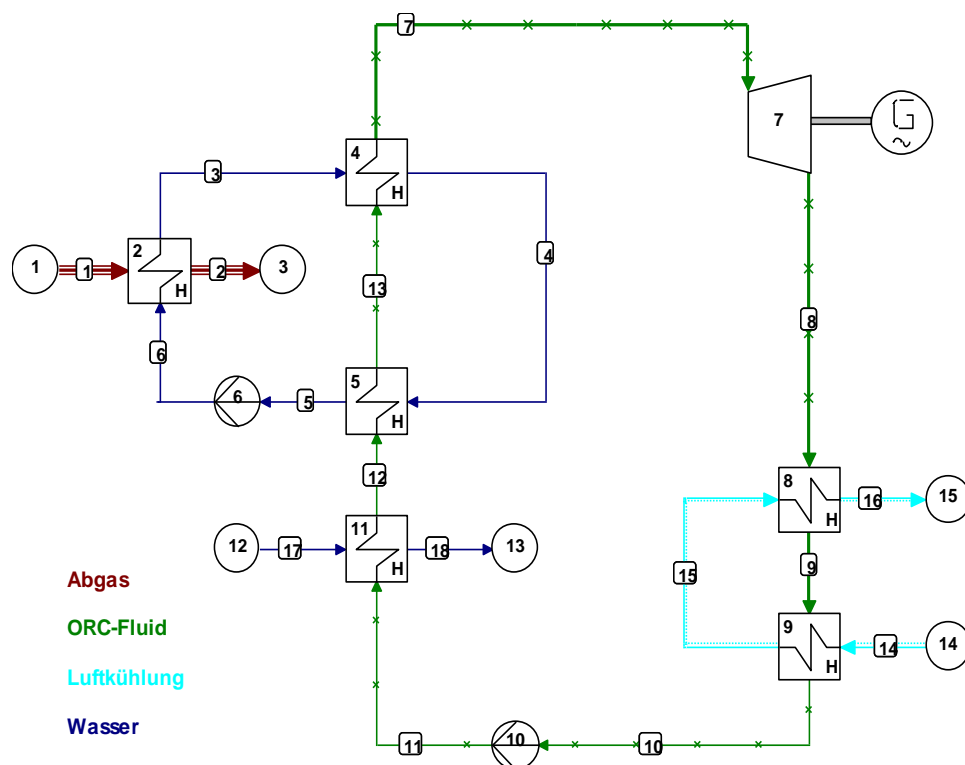


Abb. 5: ORC-Schaltungsvariante „MKW+DWK“ mit Einkopplung von Wärme aus dem Motorkühlwasser (Aggregat Nr. 11) und indirekter Einkopplung der Abgaswärme über den in den Druckwasserkreislauf integrierten Wärmeübertrager (Aggregat Nr. 2).

Die anderen, eingangs von Abschnitt 4 aufgeführten Schaltungsvarianten finden in der Praxis zwar durchaus Anwendung in ORC-Anlagen, allerdings in erster Linie bei der geothermischen Stromerzeugung. Die erforderlichen Investitionen bei der geothermischen Stromerzeugung werden vorrangig durch die Bohrkosten zur Erschließung von Thermalquellen bestimmt. Selbst überdurchschnittlich hohe spezifische Investitionen für leistungsoptimierte ORC-Technik fallen demgegenüber weniger ins Gewicht. Geht es hingegen wie in den hier vorliegenden Fallbeispielen um die Verwertung quasi kostenloser oder mit nur relativ geringen Absatzpreisen belegbarer Abwärme, spielen die

Kosten der ORC-Anlagentechnik eine ausschlaggebende Rolle. Signifikante Mehrkosten der angesprochenen leistungsoptimierten ORC-Varianten lassen sich dabei nur teilweise durch zusätzliche Erlöse aus einer erhöhten Stromerzeugung kompensieren.

Abb. 6 verdeutlicht für die drei Fallbeispiele, welche Leistungssteigerungen durch die betrachteten ORC-Schaltungsvarianten im Vergleich zu dem in Abschnitt 3 diskutierten Mini-ORC zu erwarten wären. Wird bei Anlage 1 der Mini-ORC durch einen internen Rekuperator (IR) ergänzt, so erhöht sich die Bruttoleistung um 14,4 % und die Nettoleistung um 15,9 %. Bei einer Umsetzung dieser Anlagenerweiterung bedeutet dies zwar auf den ersten Blick zusätzliche Kosten für den internen Rekuperator. Allerdings werden diese Mehrkosten zumindest teilweise dadurch kompensiert, dass sowohl Vorwärmer/Verdampfer als auch Kondensator nur mehr geringere Wärmeströme übertragen müssen und folglich kleiner ausgelegt werden können. Bei diesen Aggregaten sind also Kosteneinsparungen erzielbar. Belastbare quantitative Aussagen zur Wirtschaftlichkeit sind gewiss nur mit einer sehr detaillierten Anlagenauslegung ableitbar. Das Fallbeispiel 1 zeigt jedoch, dass für Abgastemperaturen von 460 °C die Integration eines internen Rekuperators in den Mini-ORC in Erwägung gezogen werden sollte.

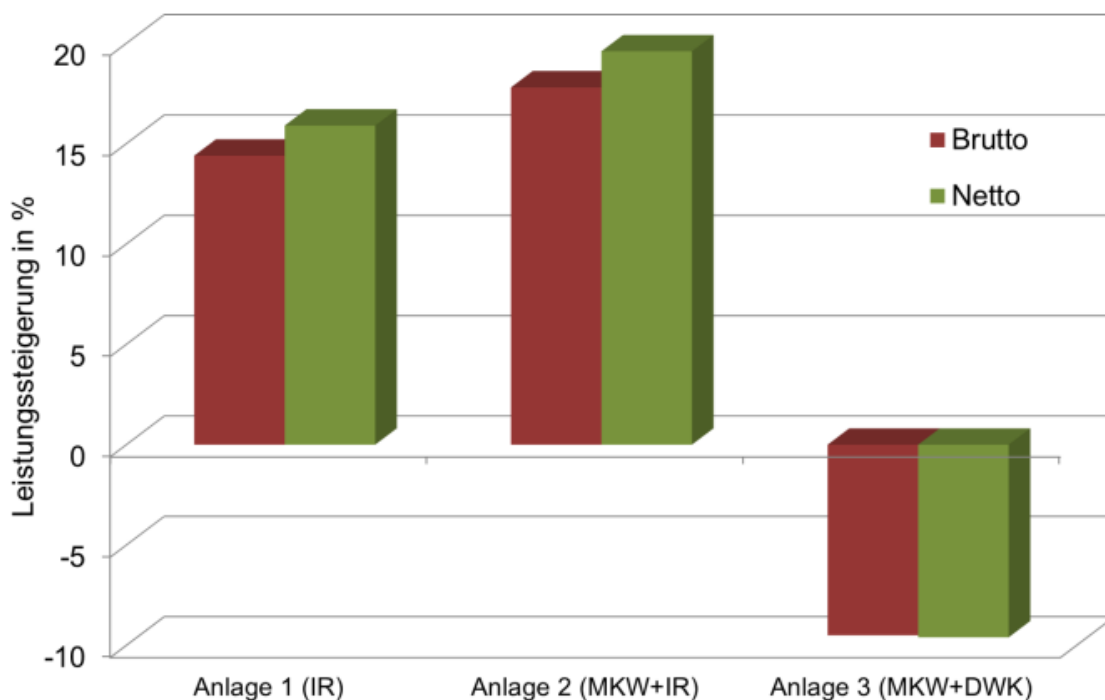


Abb. 6: Erzielbare Leistungssteigerungen durch ausgewählte ORC-Schaltungsvarianten im Vergleich zur entwickelten Mini-ORC

Sieht man neben dem internen Rekuperator zusätzlich die Nutzung des Motorkühlwassers (IR+MKW) vor, wie dies in Abb. 6 für Fallbeispiel 2 dargestellt ist, so lässt sich die Bruttoleistung um 17,8 % und die Nettoleistung um 19,6 % gegenüber dem einfachen Mini-ORC steigern. Die Umsetzung erfordert hier allerdings zusätzliche Investitionen für den Kühlwasser-Wärmeübertrager, und auch die übrigen Komponenten müssen jeweils größer dimensioniert werden. Als qualitative Aussage bleibt hier festzuhalten, dass sich im Vergleich zu Fallbeispiel 1 dieser zusätzliche Aufwand kaum durch die eher moderaten Leistungssteigerungen aufwiegen lässt.

Die erheblichen Nachteile einer indirekten Einkopplung von Abgaswärme in den ORC-Prozess mittels Druckwasserkreislauf oder auch Thermoölkreislauf werden in Abb. 6 für das Fallbeispiel 3 aufgezeigt. Trotz ebenfalls berücksichtigter Einkopplung von Motorkühlwasser (MKW+DWK) resultieren hier Leistungsminderungen gegenüber dem Mini-ORC von annähernd 10 %. Zudem wären im Falle einer Realisierung für beide Komponenten überdies zusätzliche Investitionen zu berücksichtigen.

Zusammenfassend lässt sich aus den Fallbetrachtungen in dieser Studie folgern, dass der entwickelte Mini-ORC technisch gesehen einen vielversprechenden Ansatz zur Nachverstromung von Abgaswärme aus Biogas-BHKWs mittlerer bis größerer Leistung darstellt. Soweit Abgastemperaturen jenseits von 400 °C zur Verfügung stehen, sollte die zusätzliche Integration eines internen Rekuperators in Betracht gezogen werden.

Geht man in einer groben Hochrechnung für die gesamte Bioenergieregion Bayreuth davon aus, dass bei BHKWs mit einer installierten elektrischen Leistung von 200 kW und mehr genügend Abgaswärme für den Betrieb des Mini-ORC mit 15 kW Bruttoleistung zur Verfügung steht, und bei Anlagen über 400 kW eine entsprechende Anzahl an Mini-ORCs parallel geschaltet wird, so könnten rein rechnerisch rund 30 Mini-ORC-Anlagen mit einer Bruttogesamtleistung von 450 kW in der Region installiert werden. Berücksichtigt man die Tatsache, dass verschiedentlich die Abgaswärme bereits zur Nutzwärmebereitstellung eingesetzt wird, dürfte sich die installierbare Anlagenzahl auf etwa 20 bis 25 Mini-ORCs verringern.

Soweit die technischen Voraussetzungen erfüllt sind, stellt sich für den Betrieb einer ORC-Nachverstromung von Abgaswärme aus Biogas-BHKWs die Frage der Wirtschaftlichkeit. Bei den derzeit realisierten ORC-Anlagen lassen sich spezifische Investitionskosten von 3.500 bis 4.000 EUR je kW installierter elektrischer Leistung kaum unterschreiten. Der entwickelte Mini-ORC bietet mit seiner überschaubaren Anlagenkomplexität zwar relative Kostenvorteile gegenüber herkömmlichen marktverfügbaren Anlagen. Die realisierten ORC-Anlagen sind andererseits aber auch einer deutlich größeren Leistungsklasse zuzuordnen als der Mini-ORC. Da die spezifischen Anlagenkosten einer Technologie mit kleiner werdender Leistung allgemein überproportional steigen, dürfte auch der Mini-ORC den oben angegebenen Kostenrahmen derzeit kaum unterschreiten.

können. Demzufolge müssen bei der Umsetzung einer Abwärmenachverstromung mittels Mini-ORC Amortisationszeiten jenseits von fünf Jahren in Kauf zu nehmen. Eine breite Erschließung des zweifellos vorhandenen Potenzials erscheint nur dann realistisch, wenn die spezifischen Anlagenkosten weiter gesenkt werden können und/oder neue Anreize zur Maßnahmenumsetzung geschaffen werden.

In weiteren Forschungsarbeiten des LTTT und dessen Partnern stehen neben der noch eingehender zu klärenden Frage der thermischen Stabilität eingesetzter organischer Arbeitsfluide auch die Bestrebungen zur weiteren Verbesserung der Kosteneffizienz von ORC-Anlagen zur Abwärmenutzung sowie zur Hochskalierung des Mini-ORC auf etwa eine etwas größere elektrische Nennleistung mit im Vordergrund.

5 Fazit

Als wesentliche Ergebnisse und Empfehlungen dieser Studie zur Stromerzeugung aus Abwärme von Biogas-BHKWs sind hervorzuheben:

- Umfassenden Wärmenutzungskonzepten sollte sowohl in energetischer wie auch ökonomischer Hinsicht stets der Vorrang gegenüber einer Nachverstromung mittels ORC eingeräumt werden. Wie auch die in diese Studie insgesamt einbezogenen Biogas-BHKWs zeigen, ist eine weitgehende Wärmenutzung bei Bestandsanlagen aber nach wie vor eher eine Ausnahme als die Regel.
- Für die ORC-Nachverstromung sollte vorzugsweise Abgaswärme genutzt, und diese möglichst direkt in den ORC eingekoppelt werden. Das mit dem entwickelten Mini-ORC verfolgte Anlagenkonzept, welches bei einer elektrischen Bruttoleistung von 15 kW in mittelgroßen Biogas-BHKWs einsetzbar ist, erweist sich damit als zielführend. Bei größeren BHKWs wäre auch der parallele Betrieb von zwei solcher Mini-ORCs denkbar.
- Beträgt die Temperatur des nutzbaren Abgases mehr als 400 °C, erscheint die Integration eines internen Rekuperators in den einfachen ORC-Kreislauf sinnvoll.
- Komplexere ORC-Schaltungsvarianten, die auf eine möglichst vollständige Nutzung aller BHKW-Abwärmeströme und eine größtmögliche Leistungssteigerung ausgerichtet sind, können aus wirtschaftlicher Sicht gegenüber einfachen Konzepten wie dem entwickelten Mini-ORC nicht konkurrieren.
- In Anbetracht des derzeit zu veranschlagenden Investitionsvolumens sind für die Realisierung einer ORC-Nachverstromung Amortisationszeiten von mindestens fünf Jahren zu veranschlagen.

- Es bedarf einer weitergehenden Standardisierung und Modularisierung der ORC-Anlagen, besonders auch im Einsatzgebiet der Abwärmenutzung. Nur mit einer signifikanten Senkung der spezifischen Anlagenkosten lässt sich das Potenzial der ORC-Nachverstromung bei Biogas-BHKWs tatsächlich ausschöpfen.

Aktuelle weiterführende Publikationen des LTTT

Die vorliegende Studie wurde so abgefasst, dass für deren Verständnis keine tieferen Fachkenntnisse erforderlich sind. Aktuelle weiterführende Publikationen des LTTT zum Themengebiet ORC sind nachstehend aufgeführt:

T. Weith, F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann: Performance of Siloxane Mixtures in a High-Temperature Organic Rankine Cycle Considering the Heat Transfer Characteristics during Evaporation. *Energies* 2014, vol. 7, Issue 9, pp. 5548-5565, doi:10.3390/en7095548, August 2014

F. Heberle, D. Brüggemann: Thermo-economic Analysis of Hybrid Power Plant Concepts for Geothermal Combined Heat and Power Generation. *Energies* 2014, vol. 7, Issue 7, pp. 4482-4497, doi:10.3390/en7074482, July 2014

F. Heberle, D. Brüggemann: Kraftwerkstechnik. In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, Th. (Hrsg.): *Handbuch Tiefe Geothermie*, S. 689-714, ISBN 978-3-642-54510-8, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Juni 2014

P. Klonowicz, F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann: Significance of loss correlations in performance prediction of small scale, highly loaded turbine stages working in Organic Rankine Cycles. *Energy*, vol. 72, pp. 322-330, doi:10.1016/j.energy.2014.05.040, August 2014

K. Braimakis, A.-D. Leontaritis, M. Preißinger, S. Karellas, D. Brüggemann, K. Panopoulos: Thermodynamic investigation of waste heat recovery with subcritical and supercritical lowtemperature Organic Rankine Cycle based on natural refrigerants and their binary mixtures. In: *Proceedings of ECOS 2014 - the 27th international Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Turku (Finland), June 2014

T. Weith, F. Heberle, D. Brüggemann: Experimental Investigation of Flow Boiling Characteristics of Siloxanes and Siloxane Mixtures in a Horizontal Tube. In: *Proceedings of the International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer, CONV-14*, Kusadasi (Turkey), June 2014

P. Klonowicz, A. Borsukiewicz-Gozdur, P. Hanausek, W. Kryłowicz, D. Brüggemann: Design And Performance Measurements Of An Organic Vapour Turbine. *Applied Thermal Engineering*, doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.11.018, Available online November 2013

P. Klonowicz, D. Brüggemann: 2D Unsteady RANS Simulations of an Organic Vapor Partial Admission Turbine. In: *ASME ORC 2013, 2nd International Seminar on ORC Power Systems*, Rotterdam, October 2013

T. Weith, F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann: Abwärmenutzung von Biogas-BHKWs mittels Nachverstromung in ORC-Anlagen. In: *Tagungsband FNR/KTBL-Kongress - Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven*, KTBL-Schrift 501, S. 245-255, ISBN 978-3-941583-82-5, Kassel, September 2013

M. Preißinger, F. Heberle, D. Brüggemann: Advanced Organic Rankine Cycle for geothermal application. *International Journal of Low-Carbon Technologies: Special issue - Heat Powered Cycles Conference 2012*, Issue 8, suppl. 1, pp. 62-68, doi:10.1093/ijlct/ctt021, July 2013

- F. Heberle, D. Brüggemann: Organic Rankine Cycle: An alternative to water steam cycles for efficient waste heat recovery. In: Proceedings of European Metallurgical Congress 2013, vol. 2, pp. 855-864, ISBN 978-3-940276-50-6, Weimar, June 2013
- F. Heberle, D. Brüggemann: Pool boiling heat transfer coefficients of R245fa, R365mfc and their mixtures. In: Proceedings of 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Paper-ID 324, Lisbon (Portugal), June 2013
- F. Heberle, M. Preißinger, T. Weith, D. Brüggemann: Stromerzeugung aus Abwärme von Biogas-BHKW. In: 7. Fachtagung Biogas 2013 - Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2208, S. 119-129, ISBN 978-3-18-092208-9, Nürtingen, Juni 2013
- F. Heberle, D. Brüggemann: Thermoeconomic comparison of designs for geothermal combined heat and power generation. In: Proceedings of European Geothermal Congress 2013, Paper-ID HS3-04, ISBN 978-2-8052-0226-1, Pisa (Italy), June 2013
- F. Heberle, D. Brüggemann: Thermodynamic and technical evaluation of innovative power plant concepts for geothermal power generation. In: Proceedings of 9th International Geothermal Conference, Short Course - Challenges during power plant construction and their solutions, pp. 9-13, Freiburg, May 2013
- F. Heberle: Untersuchungen zum Einsatz von zeotropen Fluidgemischen im Organic Rankine Cycle für die geothermische Stromerzeugung. Dissertation, LTTT, Universität Bayreuth, 2013; Band 22 der Reihe: D. Brüggemann(Hrsg.): Thermodynamik - Energie, Umwelt, Technik. ISBN 978-3-8325-3355-7, Logos-Verlag, Berlin, 2013
- F. Heberle, D. Brüggemann: Mögliche Emissionen bei der Stromerzeugung aus Geothermie. Geothermische Energie, Band 75, S. 22-24, März 2013
- F. Heberle, D. Brüggemann: Thermoökonomische vom Geothermie-Hybridkraftwerken zur Kraft-Wärme-Kopplung. In: Geothermiekongress Kongressband CD-ROM, ISBN 978-3-932570-67-4, Karlsruhe, November 2012
- F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann: Organic Rankine Cycle mit zeotropen Arbeitsmittelgemischen zur Stromerzeugung aus industrieller Abwärme. In: Proceedings of 3rd International Conference, Low Temperature and Waste Heat Use in Energy Supply Systems, S. 79-86, Bremen, Oktober 2012
- F. Heberle, A. Obermeier, D. Brüggemann: Mögliche Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Geothermie durch den Einsatz von F-Gasen im Energiewandlungsprozess mittels ORC. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Climate Change, Nr. 16/2012, UBA-FBNr: 001690, FKZ / Projektnr: 363 01 391, ISSN 1842-4359, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4323.html>. 2012
- M. Preißinger, F. Heberle, D. Brüggemann: Thermodynamic analysis of double-stage biomass fired Organic Rankine Cycle for micro-cogeneration. International Journal of Energy Research, vol. 36, Issue 8, pp. 944-952, doi:10.1002/er.1952, June 2012
- M. Preißinger, F. Heberle, D. Brüggemann: Exergetic analysis of biomass fired double-stage Organic Rankine Cycle (ORC). In: Proceedings of ECOS 2012 - the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, pp. 155-164, ISBN 978-88-6655-322-9, Perugia (Italy), June 2012
- F. Heberle, P. Bassermann, M. Preißinger, D. Brüggemann: Exergoeconomic Optimization of an Organic Rankine Cycle for Low-Temperature Geothermal Heat Sources. International Journal of Thermodynamics, vol. 15, Issue 2, pp. 119-126, doi:10.5541/ijot.374, May 2012
- F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann: Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources. Renewable Energy, vol. 37, Issue 1, pp. 364-370, doi:10.1016/j.renene.2011.06.044, January 2012