

Biomasse – Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des ORC-Prozesses – Stand der Technik und Möglichkeiten der Prozessoptimierung

Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. **Ingwald Obernberger** Graz/A;
Univ.-Prof. Dr. **Mario Gaia** Milano/I

Kurzfassung:

Die Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologie auf Basis ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) wurde bereits im Rahmen mehrerer Projekte realisiert und stellt eine ausgereifte, dem Stand der Technik entsprechende Technologie dar. Der Leistungsbereich der Anlagen liegt zwischen 200 und 1.500 kW_{el}. In den letzten Jahren konnte durch Weiterentwicklung und Optimierung dieser Technologie der elektrische Anlagenwirkungsgrad deutlich gesteigert werden. Eine optimierte ORC-Anlagentechnologie wurde 2001 in Lienz (Österreich) erfolgreich demonstriert, bei der erstmals ein Thermoöl-Economiser und ein Luftvorwärmer eingesetzt werden.

Eine neue und innovative Möglichkeit der Prozessoptimierung stellt die Implementierung eines verzweigten Kondensatkreislafes beim ORC-Prozess dar. Durch diese Schaltungsvariante wird in einem zweiten Thermoöl-Economiser dem Rauchgas zusätzlich Wärme entzogen, wodurch, laut durchgeführter Berechnungen, der elektrische Anlagenwirkungsgrad zwischen 4 % (gleiche spezifische Wärmetauscherfläche) und 8% (erhöhte spezifische Wärmetauscherfläche) gesteigert werden kann. Die ersten praktischen Anwendungen werden zeigen zu welchem Teil diese Wirkungsgradsteigerungen in Realanlagen erreicht werden können. Eine Erhöhung der Temperatur des Thermoöles (von 300/250 auf 320/270 °C) trägt ebenfalls zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades bei, jedoch sind für eine effiziente Realisierung dieser Option einige Modifikationen an Komponenten des ORC-Prozesses erforderlich. Ohne Modifikationen führt diese Maßnahme zu einer Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades, wenn erhöhte Temperaturen im Kühlkreislauf (Fern- bzw. Prozesswärmeverlauftemperaturen) benötigt werden.

Ein neues Anwendungsgebiet der ORC-Technologie ist die Einbindung in einen Biomasse-Wirbelschicht-Dampfvergasungsprozess mit nachgeschalteten Gasmotoren. Das Ziel ist es dabei den elektrischen Anlagenwirkungsgrad durch effiziente Abwärmenutzung zu optimieren. Diese Anwendung ist für Biomasse-KWK-Anlagen mit elektrischen Nennleistungen größer 2,5 MW geeignet.

Abstract:

The biomass-fired CHP technology based on the ORC process (Organic Rankine Cycle) has attained a high level of development and several commercial units utilising this technology are already in operation. The nominal electric capacities range from 200 to 1,500 kW. In recent years the technology has been further optimised in order to increase the electric plant efficiency. In 2001 an optimised plant technology equipped with a thermal oil boiler and an air pre-heater was demonstrated successfully in Lienz, Austria.

The ORC process with branched condensate cycle is a new option to further optimise the system and enhance the electric plant efficiency between 4 % (same specific heat exchanger area) and 8% (increased specific heat exchanger area) according to calculations already performed. The first practical applications will show to which extent this increase in efficiency will be achieved in practice. An increase of the thermal oil temperature (from 300/250 to 320/270 °C) also leads to an enhanced electric plant efficiency, but in order to implement this measure effectively several components of the ORC process have to be modified. A gain in electric efficiency by this measure without modifications of the ORC system is possible if increased temperatures are necessary in the cooling cycle (feed water temperature at the condenser).

A new field of application for the ORC process is its integration into a biomass-fired fluidised bed steam gasification plant with integrated gas engines. The target is to enhance the electric plant efficiency by an efficient utilisation of the waste heat sources available. This application is suitable for biomass CHP plants with a nominal electric capacity above 2.5 MW.

1. Einleitung

Die Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologie auf Basis ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle), stellt eine interessante Möglichkeit zur Erzeugung von Strom und Wärme in dezentrale Anlagen mit elektrischen Nennleistungen zwischen 200 und 1.500 kW dar. Diese Technologie hat in den letzten Jahren Marktreife erlangt und wurde bereits im Rahmen von mehreren Projekten in Österreich, Deutschland, der Schweiz und Italien erfolgreich realisiert. In den letzten Jahren erfolgte eine stetige Weiterentwicklung dieser Technologie, mit dem Ziel den elektrischen Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme zu optimieren. Erste Prozessoptimierungen wurden an der Anlage Lienz im Jahr 2001 realisiert, wobei bei dieser Anlage durch den Einsatz eines Thermoöl-Economisers und eines Luftvorwärmers der elektrische Anlagenwirkungsgrad wesentlich gesteigert werden konnte.

Zukünftig kann die ORC-Technologie jedoch in Teilbereichen noch weiter optimiert werden. In diesem Zusammenhang stellen der ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis, bei dem dem Prozess durch ein innovatives Schaltungskonzept zusätzliche Energie aus dem Rauchgas zugeführt wird, und die Erhöhung der Temperatur des Thermoöles interessante Optionen dar.

Zusätzliche Anwendungsgebiete der ORC-Technologie ergeben sich durch innovative Einbindungen in andere KWK-Prozesse. In diesem Zusammenhang stellt die Integration in eine Wirbelschicht-Dampfvergasungsanlage auf Biomassebasis mit nachgeschalteten Gasmotoren eine interessante und zukunftssträchtige Option dar.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Technologie und der Stand der Technik des ORC-Prozesses dargestellt und neue Möglichkeiten der Optimierung und der Prozessintegration diskutiert.

2. ORC-Prozess – Beschreibung der Technologie und der bereits realisierten Prozessoptimierungsmaßnahmen

Die ORC-Technologie basiert auf einer langjährigen Entwicklung, mit dem Ziel Solarenergie, geothermische Energie sowie Energie aus Biomasse dezentral und sinnvoll zu nutzen [1]. Der ORC-Prozess („Organic Rankine Cycle“) ist dem konventionellen Wasser-Dampf-Prozess ähnlich mit dem Unterschied, dass anstelle von Wasser ein organisches Arbeitsmedium (Kohlenwasserstoffe wie Iso-Pentan, Iso-Oktan, Toluol oder Silikonöl) verwendet wird. Dieses Arbeitsmedium besitzt günstigere Verdampfungseigenschaften bei tieferen Temperaturen und Drücken. Für eine optimale Betriebsweise des ORC-Prozesses ist die richtige Arbeitsmittelwahl sehr wichtig. Für die in Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gegebenen Rahmenbedingungen eignet sich Silikonöl sehr gut als Arbeitsmittel [2, 3].

Als Wärmeträgermedium zwischen Biomassefeuerung und ORC-Prozess kommt Thermoöl zum Einsatz. Die im Kühlkreislauf anfallende Wärmemenge wird in ein Prozess- oder Fernwärmenetz eingespeist. Biomasse Kraft-Wärme-Kopplungen auf Basis ORC-Prozess werden derzeit meist bei Temperaturen auf der Thermoölseite mit 300/250 °C (in wenigen Fällen auch bei 310/240 °C) und auf der Kühlkreislaufseite mit 60/80 °C (bzw. 70/90 °C) betrieben.

Aus Bild 1 und Bild 2 sind das Arbeitsprinzip, die verschiedenen Komponenten des ORC-Prozesses sowie seine Integration in eine Biomasse-KWK-Anlage ersichtlich. Die ORC-Anlage ist mit dem Thermoölkessel über einen Thermoölkreislauf verbunden. Der ORC-Prozess selbst ist vollkommen geschlossen ausgeführt und verwendet ein Silikonöl als

organisches Arbeitsmedium. Das unter Druck stehende Silikonöl wird durch das Thermoöl im Verdampfer verdampft sowie leicht überhitzt und danach in einer langsam laufenden Axialturbine entspannt, die direkt an einen Asynchrongenerator gekoppelt ist. Bevor das entspannte Silikonöl in den Kondensator gelangt, wird es einem Regenerator zugeführt (zur internen Wärmerückgewinnung). Die Kondensation des Arbeitsmittels findet auf einer Temperaturstufe statt, welche eine Nutzung der abgeführten Wärme als Fern- bzw. Prozesswärme erlaubt (Wasservorlauftemperatur zwischen 80 und 110°C). Über eine Pumpe wird das kondensierte Arbeitsmittel schließlich wieder auf das Druckniveau des heißen Arbeitsteils des Kreislaufes gehoben und erreicht nach Durchströmung des Regenerators wieder den Verdampfer.

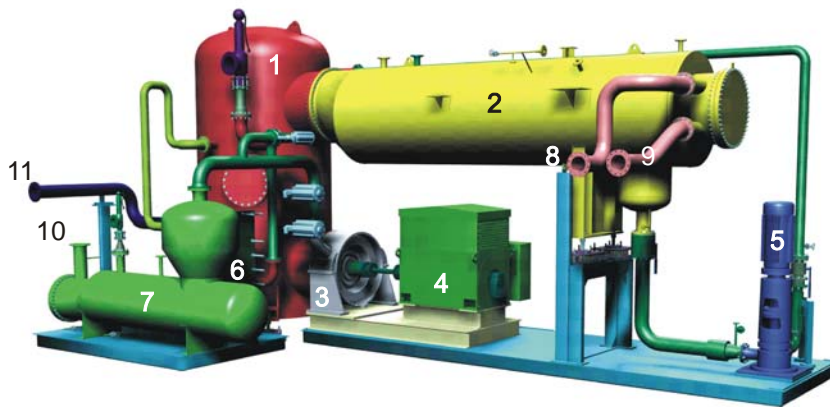


Bild 1: Grafische Darstellung eines ORC-Moduls

Erläuterungen: 1... Regenerator, 2 ... Kondensator, 3 ... Turbine, 4 ... Generator, 5 ... Umwälzpumpe, 6 ... Vorwärmer, 7 ... Verdampfer, 8 ... Fernwärme-Vorlauf, 9 ... Fernwärme-Rücklauf, 10 ... Thermoöl-Vorlauf, 11 ... Thermoöl-Rücklauf; Quelle: Turboden Srl, Brescia, Italien

Ein ganz wesentlicher Vorteil der ORC-Technologie ist dessen ausgezeichnete Teillast- und Lastwechselfähigkeit. Laut vorliegenden Betriebserfahrungen ist ein vollkommen automatisierter Anlagenbetrieb zwischen 10 und 100% der Nennleistung problemlos möglich. Bei konventionellen Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis ORC-Prozess wird nur ein Thermoölkessel bestehend aus einem Strahlungszug, gefolgt von 2 konvektiven Zügen eingesetzt, wobei der Wirkungsgrad des Thermoölkessels (=Nennwärmeleistung / Brennstoffwärmeleistung [Hu]) in diesem Fall nur im Bereich von 68 bis 77% liegt (abhängig vom Luftüberschuss und vom Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffes, bei einer Rauchgasaustrittstemperatur aus dem Thermoölkessel von rund 370 °C). Eine wesentliche Optimierung des Prozesses wurde dadurch erreicht, dass dem Thermoölkessel ein Thermoöl-Economiser und ein Luftvorwärmer nachgeschaltet wurden, um die im Rauchgas noch enthaltene fühlbare Wärme besser für die Stromerzeugung zu nutzen. Durch diese innovative Verschaltung (siehe Bild 2) wird die Rauchgasaustrittstemperatur aus dem

Luftvorwärmer auf rund 220 °C gesenkt und dadurch der Wirkungsgrad des Thermoölkessels um rund 12% erhöht, was auch eine entsprechende Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades der Gesamtanlage bedingt. Der ORC-Prozess selbst wurde bei dieser Optimierung gegenüber früheren Anwendungen nicht verändert. Seine Betriebsdaten sind in Tabelle 1 dargestellt, der elektrische Netto-Wirkungsgrad beträgt laut Messungen rund 18% [4].

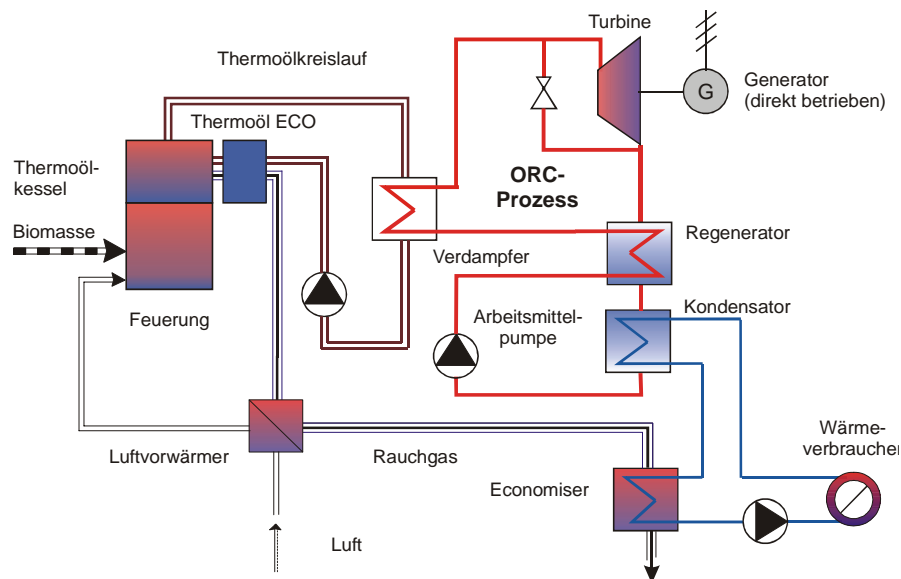


Bild 2: Schematische Darstellung der Integration des ORC-Prozesses in eine Biomasse-KWK-Anlage – optimierter Prozess der Anlage Lienz (A)

Technische Daten des ORC-Prozesses	
Thermische Leistung Input (Thermoöl) - Nennlast ORC	5.560 kW
Elektrische Nettoleistung - Nennlast ORC	1.000 kW
Thermische Leistung Output (Kondensator) - Nennlast ORC	4.440 kW
Elektrischer Bruttowirkungsgrad - Nennlast ORC	18,9 %
Elektrischer Nettowirkungsgrad - Nennlast ORC	18,0 %
Elektrische und thermische Verluste	rund 2 %
Heizmedium	Thermoöl
Eintrittstemperatur	300 °C
Austrittstemperatur	250 °C
Arbeitsmittel	Silikonöl
Kühlmedium	Wasser
Eintrittstemperatur	60 °C
Austrittstemperatur	80 °C

Tabelle 1: Technische Daten der Biomasse-KWK-Anlage Lienz (A)

Diese optimierte ORC-Technologie wurde erstmals in der Anlage Lienz (A) realisiert, die im Herbst 2001 in Betrieb genommen wurde (siehe Bild 2) und mit Sägespänen, Hackgut und Rinde befeuert wird [5]. Der elektrische Wirkungsgrad der Gesamtanlage (=elektrische Nettoleistung/zugeführte Brennstoffwärmeleistung [H_u]) beträgt in Lienz, wie aus dem Energieflussdiagramm in Bild 3 ersichtlich ist, rund 15%. Der Thermoölkessel, der Thermoöl-Economiser wie auch der Luftvorwärmer der Anlage Lienz sind mit einer automatischen Kesselabreinigungsanlage auf Druckluftbasis ausgestattet, welche es nach bereits vorliegenden Betriebserfahrungen ermöglicht, den Thermoölkessel ohne manuelle Reinigung über rund 8.000 Stunden zu betreiben, ohne dass ein nennenswerter Anstieg der Rauchgasaustrittstemperatur zu beobachten ist.

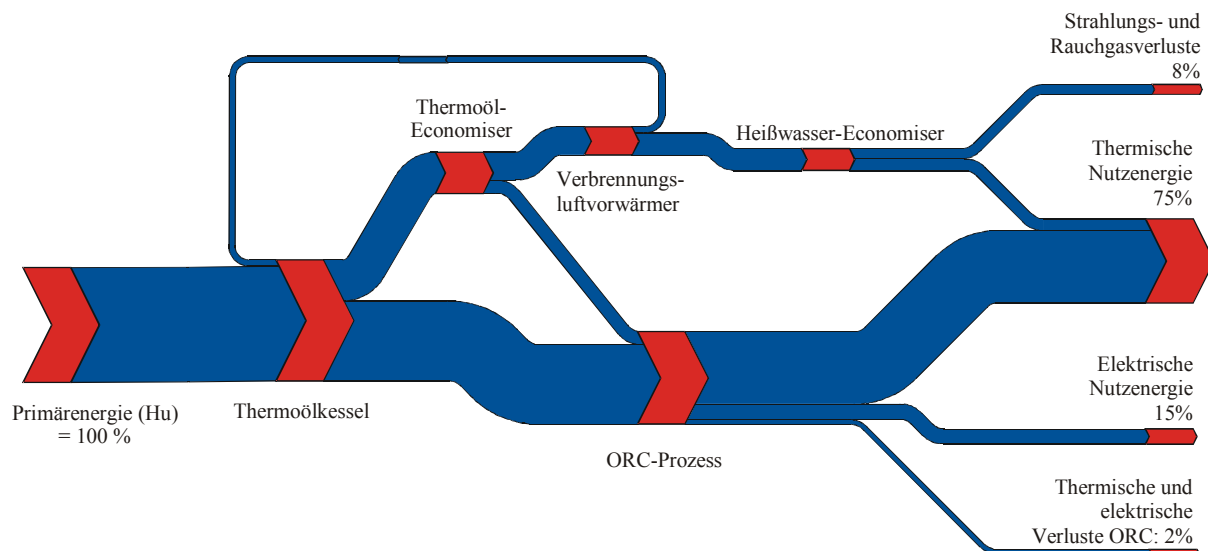


Bild 3: Energieflussdiagramm der Biomasse-KWK-Anlage Lienz

3. Weitere Möglichkeiten der Prozessoptimierung

Obwohl der ORC-Prozess bereits eine über viele Jahre entwickelt und getestet wurde und als ausgereifte Technologie zu bezeichnen ist, bestehen Möglichkeiten diesen in Teilbereichen noch weiter zu optimieren. Im folgenden Abschnitt werden grundsätzliche thermodynamische Betrachtungen angestellt und zwei interessante Möglichkeiten der Prozessoptimierung näher beschrieben, nämlich der ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis und die Erhöhung der Thermoöltemperatur.

3.1 Thermodynamische Grundlagen

Bild 4 stellt die bei einem ORC-Prozess auftretenden Temperaturverläufe schematisch dar. Der ideale Wirkungsgrad des Prozesses wird laut Gleichung 1 berechnet, wobei die

Temperaturen $T1^*$ und $T2^*$ durch logarithmische Mittelwertbildung errechnet werden. Er liegt bei Temperaturen auf der Thermoölseite von 300/250 °C und auf der Kühlkreislaufseite von 60/80 °C bei 37,3 %. Bild 5 zeigt den Verlauf des idealen Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Temperatur der Wärmequelle. ORC-Anlagen erreichen jedoch bei gleichen Rahmenbedingungen reale Wirkungsgrade von rund 18%, das heißt zirka 50% des maximalen theoretischen Wirkungsgrades, was unter Berücksichtigung der durch den Prozess vorgegebenen Rahmenbedingungen ein positives Ergebnis darstellt. Die Wirkungsgradverringerung ist auf verschiedene Verluste im Prozess zurückzuführen [6]. Ein wichtiger Aspekt ist diesbezüglich der vergleichsweise geringe Temperaturunterschied zwischen Heiz- und Kühlkreislauf. Aus diesem Grund verringert die prinzipbedingt vorhandene Grädigkeit der Wärmetauscher den Wirkungsgrad deutlich (in Bild 4 und Bild 5 als gestrichelte Linien eingezeichnet).

$$\eta_{id} = 1 - \frac{T_2^*}{T_1^*} \quad \text{Gleichung 1}$$

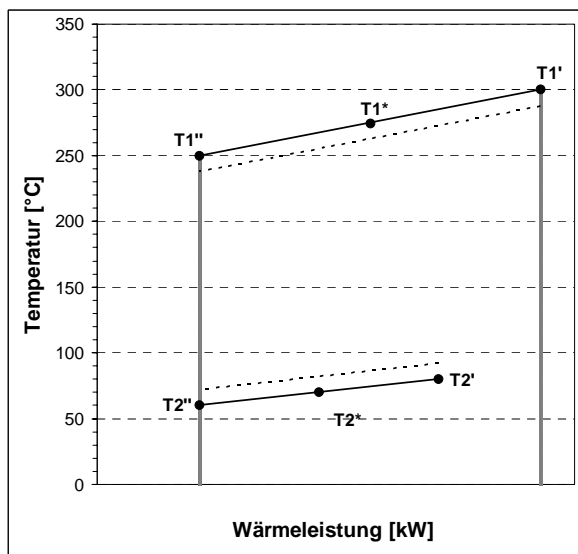


Bild 4: Schematische Darstellung typischer bei Biomasse-KWK-Anlagen auf ORC-Basis auftretender Temperaturverläufe

Erläuterungen: $T1''$... Thermoöl-Vorlauftemperatur, $T1^*$... Thermoöl-Rücklauftemperatur, $T2''$... Wasser-Vorlauftemperatur, $T2^*$... Wasser-Rücklauftemperatur, spezifische Wärmekapazität des Heiz- und Kühlmediums wird als konstant angenommen, gestrichelte Linien ... eine Grädigkeit in den Wärmetauschern von rund 12 °C wurde angenommen.

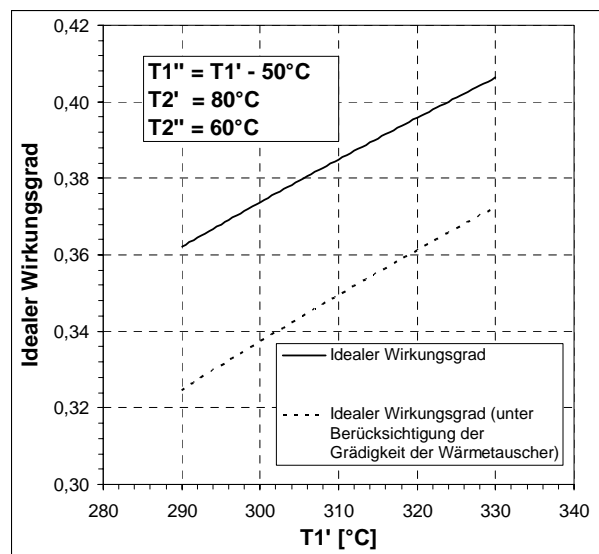


Bild 5: Darstellung des idealen Wirkungsgrades des ORC-Prozesses in Abhängigkeit der Temperatur der Wärmequelle (unter der Annahme konstanter Temperaturdifferenzen)

Im realen System werden die Verluste noch weiter erhöht, da im Kondensator und Verdampfer das Arbeitsmittel (Silikonöl) einem Phasenwechsel unterworfen ist (was einem fixierten Pinchpunkt entspricht).

Beim ORC-Prozess wird ein Regenerator eingesetzt, in dem die Flüssigphase mit der aus der Turbine austretenden Dampfphase vorgewärmt und somit Wärme intern rückgewonnen wird (siehe Bild 2). Dadurch treten weitere Verluste auf, da die Wärmekapazität der Flüssigphase höher ist als die der Dampfphase, was eine erhöhte Temperaturdifferenz zwischen eintretender Dampfphase und austretender Flüssigphase bewirkt. Dieser Umstand wirkt sich ebenfalls negativ auf die Stromproduktion aus. Zusätzliche Verluste treten, neben Wärmeverlusten an die Umgebung, insbesondere in der Turbine (fluidodynamische und mechanische Verluste), bei der Arbeitsmittelpumpe, beim Generator und bei der elektrischen Netzanbindung auf.

Aus den eben erläuterten thermodynamischen Betrachtungen leiten sich insbesondere zwei Möglichkeiten der Optimierung des elektrischen Wirkungsgrades ab.

Ein interessante Optimierungsmöglichkeit besteht darin, dass man versucht die im Regenerator auftretende Temperaturdifferenz von Flüssig- und Dampfphase, die durch deren unterschiedliche spezifische Wärmekapazitäten bedingt wird, zu reduzieren, indem man dem Prozess durch eine zusätzliche Heizquelle Energie zuführt. Der Vorteil ist dabei, dass die dazu erforderliche Energiemenge ein vergleichsweise niedriges Temperaturniveau aufweisen kann, wodurch es möglich wird, zusätzliche im Prozess vorhandene Abwärmeströme für die Stromproduktion zu nutzen. Beim ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis wird dies dadurch erreicht, dass nur ein Teilstrom der aus dem Kondensator austretenden Flüssigphase durch den Regenerator geleitet wird, während der restliche Teilstrom durch einen zusätzlichen Wärmetauscher, der mit Thermoöl als Heizmedium betrieben wird, geleitet und dort vorgewärmt wird (siehe Kapitel 3.2).

Die Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlkreislauf weist aus rein thermodynamischen Gesichtspunkten ein hohes Potential bezüglich der Optimierung des elektrischen Anlagenwirkungsgrades auf. Der Kühlkreislauf wird durch die Rahmenbedingungen des Fern- bzw. Prozesswärmeabnehmers festgelegt, wodurch hier die Möglichkeiten zur Optimierung begrenzt sind. Erhöht man die Temperatur des Thermoölkreislaufes von 300/250 °C auf 320/270 °C wird der ideale Wirkungsgrad von 37,3 auf 39,6% gesteigert, was einer Wirkungsgraderhöhung von rund 6% entspricht. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass bei realen Systemen, bedingt durch Verluste und durch erforderliche Modifikationen am Prozess, die Wirkungsgraderhöhung deutlich niedriger sein wird – es kann mit rund 3% gerechnet werden (siehe Kapitel 3.3).

3.2 ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis

Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, wird beim ORC-Prozess die Effizienz des Regenerators dadurch begrenzt, dass die spezifische Wärmekapazität der Flüssigphase größer ist als die der Dampfphase. Es ist somit ein Potential vorhanden der Flüssigphase zusätzlich Energie zuzuführen, um deren Temperatur weiter an die der Dampfphase anzugleichen. Beim ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis wird dies dadurch realisiert, dass ein Teilstrom des Arbeitsmittels (Siliconöl) nach Austritt aus dem Kondensator in einen zusätzlichen Wärmetauscher geleitet und dort vorgewärmt wird (siehe Bild 6). Der restliche Kondensatstrom wird durch den Regenerator geleitet. Die beiden Teilströme werden dann wieder zusammengeführt und in den Verdampfer geleitet. Beim konventionellen ORC-Prozess wird das gesamte Arbeitsmittel durch den Regenerator geführt (siehe Bild 2). Die zur Vorwärmung des Teilstromes erforderliche Energiemenge wird durch einen zweiten Thermoöl-Economiser bereitgestellt, der dem Thermoölkessel und dem ersten Thermoöl-Economiser nachgeschaltet ist (siehe Bild 6). Durch diesen zweiten Thermoöl-Economiser kann zusätzliche noch im Rauchgas enthaltene fühlbare Energie auf das Thermoöl übertragen werden.

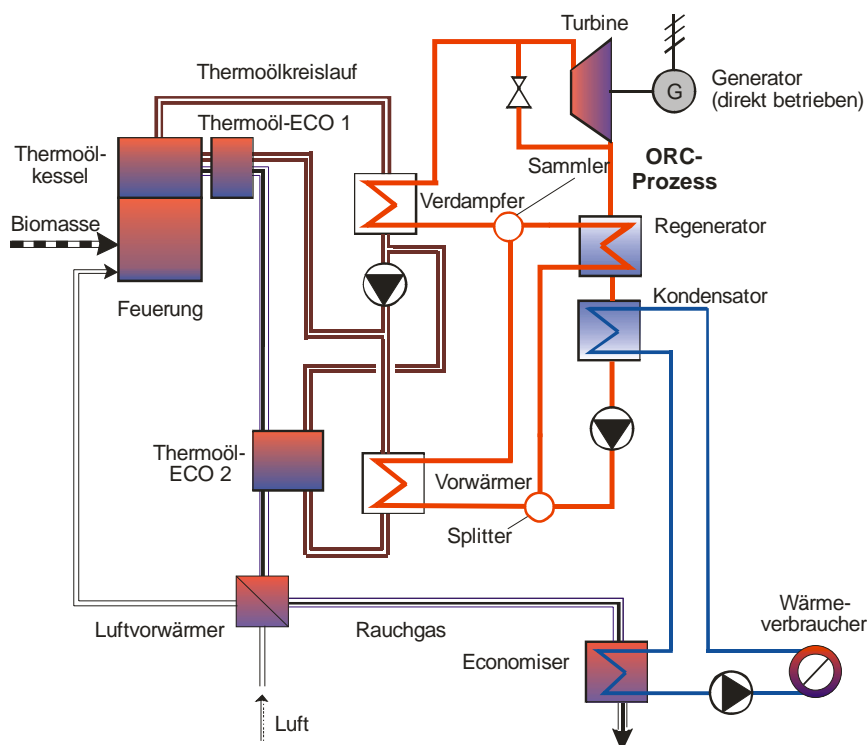


Bild 6: Schematische Darstellung des modifizierten ORC-Prozesses mit verzweigtem Kondensatkreis

In Tabelle 2 werden zwei Systeme mit verzweigtem Kondensatkreis mit einem Standard-ORC-Prozess verglichen. Der Standardprozess ist analog zur Anlage Lienz mit Thermoöl-Economiser und Luftvorwärmer ausgestattet. Er weist einen elektrischen Anlagenwirkungsgrad von 14,5% auf, wobei der elektrische Netto-Wirkungsgrad des ORC-Moduls 18% beträgt. Die dargestellten Resultate für die beiden Varianten mit verzweigtem Kondensatkreis basieren auf durchgeführten Berechnungen für diese Systeme und müssen durch Messdaten an realisierten Anlagen noch abgesichert werden.

		Standard-prozess	ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis	
			System 1	System 2
Brennstoffwärmeleistung	kW	6.910	6.910	6.160
Thermische Leistung				
TÖ-Kessel 1	kW	4.860	4.860	4.330
TÖ-Economiser 1	kW	700	700	620
TÖ-Economiser 2	kW	0	680	610
Thermische Leistung - gesamt	kW	5.560	6.240	5.560
Luftvorwärmer	kW	300	300	270
elektrische Nettoleistung - ORC Modul	kW	1.000	1.050	960
Wirkungsgrad Thermoölkreislauf	%	80,4	90,3	90,3
elektrischer Nettowirkungsgrad - ORC Modul	%	18,0	16,8	17,3
elektrischer Anlagenwirkungsgrad	%	14,5	15,2	15,6
Rauchgastemperaturen (am Austritt)				
Thermoöl-Economiser 1	°C	280	280	280
Thermoöl-Economiser 2	°C	-	190	190
Luftvorwärmer	°C	240	150	150
Temperaturen Heizmedium (TÖ)				
Eintrittstemperatur - TÖ-Economiser 2	°C	-	130	130
Austrittstemperatur - TÖ-Economiser 2	°C	-	250	250
Eintrittstemperatur - TÖ Economiser 1	°C	250	250	250
Austrittstemperatur - TÖ Kessel	°C	300	300	300

Tabelle 2: Technische Daten – Vergleich eines Standard-ORC-Prozesses mit zwei Varianten mit verzweigtem Kondensatkreis

Erläuterungen: TÖ – Thermoöl; der Standardprozess ist mit Thermoöl-Economiser und Luftvorwärmer ausgestattet (analog zur Anlage Lienz), Randbedingungen der Berechnung: Wassergehalt Brennstoff = 50 Gew% d. FS; Luftverhältnis $\lambda = 1,7$; Temperaturen Kühlkreislauf ORC (RL/VL) = 60/80 °C.

Beim ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis - System1 wird angenommen, dass der Kondensator und der Regenerator die gleiche Größe wie beim Standardprozess aufweisen. Auch die Brennstoffwärmeleistung ist gleich hoch wie beim Standardprozess („Brennstoffwärmeleistung“, laut Tabelle 2). Durch den zweiten Thermoöl-Economiser können dem ORC-Prozess zum Beispiel zusätzlich 680 kW zugeführt werden. Der Wirkungsgrad des Thermoölkreislaufes wird dadurch um rund 11% erhöht. Es zeigt sich aber, dass der elektrische Wirkungsgrad des ORC-Prozesses mit verzweigtem Kondensatkreis mit 16,8 % niedriger liegt als beim Standardprozess (18%). Der Grund für die Reduktion des Prozess-Wirkungsgrades ist darauf zurückzuführen, dass der

Kondensator eine größere Wärmemenge abführen muss und daher weniger effizient arbeitet. Weiters ist auch die Effizienz des Regenerators vermindert, da dieser von einem Kondensat-Teilstrom beaufschlagt wird, der jedoch auf ein höheres Temperaturniveau aufgewärmt werden muss. Berücksichtigt man beide Teilsysteme, so zeigt sich, dass der elektrische Anlagenwirkungsgrad beim ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis - System1 gegenüber dem Standardprozess von 14,5% auf 15,2% angehoben werden kann, was durch die zusätzlich durch den zweiten Thermoöl-Economiser zugeführte Energiemenge bedingt wird. Die elektrische Nennleistung an der Generatorklemme kann in diesem Beispiel durch die Aufrüstung mit verzweigtem Kondensatkreis (System 1) um rund 4,6% gesteigert werden.

Bei der zweiten in Tabelle 2 dargestellten Variante (System 2) wird vorausgesetzt, dass die dem ORC-Prozess zugeführte Energiemenge gleich hoch wie beim Standardprozess ist („Thermische Leistung gesamt“, laut Tabelle 2). Dies bedeutet, dass die Biomassefeuerung und der Thermoölkessel durch die verbesserte Wärmeübertragung auf den Thermoölkreislauf um rund 11% kleiner gebaut werden kann (Investitionskosteneinsparung). Weiters wurden die Anlagenkomponenten des ORC-Prozesses auf die Rahmenbedingungen der Technologie mit verzweigtem Kondensatkreis hin angepasst, indem größere spezifische Wärmetauscherflächen beim Kondensator und beim Regenerator im Vergleich zum Standardprozess berücksichtigt wurden. Es zeigt sich, dass der elektrische Wirkungsgrad des ORC-Moduls gegenüber der Variante „System 1“ von 16,8% auf 17,3% gesteigert werden kann. Er liegt aber niedriger als beim Standardprozess, was, wie bereits erläutert, durch die reduzierte Effizienz des Regenerators bei dieser Schaltungsvariante bedingt ist. Auch die elektrische Nennleistung liegt dementsprechend etwas niedriger als beim Standardmodul. Der wesentliche Vorteil dieser Schaltungsvariante liegt darin, dass der elektrische Anlagenwirkungsgrad im Vergleich zum Standardprozess deutlicher gesteigert wird (von 14,5% auf 15,6%, siehe Tabelle 2).

Bild 7 stellt das Energieflussdiagramm des ORC-Prozesses mit verzweigtem Kondensatkreis dar. Es zeigt sich, dass die Strahlungs- und Rauchgasverluste nur bei rund 8% liegen unter der Voraussetzung, dass dem zweiten Thermoöl-Economiser ein Luftvorwärmer nachgeschaltet wird.

Der wesentliche Vorteil des ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis liegt darin, dass zusätzliche Energie aus dem Rauchgas dem KWK-Prozess zugeführt wird und folglich der elektrische Anlagenwirkungsgrad gesteigert werden kann. Zu beachten ist jedoch, dass der Thermoölkreislauf durch diese Anlagenverschaltung komplexer wird (zusätzlicher Thermoöl-Economiser erforderlich) und somit die spezifischen Investitionskosten steigen.

Beim ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis nach System 1 sind nur geringe Modifikationen an den Komponenten des ORC-Modules erforderlich (geringe Investitionskostenerhöhung). Die Erhöhung des elektrischen Anlagenwirkungsgrades ist jedoch mit nur rund 4,6% im Vergleich zu einem Standard-ORC-Prozess vergleichsweise gering. Beim ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis nach System 2 wird der elektrische Anlagenwirkungsgrad deutlich erhöht (um rund 8%), jedoch müssen die spezifischen Wärmetauscherflächen des ORC-Modules vergrößert werden, was zu einer stärkeren Erhöhung der Investitionskosten führt.

Eine 1,5 MW_{el} Anlage mit System 2 ist in einem Sägewerk in Bayern im Bau (geplante Inbetriebnahme Winter 2005).

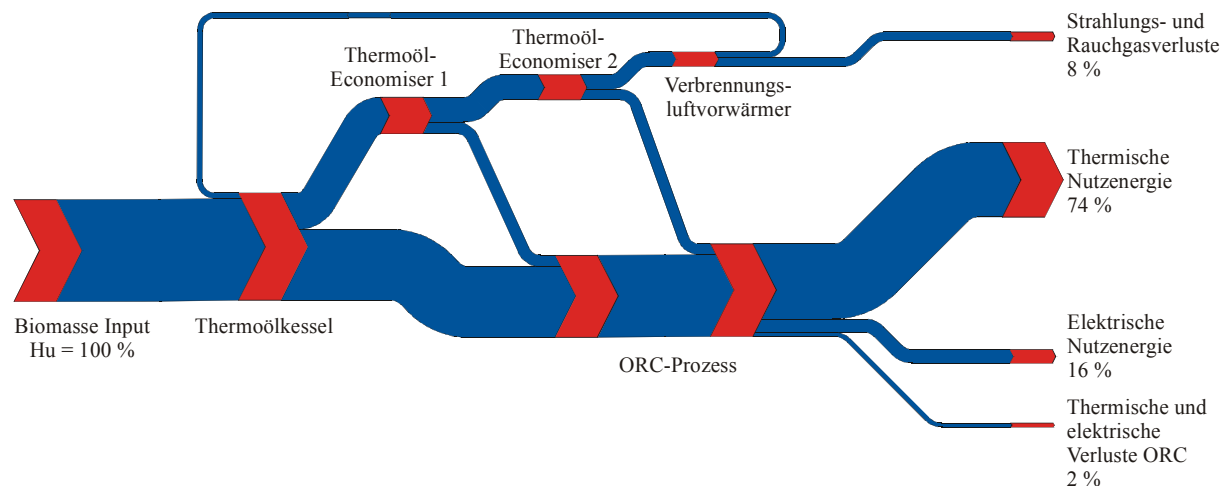


Bild 7: Energieflussdiagramm des ORC-Prozesses mit verzweigtem Kondensatkreis

Erläuterungen: Die Daten beziehen sich auf „System 2“ (siehe Tabelle 2).

Die Entscheidung, welche Variante gewählt werden soll, ist von den spezifischen Rahmenbedingungen (Wärmenutzungspotential, Einspeisetarif, Brennstoffkosten) des jeweiligen Projektes abhängig. Erste Abschätzungen haben ergeben, dass die Realisierung eines ORC-Prozesses mit verzweigtem Kondensatkreis aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten trotz erhöhter Investitionskosten interessant sein kann, wobei jedoch in diesem Zusammenhang eine genaue und projektbezogene Betrachtung erforderlich ist.

3.3 Erhöhung der Thermoöltemperatur

Eine weitere Möglichkeit der Optimierung des Prozesses stellt die Erhöhung der Temperatur des Thermoöles dar. Technisch ist eine Steigerung der Thermoöltemperatur von 300/250 °C auf 320/270 °C sinnvoll, wobei sich, wie bereits erwähnt, der ideale Wirkungsgrad des ORC-Prozesses dann um rund 6% erhöht. Unter Praxisbedingungen ist laut durchgeführten

Berechnungen mit einer tatsächlichen Wirkungsgradsteigerung von rund 3% zu rechnen. Aus diesen Gesichtspunkten erscheint somit die Erhöhung der Thermoöltemperatur grundsätzlich eine interessante Option zu sein. Es sind jedoch einige wesentliche Modifikationen am Anlagenkonzept des ORC-Prozesses erforderlich. Um das höhere Temperaturniveau effizient ausnutzen zu können, ist eine Steigerung des Verdampfungstemperatur und des Arbeitsdruckes des Arbeitmediums erforderlich, wodurch auch das Expansionsverhältnis in der Turbine vergrößert wird. Dies führt dazu, dass die Dimensionierung der Turbine (deren fluiddynamisches Verhalten) wesentlich verändert werden muss, um deren Wirkungsgrad nicht zu reduzieren. Weiters muss die Auslegung der Wärmetauscher modifiziert werden, um diese an die veränderten Temperatur- und Druckverhältnisse anzupassen. In diesem Zusammenhang müssen zukünftig detaillierte Berechnungen und Auslegungen einer auf die höheren Thermoöltemperaturen angepassten ORC-Anlage zeigen, ob sich diese Modifikation des Prozesses wirtschaftlich rechnet.

Eine interessante Option ist die Erhöhung der Thermoöltemperatur jedoch für Anlagen, die mit einem höheren Temperaturniveau im Kühlerkreislauf betrieben werden. In diesem Fall ist das Expansionsverhältnis in der Turbine vergleichbar mit dem eines Standardprozesses und es kann eine herkömmliche Turbine eingesetzt werden. Folglich kann der Wirkungsgrad des ORC-Prozesses ohne wesentliche Erhöhung der Kosten gesteigert werden. Diese Möglichkeit wird bei vier derzeit in Bau befindlichen Anlagen in der österreichischen Holzindustrie genutzt (Inbetriebnahme bis Juni 2006).

In jedem Fall ist jedoch bei der Wahl eines geeigneten Thermoöles zu berücksichtigen, dass dessen thermische Stabilität mit steigender Temperatur deutlich sinkt. In diesem Zusammenhang ist bei Erhöhung der Arbeitstemperatur um 10 °C mit einer Halbierung der Lebensdauer zu rechnen. Das Thermoöl sollte auf jeden Fall so gewählt werden, dass eine Lebensdauer von 10 Jahren erreicht werden kann. Die Berechnung der Lebensdauer des Thermoöles kann laut Gleichung 2 erfolgen. Eine niedrigere Lebensdauer des Thermoöles bedingt eine Erhöhung der Betriebskosten.

$$z = e^{f_{zo} \cdot (T - T_0)} \quad [a] \quad \text{Gleichung 2}$$

Erläuterungen: z .. Lebensdauer bei der Temperatur T; f_{zo} ... Materialkonstante [1/K] (liegt für Thermoöl bei ca. 0,07); T_0 ... Bezugstemperatur bei der die Lebensdauer ein Jahr beträgt [K], Quelle [7].

Durch Erhöhung der Thermoöltemperatur auf 320 °C und gleichzeitiger Erhöhung der Spreizung im Thermoölkreislauf (die Thermoöl-Rücklaufumtemperatur wird nicht erhöht und bleibt bei 250 °C) wird der ideale Wirkungsgrad um rund 3% gesteigert, wobei im Realfall mit

einer Verbesserung des elektrischen Anlagenwirkungsgrades zwischen 1,5 und 2% zu rechnen ist. Diese Option kann ebenfalls interessant sein, da dadurch die Betriebskosten (Stromverbrauch der Thermoölpumpen) reduziert werden können. Der Thermoölkessel muss aber in diesem Fall auf die höhere Spreizung ausgelegt werden.

4. Innovative Prozessintegration – Einbindung in einen Wirbelschicht-Dampfvergasungsprozess

Neue Anwendungsgebiete des ORC-Prozesses ergeben sich durch innovative Einbindung in KWK-Prozesse, die auf anderen Technologien basieren. Das Ziel ist dabei die im Prozess anfallende Abwärme effizient zu nutzen und dadurch den elektrischen Anlagenwirkungsgrad zu erhöhen. In diesem Zusammenhang wurde bereits ein detailliertes Anlagenkonzept der Integration eines ORC-Prozesses in eine Wirbelschicht-Dampfvergasungsanlage auf Biomassebasis mit nachgeschalteten Gasmotoren erstellt. Eine auf diesem Konzept basierende Anlage befindet sich derzeit in der Planungsphase und ist schematisch in Bild 8 dargestellt. In Tabelle 3 sind die technischen Eckdaten des Prozesses erläutert.

Als Vergasungstechnologie wird die allotherme Dampfvergasung eingesetzt, die am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften der TU Wien gemeinsam mit der Firma REPOTEC Umwelttechnik GmbH entwickelt wurde [8]. Der Wirbelschicht-Dampfvergaser besteht aus zwei miteinander verbundenen Wirbelschichtsystemen. Im Vergasungsteil wird die Biomasse bei ca. 900°C unter Zufuhr von Dampf vergast. Ein Teil der anfallenden Holzkohle wird über das umlaufende Bettmaterial (Sand), das als Wärmeträger fungiert, in den Verbrennungsteil transportiert und dort bei höheren Temperaturen als im Vergasungsteil verbrannt. Die dabei an das Bettmaterial abgeführte Wärme wird in den Vergasungsteil geleitet, wo sie zur Aufrechterhaltung der Vergasungsreaktionen dient. Das Rauchgas aus dem Verbrennungsteil wird getrennt abgeleitet.

Das aus dem Vergaser austretende Produktgas wird im nachgeschalteten Produktgaskühler gekühlt. Die Entstaubung des Gases erfolgt in einem Pre-Coat-Gewebefilter. Der abgeschiedene Staub wird wegen seines Gehaltes an brennbaren Substanzen in die Brennkammer des Gaserzeugers rückgeführt. Im nachgeschalteten Gaswäscher wird das Produktgas weiter auf die für die Gasmotoren zulässigen Temperaturen von 50 °C abgekühlt und die Konzentrationen an Teer, Ammoniak und sauren Gasbestandteilen reduziert. Als Waschmedium wird ein organisches Lösungsmittel eingesetzt. Die zwei Gasmotoren, die mit dem aus der Vergasungsanlage stammenden Produktgas betrieben werden, weisen eine elektrische Nennleistung von rund 2.400 kW (2 x 1.200 kW) auf.

Der Rauchgaskühler, der Produktgaskühler und die Abgaskühler der zwei Gasmotoren sind mit einem Thermoölkreislauf verbunden, der die nutzbare Wärme an den ORC-Prozess überträgt. Das ORC-Modul wird mit einer thermischen Inputleistung von rund 2.800 kW gespeist und weist eine elektrische Nennleistung von 480 kW auf. Der ORC-Prozess wird bei diesem Anlagenkonzept auf einem niedrigeren Temperaturniveau (300/160 °C) betrieben als bei herkömmlichen Biomasse-KWK-Anlagen auf ORC-Basis (meist 300/250 °C), was den elektrischen Wirkungsgrad des ORC-Prozesses verringert. Da jedoch das Temperaturniveau des Kühlkreislaufes (50/70 °C) bei dieser Anlagenkonzeption vergleichsweise niedriger liegt, wird trotz der ungünstigen Rahmenbedingungen ein elektrischer Brutto-Wirkungsgrad von rund 17% erreicht (siehe Tabelle 3). Das aus dem ORC-Prozess austretende Kühlwasser wird durch die Kühler der Gasmotoren von 70 auf 85 °C erhitzt (und so auf die erforderliche Fernwärme-Vorlauftemperatur gebracht). Durch die Einbindung des ORC-Prozesses wird der elektrische Brutto-Anlagenwirkungsgrad um 5,8%, von 28,5% auf 34,3% gesteigert, was eine deutliche Anhebung der produzierten Strommenge bedingt und auch die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage verbessert (siehe Bild 9).

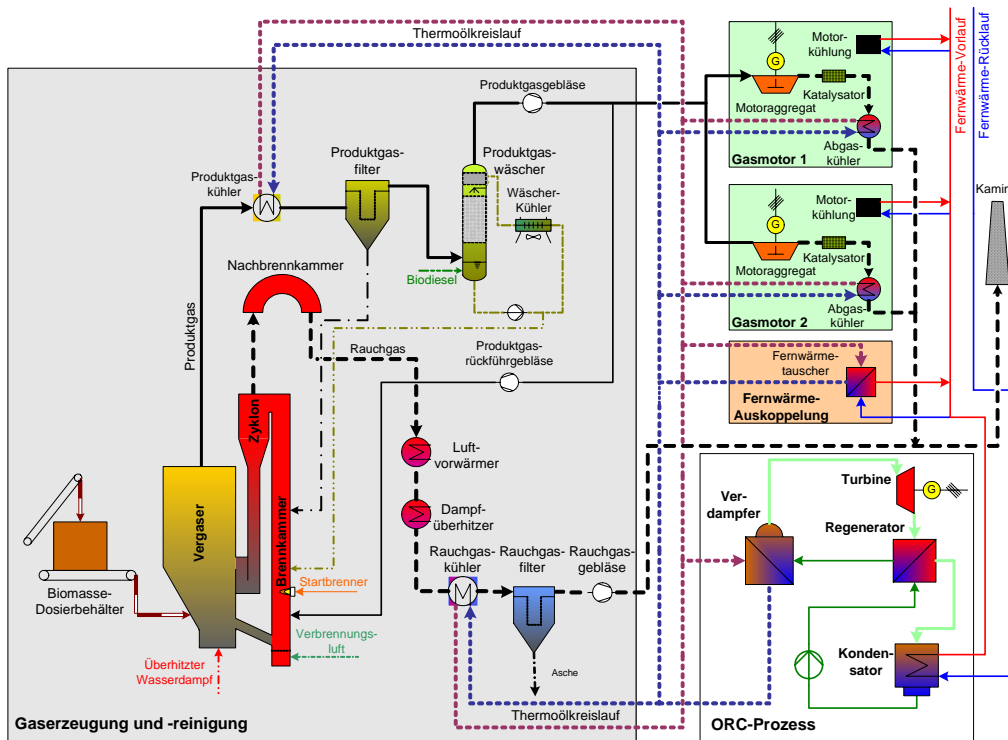


Bild 8: Schematische und vereinfachte Darstellung einer Wirbelschicht-Dampfvergasungsanlage auf Biomassebasis mit nachgeschalteten Gasmotoren und integriertem ORC-Prozess

Erläuterungen: Quellen REPOTEC Umwelttechnik GmbH, Wien und BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz.

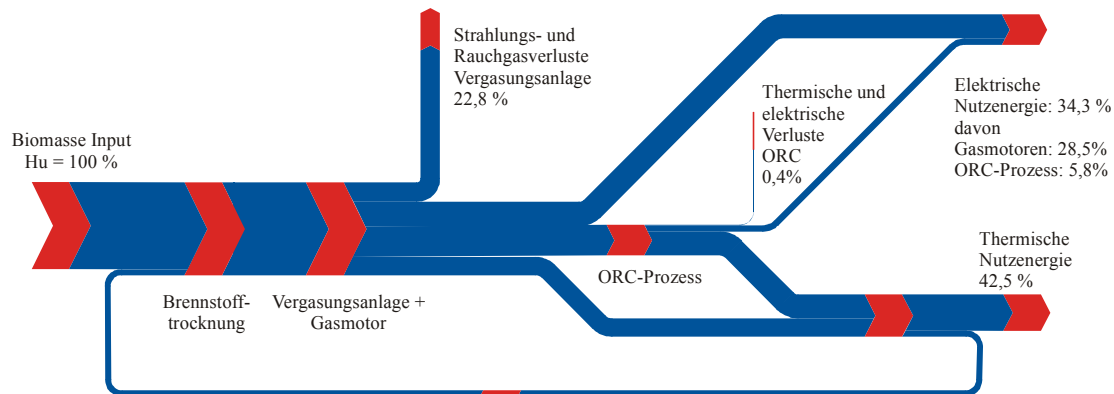


Bild 9: Energieflussdiagramm einer Wirbelschicht-Dampfvergasungsanlage auf Biomassebasis mit nachgeschalteten Gasmotoren und integriertem ORC-Prozess

Erläuterungen: Technische Daten siehe Tabelle 3.

Technische Daten Gesamtanlage			Technische Daten Gasmotoren		
Brennstoffart		Hackgut	elektrische Leistung brutto je Motor	kW	1.188
Wassergehalt Biomasse vor Trocknung	Gew%	30	Technische Daten ORC-Anlage		
Wassergehalt Biomasse nach Trocknung	Gew%	20	elektrische Leistung brutto	kW	480
Brennstoffwärmeleistung	kW	8.320	Thermische Inputleistung (thermoölseitig)	kW	2.840
Gesamtanlage ohne ORC-Prozess			Thermoöl-Eintrittstemperatur	°C	300
elektrische Leistung brutto	kW	2.375	Thermoöl-Austrittstemperatur	°C	160
thermische Nutzleistung	kW	4.015	Thermische Outputleistung (wasserseitig)	kW	2.330
elektrischer Anlagenwirkungsgrad brutto	%	28,5	Wasser-Eintrittstemperatur	°C	50
Gesamtanlagenwirkungsgrad	%	76,8	Wasser-Austrittstemperatur	°C	70
Gesamtanlage mit ORC-Prozess			elektrischer Wirkungsgrad brutto	%	16,9
elektrische Leistung brutto	kW	2.855			
thermische Nutzleistung	kW	3.535			
elektrischer Anlagenwirkungsgrad brutto	%	34,3			
Gesamtanlagenwirkungsgrad	%	76,8			

Tabelle 3: Technische Daten einer Wirbelschicht-Dampfvergasungsanlage auf Biomassebasis mit nachgeschalteten Gasmotoren und integriertem ORC-Prozess

Erläuterungen: Prozessverschaltung siehe Bild 8.

5. Schlussfolgerungen und Ausblicke

Der ORC-Prozess und seine Anbindung an die Biomasseverbrennungstechnologie stellt eine dem Stand der Technik entsprechende Technologie dar, die bereits mehrfach erfolgreich realisiert wurde. In den letzten Jahren wurde diese Technologie weiter optimiert, wobei vor allem durch innovative Anlagenkomponenten, wie dem Thermoöl-Economiser und dem Luftvorwärmer, der elektrische Anlagenwirkungsgrad um rund 12% gesteigert werden konnte. Dieses optimierte Anlagenkonzept wurde in Lienz (A) erstmals realisiert.

Auch am ORC-Prozess selbst sind noch Optimierungen möglich. In diesem Zusammenhang stellt der ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis eine interessante Möglichkeit dar, den elektrischen Anlagenwirkungsgrad noch weiter zu erhöhen. Das Potential liegt diesbezüglich zwischen 4 % (gleiche spezifische Wärmetauscherfläche) und 8% (erhöhte

spezifische Wärmetauscherfläche). Um den elektrischen Anlagenwirkungsgrad zu optimieren, sollte der ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreis idealerweise mit optimierten Wärmetauschern ausgeführt werden.

Auch durch Erhöhung der Temperatur des Thermoöles kann der elektrische Anlagenwirkungsgrad gesteigert werden, wobei in einem technisch vernünftigen Rahmen ein Steigerungspotential von rund 3% realisierbar scheint. Diesbezüglich ist aber die deutliche Reduktion der Lebensdauer des Thermoöles bei steigenden Temperaturen zu beachten. Die Erhöhung der Temperatur des Thermoöles stellt insbesondere dann eine interessante und kosteneffiziente Option dar, wenn hohe Temperaturen im Kühlkreislauf erforderlich sind.

Optimierungsmaßnahmen können auch kombiniert werden, sodass zukünftig elektrische Gesamtanlagenwirkungsgrade von Biomasse-KWK-Anlagen auf ORC-Basis von rund 16,5% möglich scheinen (Steigerung um rund 10% zum derzeitigen Stand der Technik). Wichtig ist es aber die einzelnen Optimierungsoptionen immer unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen eines konkreten Projektes technisch wie wirtschaftlich zu prüfen, da unterschiedliche Rahmenbedingungen (wie z.B. Stromeinspeisetarif, Wassergehalt und Kosten des Brennstoffes, erforderliche Vorlauftemperatur der Fern- bzw. Prozesswärmeschiene) zu unterschiedlichen optimierten Lösungen führen können.

Des Weiteren erscheinen innovative Kopplungen von KWK-Technologien, wie z.B. die der Biomasse-Wirbelschicht-Dampfvergasung mit nachgeschalteten Gasmotoren mit ORC-Prozessen energetisch und wirtschaftlich sinnvoll. Bei dieser, aufgrund ihrer Komplexität, für größere Biomasse-KWK-Anlagen interessanten Anlagentechnologie ($>2,5 \text{ MW}_{el}$), kann durch Integration eines ORC-Prozesses eine Steigerung des elektrischen Anlagenwirkungsgrades um rund 20% erreicht werden.

Literatur

- [1] Angelino, G., Gaia, M., Macchi, E.: A review of Italian Activity in the Field of Organic Rankine Cycles. In: Proc. of the ORC-HP Technology Seminar, Zürich, VDI-Verlag (ed.), Düsseldorf, Germany, 1984
- [2] Bini, R.; Gaia, M.; Girardi, P.; Sabatelli, F.: Performance of the Castelnuovo Valdicecina (Italy) 1-1.5 Megawatt ORC and discussion of applications for binary modular units. In: Proceedings of the international symposium „Géothermie 94 en Europe“ 8-9 February 1994, Orleans, France, 1996
- [3] Obernberger, I.: Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf ORC-Basis – Vorstellung der EU-Demonstrationsprojekte Holzindustrie STIA/Admont und Fernheizkraftwerk Lienz in Österreich. In: Tagungsband zum 12. Symposium „Energie aus Biomasse – Biogas,

Flüssigkraftstoffe, Festbrennstoffe“, Kloster Banz, Deutschland, ISBN 3-934681-28-X, pp. 204-210, Ostbayerrisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) (Hrsg.), Regensburg, Deutschland, 2003

- [4] Obernberger I., Thonhofer P., Reisenhofer E.: Fuzzy Logic Controlled CHP Plant for Biomass Fuels Based on a Highly Efficient ORC Process“. Final report, EU project No. NNE5/2000/475, European Commission DG Research (ed), Brussels, Belgium, 2003
- [5] Thonhofer, P., Reisenhofer. E., Obernberger, I., Gaia, M.: Demonstration of an innovative biomass CHP plant based on a 1,000 kW_{el} Organic Rankine Cycle – EU demonstration project Lienz (A). In: Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Mai 2004, Rome, Italy, Volume II, ISBN 88-89407-04-2, pp.1839-1842, ETA-Florence (Ed.), Italy, 2004
- [6] Bini, R., Duvia, A., Schwarz, A., Gaia, M., Bertuzzi, P., Righini, W.: Operational results of the first biomass CHP plant in Italy based on an organic Rankine cycle turbogenerator and overview of a number of plants in operation in Europe since 1998. in: Proceedings of the 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Mai 2004, Rome, Italy, Volume II, ISBN 88-89407-04-2, pp. 1716-1721, ETA-Florence (Ed.), Italy, 2004
- [7] Wagner, W.: Korus-Handbuch: Wärmeträgertechnik mit organischen Flüssigkeiten. Verlag Dr. Ingo Resch GmbH, Gräfelingen, Deutschland, ISBN 3-930039-16-8, 1994.
- [8] Rauch R, Hofbauer H.: Dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung auf Basis Biomasse-Vergasung. In: Tagungsband zum 14. DVV Kolloquium, 18.-20.11.2004, Wien, Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. (ed.), Essen, Deutschland, 2004