

Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungen auf Basis des ORC-Prozesses - EU-THERMIE-Projekt Admont (A)

Univ.-Doz.Dipl.-Ing.Dr. Ingwald Obernberger, Graz/A,
Dipl.-Ing. Alfred Hammerschmid, Graz/A, Dr. Roberto Bini, Brescia/I

Zusammenfassung

Der ORC (Organic Rankine Cycle)-Prozess stellt für dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit elektrischen Nennleistungen kleiner gleich $1,0 \text{ MW}_{\text{el}}$ eine sehr interessante Technologie dar. Im Rahmen eines europäischen Demonstrationsprojektes wurde eine dafür speziell entwickelte ORC-Technologie erstmals innerhalb der EU in einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage eingesetzt. In der Holzindustrie STIA / Admont ist diese neue ORC-Entwicklung (elektrische Nennleistung 400 kW) seit Oktober 1999 erfolgreich in Betrieb und hat im ersten Betriebsjahr bereits mehr 4.500 Jahresvollaststunden erreicht. Die speziellen Vorteile der ORC-Technologie liegen in Ihrer Robustheit (hohe Lebensdauer, geringe Instandhaltungskosten), in der vollautomatischen und unbemannten Betriebsweise (Personalbedarf nur 3-5 h pro Woche), in Ihrem ausgezeichneten Teillastverhalten und in dem für dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen relativ hohen elektrischen Wirkungsgrad von rund 17%. Durchgeführte wirtschaftliche Bewertungen zeigen, dass die spezifischen Stromgestehungskosten von Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf ORC-Basis zwischen 0,05 und 0,12 €/kWh_{el} liegen (je nach Rahmenbedingungen und Anlagengröße). Diese Stromgestehungskosten ermöglichen unter Berücksichtigung der speziellen Förderungsprogramme vieler europäischer Staaten zur Forcierung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb derartiger Anlagen. Das größte Einsatzpotential für Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf ORC-Basis liegt in mittelgroßen holzbe- und holzverarbeitenden Betrieben, in dezentralen Altholzfeuerungen sowie in Biomassefernheizwerken (Neubau oder Umrüstung bestehender Anlagen).

Abstract

The ORC (Organic Rankine Cycle) process represents a highly interesting technology for decentralised biomass CHP plants with nominal electric capacities up to 1.0 MW. A new and especially for biomass CHP systems developed ORC technology was realised within an European demonstration project for the first time in the wood manufacturing company STIA in Admont (Austria). This plant with a nominal electric capacity of 400 kW is in operation since October 1999 and has achieved 4,500 full load operating hours already in its first year of

performance. The special advantages of the ORC technology are its robustness (high life-time, low maintenance costs), its fully automatic and unmanned operation (only 3 to 5 man-hours per week are needed), its excellent partial load behaviour and its comparably high electric efficiency (regarding small-scale CHP systems) of about 17%. Economic evaluations based on the already gained experiences and data from the demonstration project show that biomass CHP plants based on an ORC cycle achieve specific electricity production costs between 0.05 and 0.12 EURO/kWh_{el} in dependence of the specific side constraints and of the plant size given. These specific electricity products costs make an economically meaningful application of this technology possible in all countries which have initiated special funding programmes for the enhanced production of electricity from renewable energy sources (like Austria, Germany, Switzerland, Italy and Denmark). The greatest application potential of biomass CHP plants based on an ORC cycle represent medium-sized wood manufacturing industries and sawmills, decentralised waste wood combustion plants and biomass district heating plants (newly erected or retrofitted systems).

Einleitung

Bei der Holzindustrie STIA GmbH in Admont wurde im Zeitraum 1998/1999 eine neue und innovative Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK) auf Basis eines Organic Rankine Cycle (ORC)-Prozesses realisiert. Mit dieser Anlage wird Strom und Wärme aus erneuerbarer Energie (Hackschnitzel, Späne, Rinde) erzeugt, wodurch ein wesentlicher Schritt in Richtung nachhaltige Energiepolitik und CO₂-Emissionsreduktion gesetzt werden konnte.

Dieses Projekt erhielt aufgrund seiner technischen Neuheit und aufgrund der Tatsache, dass es sich dabei um die erste großtechnische Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis eines ORC-Prozesses in der Europäischen Union handelt, von der Europäischen Kommission im Rahmen des THERMIE Programms (Projekt „Biomass fired CHP plant based on an ORC cycle“ - BM/120/98/AT/IT) sowie von der Österreichischen Kommunalkredit im Rahmen des betrieblichen Umweltförderungsprogrammes finanzielle Unterstützung.

Die Gesamtanlage besteht aus 2 Biomassefeuerungen, einer Unterschubfeuerung mit nachgeschaltetem Thermoölkessel (Kesselnennleistung 3,2 MW) und einer Vorschubrostfeuerung mit nachgeschaltetem Heißwasserkessel (Kesselnennleistung 4,0 MW). Den Feuerungen sind Multizyklone zur Vorentstaubung sowie eine Rauchgaskondensationsanlage zur Wärmerückgewinnung, Feinentstaubung und Entschwadung des Rauchgases nachgeschaltet. Zur Spitzenlastabdeckung stehen zwei alte Ölkessel zur Verfügung. Die Feuerungs- und Kesselanlagen sowie die Multizyklone und die Rauchgaskondensationsanlage wurden von der Fa. Kohlbach GesmbH&Co, Wolfsberg (Österreich), geliefert. Der Lieferant der ORC-Anlage mit einer elektrischen Nennleistung von 400 kW ist die Fa. Turboden aus Brescia (Italien). Für die Planung, Bauüberwachung, Inbetriebnahme und das Monitoring der Kraft-

Wärme-Kopplungsanlage über ein Betriebsjahr ist das Ingenieurbüro BIOS aus Graz verantwortlich. Errichter und Betreiber der Gesamtanlage ist die Holzindustrie STIA GmbH in Admont (Österreich).

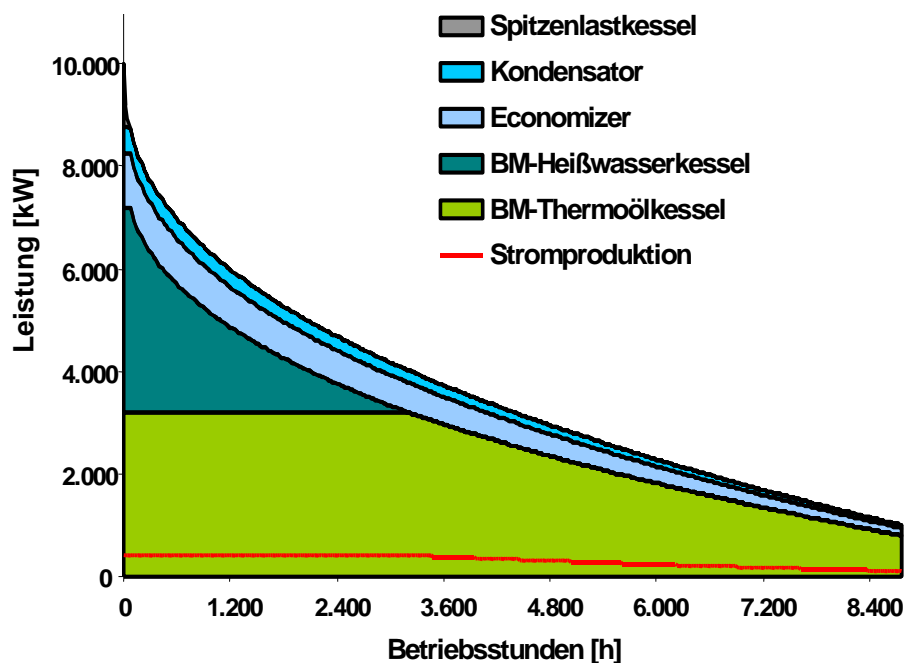


Abbildung 1: Darstellung der Jahresdauerlinie der erforderlichen Wärmeleistungen sowie der produzierten elektrischen Leistung ab Heizkraftwerk im Endausbau

Als Brennstoff werden Sägespäne, Hackschnitzel und Rinde verwendet, welche zum Großteil aus der eigenen Produktion der Holzindustrie stammen. Die anfallende Wärme wird zum Teil als Prozesswärme (Heißpressen und Holz Trocknung) und zum Teil als Fernwärme (Versorgung des Stiftes sowie des Ortes Admont) verwendet. Insgesamt beträgt der Wärmebedarf im Endausbau, der 2002 erreicht sein wird, rund 33.000 MWh/a. In Abbildung 1 ist die Jahresdauerlinie der Wärme- und Stromproduktion der Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung dargestellt. Die ORC-Anlage ist an den Thermoölkessel angeschlossen, wobei nur ein Teil der Thermoölkesselwärmeleistung dem ORC-Prozess zugeführt wird (2,2 MW), die restlichen 1,0 MW werden direkt für den Antrieb von Heißpressen verwendet.

Die Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf Basis des ORC-Prozesses ist seit Oktober 1999 in kontinuierlichem Betrieb. Sie wird wärmegeführt betrieben und ist so dimensioniert, dass der ORC-Prozess bei Vollausbau der Wärmeversorgung rund 6.800 Jahresvolllaststunden erreichen wird, was einer Netto-Stromproduktion von rund 2.700.000 kWh/a entspricht. Der erzeugte Strom wird zur Eigenstrombedarfsdeckung der Holzindustrie STIA / Admont verwendet bzw. bei Überschusserzeugung in das Netz des lokalen Energieversorgungsunternehmens eingespeist.

Die ORC-Technologie eignet sich aufgrund Ihrer Automatisierbarkeit und Ihrer geringen Wartungsintensität besonders für dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit elektrischen Nennleistungen zwischen 300 und 1.000 kW.

Beschreibung der ORC-Technologie

Die ORC-Technologie resultiert aus einer langjährigen Entwicklung, mit dem Ziel Solarenergie, geothermische Energie sowie Energie aus Biomasse dezentral und sinnvoll zu nutzen [10,11]. Der ORC-Prozess („Organic Rankine Cycle“) basiert auf einem dem Wasser-Dampf-Prozess ähnlichem Verfahren 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 [1, 2].

Arbeitsprinzip und Einbindung in das Biomasse-Heizkraftwerk

In Abbildung 2 ist der ORC-Prozess schematisch dargestellt. Die von der Biomassefeuerung erzeugte Wärme wird über einen Thermoölkessel an den ORC-Prozess übertragen. Thermoöl wird als Wärmeträgermedium verwendet, da dadurch die für den Betrieb des ORC-Prozesses erforderlichen Temperaturen (Thermoöl-Vorlauftemperatur 300°C) erreicht werden können und gleichzeitig ein praktisch druckloser Kesselbetrieb (es ist kein Dampfkesselwärter erforderlich) möglich ist. Durch die vom Thermoöl an den ORC-Prozess übertragene Wärme wird das eingesetzte organische Arbeitsmedium verdampft. Der Dampf gelangt zu einer langsam laufenden Axialturbine, in der er unter Entspannung ins Vakuum mechanische Arbeit leistet, die im direkt an die Turbine gekoppelten Generator (kein Zwischengetriebe erforderlich) elektrische Energie erzeugt. Der entspannte Dampf wird einem Regenerator zur internen Wärmerückgewinnung zugeführt, der den elektrischen Wirkungsgrad erhöht. Anschließend gelangt der Arbeitsmitteldampf in den Kondensator. Die von dort abgeführte Wärme kann als Prozess- bzw. Fernwärme genutzt werden. Über eine Pumpe wird das Kondensat schließlich wieder auf Betriebsdruck gebracht und dem Verdampfer zugeführt. Damit ist der ORC-Kreislauf geschlossen.

Das aus der Biomassefeuerung austretende Rauchgas wird in einem Multizyklon vorentstaubt und dann einer Rauchgaskondensationsanlage zugeführt, in der ein Großteil der noch im Rauchgas enthaltenen fühlbaren und latenten Wärme rückgewonnen wird, die ebenfalls als Fern- und Prozesswärme genutzt werden kann. Von dort gelangt es schließlich in den Kamin.

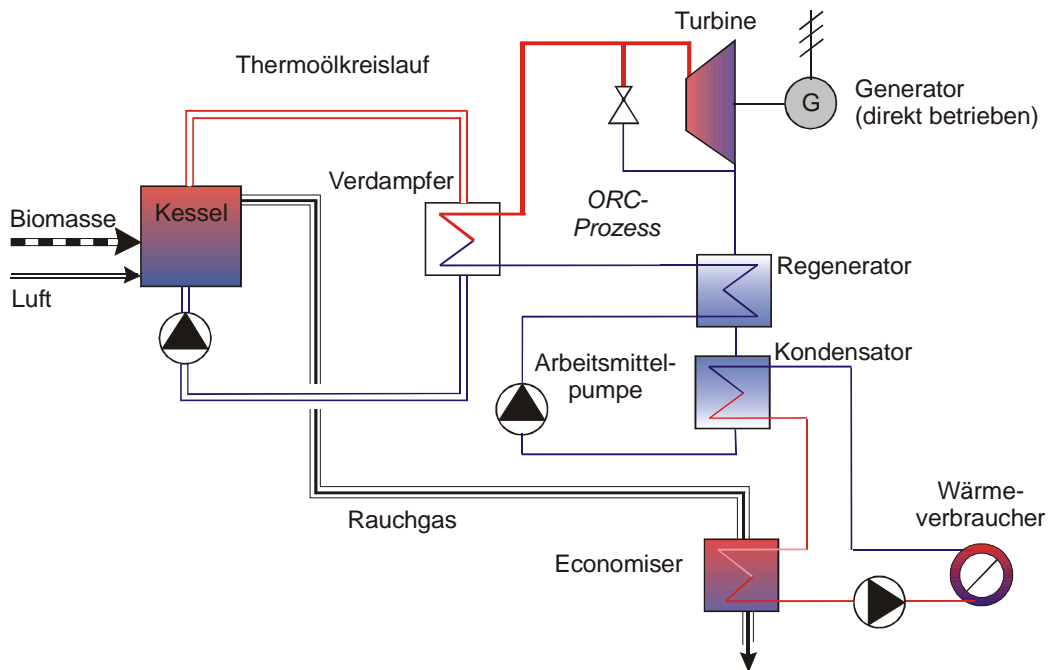


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Biomasse-KWK mit ORC-Prozess
Erläuterungen: Datenquelle: [3]

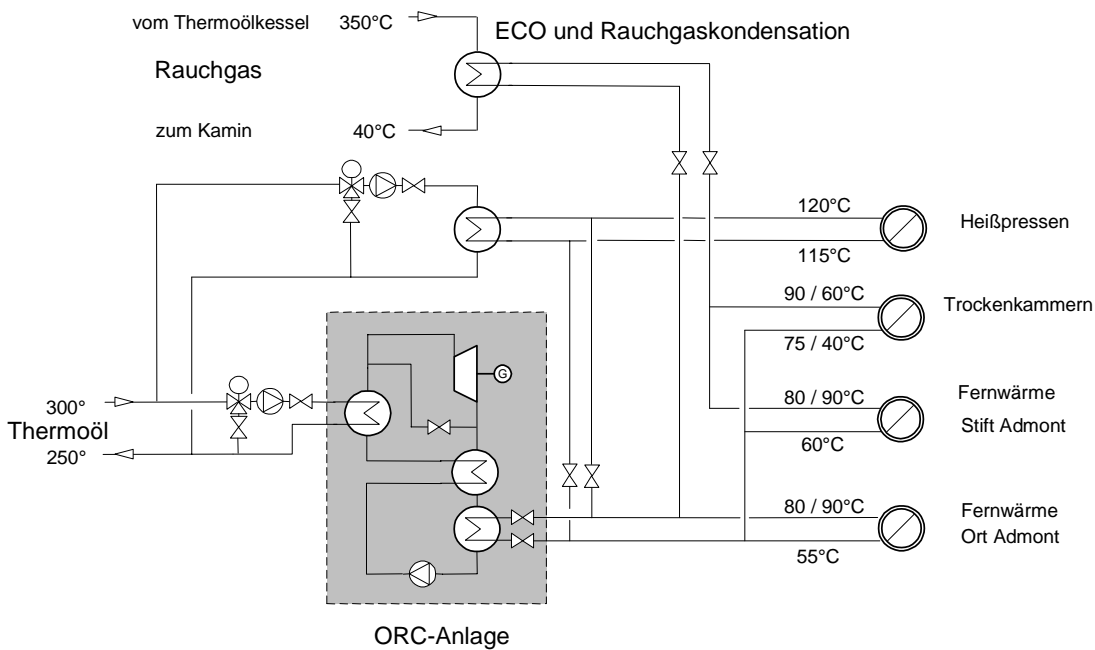


Abbildung 3: Einbindung des ORC-Prozesses in das Biomasse-Heizkraftwerk der Holzindustrie STIA/Admont

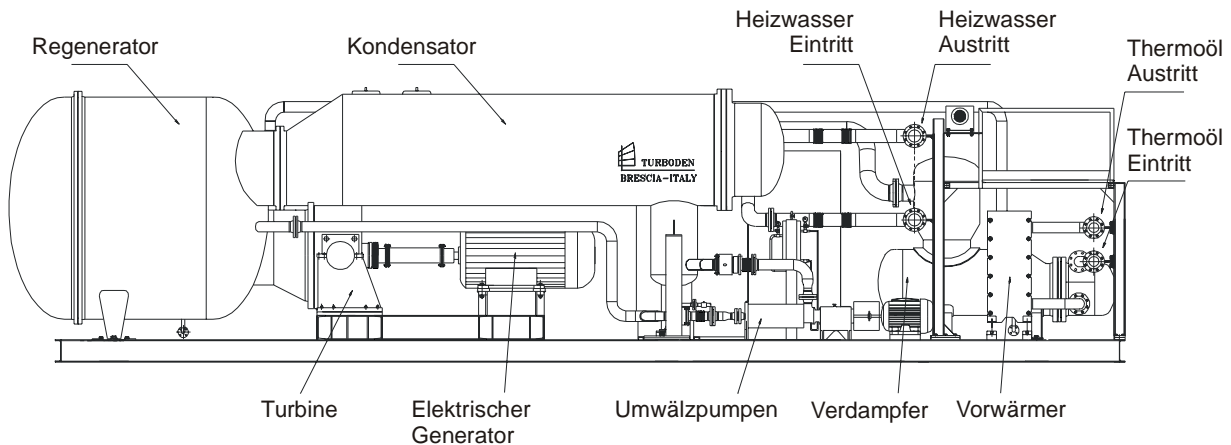


Abbildung 4: Schematische Darstellung des ORC-Moduls - Biomasse-Heizkraftwerk der Holzindustrie STIA/Admont

Erläuterungen: Datenquelle: [4, 5]; siehe auch Abbildung 5



Abbildung 5: Bild der auf einem Containerrahmen vormontierten ORC-Anlage beim Antransport

Erläuterungen: Datenquelle [6]; links vorne: Verdampfer; rechts vorne: Regenerator; Mitte unten: Turbine und Generator; Mitte hinten: Kondensator.

Die Verschaltung des ORC-Prozesses im Biomasse-Heizkraftwerk der Holzindustrie STIA/Admont ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Der ORC-Prozess ist so ausgelegt, dass Heißwasser-Vorlauftemperaturen zwischen 80 und 100°C sowie Spreizungen zwischen 10 und 30°C variabel gefahren werden können. Die Rücklauftemperaturen liegen dabei zwischen 55 und 70°C. Dadurch kann das erforderliche Vorlauftemperaturniveau des Heißwasserkreislaufes an die Erfordernisse der einzelnen Wärme- bzw. Kälteabnehmer optimal angepasst wer-

den. Hydraulisch sollte dabei der ORC-Prozess immer dem Rauchgas-Economiser vorgeschaltet sein, damit die Heißwasser-Austrittstemperatur aus dem ORC-Prozess so niedrig wie möglich gehalten werden kann. Je niedriger die erforderliche Heißwasser-Vorlauftemperatur am Austritt aus dem ORC-Kondensator, desto höher der elektrische Wirkungsgrad.

Ein Schema des gesamten ORC-Moduls in Containerbauweise mit allen wesentlichen Komponenten ist in Abbildung 4 dargestellt. Abbildung 5 zeigt das vormontierte ORC-Modul bei der Anlieferung.

Wirkungsgrade und technische Daten des ORC-Prozesses

Die Einbindung des ORC-Prozesses in die Gesamtanlage erfolgte unter dem Gesichtspunkt einer möglichst hohen Stromproduktion bei gleichzeitiger Sicherstellung der erforderlichen Heißwasser-Vorlauftemperaturen der Wärmeabnehmer.

Die durch die Wärmeabnehmer und die gewählte Anlagenverschaltung vorgegebenen Heißwasser-Temperaturen am ORC-Kondensator im Nennauslegungsfall (Vorlauf 80°C; Rücklauf 60°C) ermöglichen einen elektrischen Wirkungsgrades von 17,7%. In Abbildung 6 ist das Energieflussbild der ORC-Anlage bei Nennlast dargestellt.

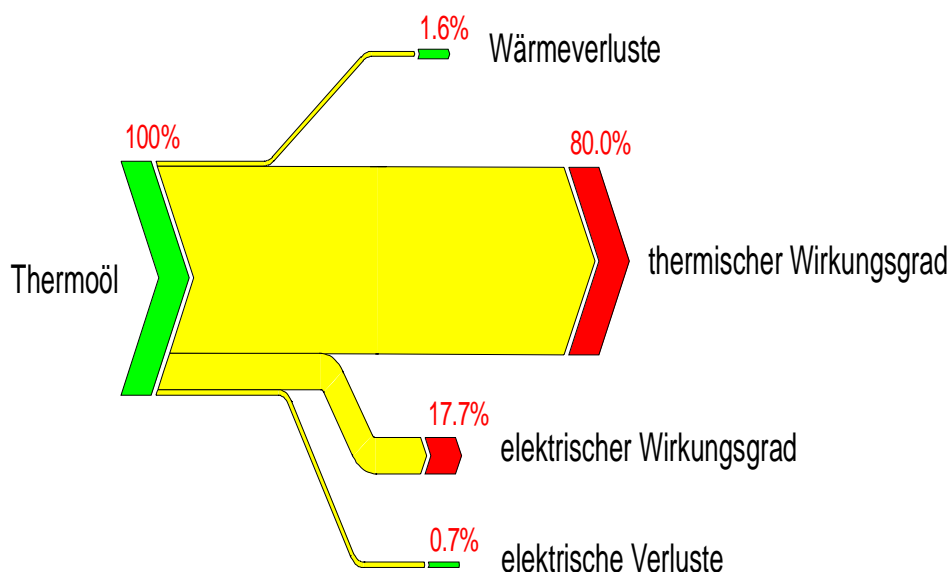


Abbildung 6: Energieflussbild des ORC-Prozesses bei Nennlast – Biomasse-Heizkraftwerk Holzindustrie STIA / Admont

Erläuterungen: Datenquelle [5, 7]

Da dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen normalerweise aus wirtschaftlichen wie energetischen Gründen wärmegeführt betrieben werden sollten, kommt dem Teillastverhalten und dem Teillastwirkungsgrad des ORC-Prozesses große Bedeutung zu. Dieser ist aufgrund der eingesetzten langsam laufenden Axialturbine und aufgrund der thermodynamischen

schen Eigenschaften des eingesetzten organischen Arbeitsmittels als ausgezeichnet zu beurteilen. Bei 40% der Nennleistung beträgt der elektrische Wirkungsgrad noch immer 85% des Volllastwirkungsgrades, was durch Messdaten an der Anlage Admont bestätigt wurde (siehe Abbildung 7). Dieser Umstand stellt einen wesentlichen Vorteil im Vergleich zu Dampfturbinen und auch Dampfmaschinen dar, bei denen ein stärkerer Wirkungsgradabfall im Teillastbetrieb auftritt.

In Tabelle 1 sind die wesentlichen technischen Daten des ORC-Prozesses zusammengestellt.

Thermische Leistung Input (Thermoöl)	2.250 kW
Heizmedium	Thermoöl
Eintrittstemperatur (Nennbetriebspunkt)	300°C
Austrittstemperatur (Nennbetriebspunkt)	250°C
Arbeitsmittel	Silikonöl
Thermische Leistung Output (Kondensator)	ca. 1.800 kW
Kühlmedium	Wasser
Eintrittstemperatur (Nennbetriebspunkt)	60°C
Austrittstemperatur (Nennbetriebspunkt)	80°C
Elektrische Nettoleistung bei Nennlast	ca. 400 kW
Elektrischer Wirkungsgrad bei Nennlast	ca. 17,7%

Tabelle 1: Technische Daten des ORC-Prozesses – Biomasse-Heizkraftwerk Holzindustrie STIA / Admont

Die Axialturbine, die im ORC-Prozess eingesetzt wird (siehe Abbildung 8), arbeitet mit einer geringen Umlaufgeschwindigkeit und Drehzahl und daher geringer mechanischer Beanspruchung. Sie ermöglicht dadurch auch einen direkten Antrieb des Generators ohne Zwischengetriebe, wodurch der elektrische Wirkungsgrad erhöht wird. Durch das im Vergleich zu Wasser-Dampf-Prozessen geringere spezifische Enthalpiegefälle beim Entspannen ist eine einfache und zuverlässige Turbinenkonstruktion möglich. Die genannten Faktoren führen zu einer hohen Turbinenlebensdauer sowie einer hohen Verfügbarkeit der Anlage.

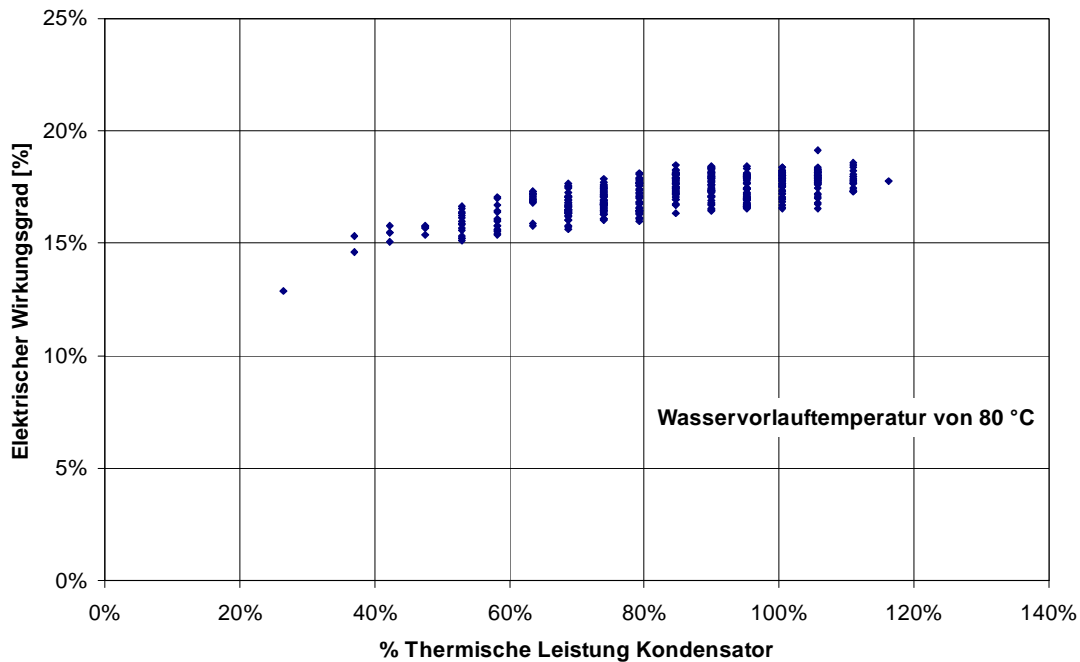


Abbildung 7: Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades der ORC-Anlage in der Holzindustrie STIA / Admont in Abhängigkeit der Anlagenauslastung laut aufgezeichneten Messdaten

Erläuterungen: Datenquelle: [9]; elektrischer Wirkungsgrad = elektrische Nettoleistung / zugeführter thermischer Leistung durch das Thermoöl; die Anlagenauslastung ist prozentuell dargestellt und auf die thermische Kondensatorleistung des ORC-Prozesses bezogen; der Schwankungsbereich des elektrischen Wirkungsgrades bei einer bestimmten Wasservorlauftemperatur ergibt sich aus unterschiedlichen Thermoölvorlauftemperaturen



Abbildung 8: Bild der Axialturbine - Biomasse-Heizkraftwerk Holzindustrie STIA / Admont
Erläuterungen: Datenquelle [6]

Sicherheitstechnische Aspekte, Regelung, Personalbedarf

Besonders hervorzuheben sind die hohen sicherheitstechnischen Aspekte der ORC-Anlage. Alle Schweißnähte der Druckbehälter der ORC-Anlage wurden vom TÜV 100% röntgengeprüft und druckgeprüft, wodurch eine wiederkehrende Prüfung durch einen Technischen Überwachungsverein entfällt.

Die Regelung der ORC-Anlage erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) die sowohl einen automatischen An- und Abfahrbetrieb als auch eine Synchronisation an das elektrische Netz ermöglicht. Lastwechsel der Anlage werden ebenfalls vollautomatisch über die Vorlauftemperatur des Wasserkreislaufes am Kondensator geregelt. Es besteht keine Anwesenheitserfordernis eines Betreibers, auch eine notwendige Abschaltung des Aggregates wegen Störfällen wird von der Steuerung vollautomatisch durchgeführt. Dasselbe gilt für das Anfahren der Anlage. Im vorgewärmten bzw. noch warmen Zustand kann die ORC-Anlage innerhalb von etwa 5 Minuten (nach Durchlaufen der erforderlichen Sicherheitsabfragen) an das elektrische Netz gekoppelt werden. Ein kontinuierlicher Betrieb der ORC-Anlage ist zwischen 10% und 100% der Nennlast möglich.

Die Anbindung des ORC-Prozesses an die Biomassefeuerung wird, wie bereits erläutert, über einen Thermoölkreislauf bewerkstelligt. Der Wärmeträger Thermoöl ermöglicht einen drucklosen Betrieb bei gleichzeitig hohen Betriebstemperaturen, wodurch kein Dampfkesselwärmer erforderlich ist. Somit verringern sich die Personalkosten im Vergleich zu Dampfanlagen. Es entfällt zudem die Wasseraufbereitung, die bei Wasser bzw. Dampf als Wärmeträgermedium notwendig wäre. Der beschriebene Betrieb einer ORC-Anlage unterliegt nicht dem Dampfkesselbetriebsgesetz sondern nur der Druckbehälterverordnung des Kesselgesetzes.

ORC-Aggregate zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit und geringe Störungsanfälligkeit aus, was durch die Erfahrungen aus dem langjährigen Einsatz auf dem Gebiet der Geothermie bestätigt wird. Da der Kreislauf des ORC-Prozesses geschlossen ist und somit keine Verluste des Arbeitsmittels auftreten, sind die Betriebskosten gering. Es fallen nur moderate Kosten für Verbrauchsmittel (Schmiermittel), Instandhaltung und Personal an. Durch die vollautomatische Regelung ist ein praktisch unbemannter Betrieb des ORC-Prozesses möglich. Hinsichtlich der erforderlichen Wartung und Instandhaltung ist standardmäßig eine einmalige Routineüberprüfung der Anlage pro Jahr durch die Herstellerfirma vorgesehen, die ein bis zwei Tage dauert. Eventuelle Störfälle sind über die Prozessvisualisierung und automatische Betriebsdatenspeicherung via Personalcomputer klar nachvollziehbar und werden dem Betreiber über ein Telenot-System sofort mitgeteilt.

Betriebserfahrungen

Der ORC-Prozess im Heizkraftwerk der Holzindustrie STIA / Admont ist seit Oktober 1999 in kontinuierlichem Betrieb. Obwohl die Fernwärmeversorgung noch nicht voll ausgebaut ist und auch die hydraulische Verschaltung des Heißwasserverteilnetzes sowie das Wärmelastmanagement innerhalb der Holzindustrie erst schrittweise nach Inbetriebnahme der ORC-Anlage abgestimmt werden konnte, erreichte die ORC-Anlage im Jahr 2000 im rein wärmegeführten Betrieb bereits eine Netto-Stromproduktion von 1.778 MWh. Auf ein gesamtes Betriebsjahr hochgerechnet entspricht dies einer Anlagenauslastung von 4.445 Jahresvollaststunden (siehe Abbildung 9). Für das 2. Betriebsjahr wird bereits eine Auslastung von rund 6.000 Jahresvollaststunden angestrebt.

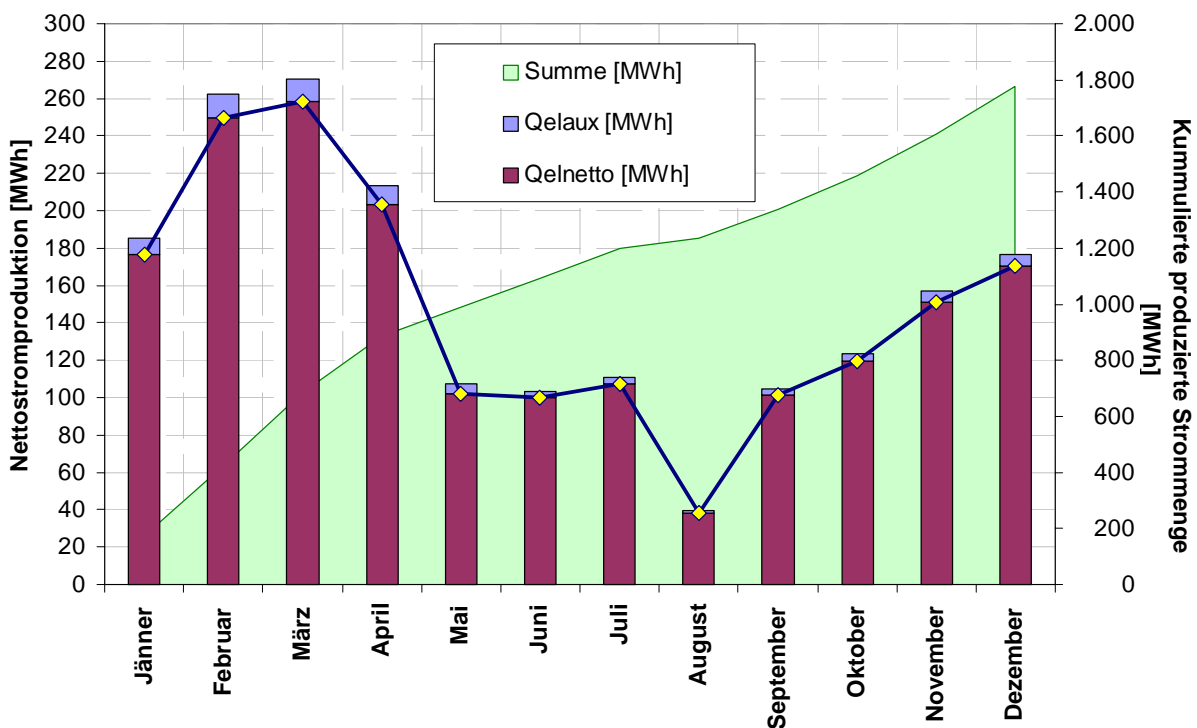


Abbildung 9: Monatliche Nettostromproduktion und kumulierte Jahresstromproduktion der ORC-Anlage in der Holzindustrie STIA Admont für das Jahr 2000

Erläuterungen: Nettostromproduktion (Qelnetto) + Eigenstromverbrauch der ORC-Anlage (Qelaux) = Bruttostromproduktion der ORC-Anlage

Der gemessene elektrische Wirkungsgrad der ORC-Anlage liegt im Voll- und Teillastbetrieb zwischen 15 und 18,5% (siehe Abbildung 7), der thermische Wirkungsgrad bei rund 80% (siehe Abbildung 6).

Unter Berücksichtigung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades der Thermoölkesselanlage (rund 77%) sowie der Wärmerückgewinnung durch die Rauchgaskondensation wird ein

Gesamtjahresnutzungsgrad der Anlage (=erzeugte jährliche Nutzwärme + Nettostromproduktion) / jährlich eingesetzte Brennstoffenergie (bezogen auf H_u) von rund 95% erreicht.

Weiters zeigte der praktische Anlagenbetrieb, dass eine Überlast der ORC-Anlage bis maximal 125% der elektrischen Nennleistung problemlos möglich ist (bedingt durch die großzügige Dimensionierung der Wärmetauscher), welche insbesondere in den Wintermonaten auch genutzt wird. In Abbildung 10 sind die aufgezeichneten Betriebsdaten der ORC-Anlage für zwei typische Wintertage dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass auch bei einer Thermoölvorlauf-temperatur von ca. 290°C und einer Wasseraustrittstemperatur aus dem Kondensator von 85 bis 90°C elektrische Leistungen zwischen 400 und 500 kW erreicht werden können. Weiters zeigt das Diagramm deutlich die Abhängigkeit des elektrischen Wirkungsgrades von der Thermoölvorlauf-temperatur.

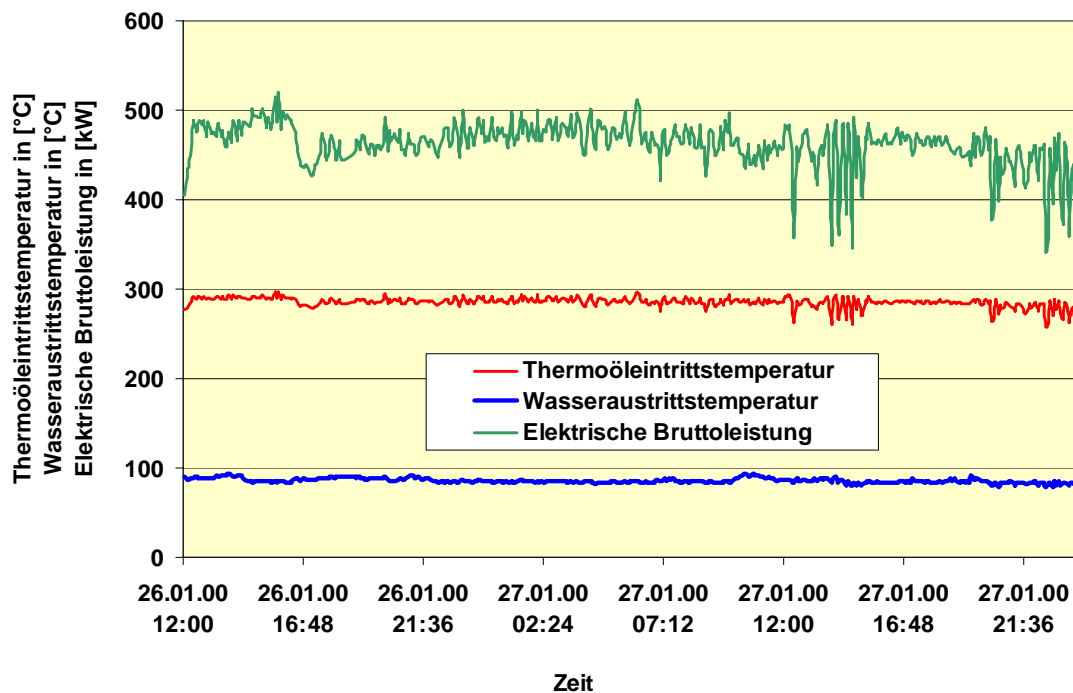


Abbildung 10: Aufgezeichnete Betriebsdaten der ORC-Anlage in der Holzindustrie STIA / Admont für zwei typische Wintertage

Erläuterungen: dargestellt ist die Bruttostromproduktion der ORC-Anlage (die Nettostromproduktion liegt um ca. 3,5% niedriger); Thermoöltemperatur: Eintrittstemperatur in den ORC-Verdampfer; Wassertemperatur: Austrittstemperatur aus dem ORC-Kondensator (durchschnittliche Spreizung 20°C)

Das ORC-Aggregat ist relativ leise. Der lauteste Teil ist der Generator, der ohne Abkapselung etwa 90 dBA auf 1 m Entfernung erzeugt.

Hinsichtlich des erforderlichen Personalbedarfes haben sich die Angaben des Anlagenherstellers bestätigt, er liegt bei durchschnittlich 3-5 h pro Woche, den Rest der Zeit wird die Anlage unbemannt betrieben.

Die Inbetriebnahme der Anlage verlief problemlos. Im ersten Betriebsjahr traten keine wesentlichen Störungen der ORC-Anlage auf. Im August 2000 erfolgte ein erster jährlicher Routinecheck der Anlage, der ebenfalls zufriedenstellend verlief und genau einen Tag dauerte.

Wirtschaftliche Bewertung

Auf Basis des realisierten Demonstrationsprojektes in der Holzindustrie STIA in Admont sowie den daraus gewonnenen Erfahrungen und Daten wurden umfangreiche Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchgeführt, die zum Ziel haben, die Gestehungskosten der Stromerzeugung in Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis eines ORC-Prozesses zu ermitteln.

Der Ansatz der Berechnung der spezifischen Stromgestehungskosten wurde aus folgendem praxisnahen Grund gewählt: Die vorgegebene Größe bei einer dezentralen Biomasse-KWK-Anlage (elektrische Nennleistung kleiner gleich $1,0 \text{ MW}_{\text{el}}$) ist in den meisten Fällen der Wärmebedarf für das Prozesswärme- bzw. Fernwärmenetz. Ein stromgeführter Betrieb von dezentralen Biomasse-KWK-Anlagen erscheint wirtschaftlich und energetisch nicht sinnvoll. Für einen Anlagenbetreiber stellt sich daher die Frage, ob er seinen Wärmebedarf mit einer konventionellen Biomasse-Heißwasseranlage abdecken soll, oder ob sich die Mehrinvestitionen für eine Biomasse-KWK-Anlage mit gleicher Wärmebereitstellung rentieren.

Die Investitionskostenzusammenstellung in Tabelle 2 erfasst daher ausschließlich die mit der Stromerzeugung verbundenen Investitionskosten. Das bedeutet, dass nur die Mehrkosten der Biomasse-KWK-Anlage im Vergleich zu einer konventionellen Biomassefeuerung mit Heißwasserkessel betrachtet wurden, welche die selbe Nutzwärmeleistung aufweist. Aus diesen Investitionskosten lassen sich unter Berücksichtigung der festgelegten Realverzinsung des eingesetzten Kapitals sowie der festgelegten Nutzungsdauer über den Kapitalwiedergewinnungsfaktor die kapitalgebundenen Kosten berechnen (siehe Tabelle 3).

Die Summe der einzelnen Betriebskosten, gegliedert in betriebsgebundene, verbrauchsgebundene und sonstige Kosten (Berechnung nach VDI-Richtlinie 2067) in Tabelle 3 umfasst ebenfalls die jährlichen Mehrkosten einer Biomasse-KWK-Anlage im Vergleich zu einer konventionellen Biomasse-Heißwasseranlage mit gleicher Nutzwärmebereitstellung.

Bezieht man schließlich die Summe aus jährlichen kapitalgebundenen Kosten und Betriebskosten auf die jährlich produzierte Strommenge, so erhält man die spezifischen Stromgestehungskosten für $1 \text{ kWh}_{\text{el}}$, welche unabhängig von der Wärmeerzeugung betrachtet werden können, und somit allgemein mit Strombezugs- bzw. Stromeinspeisetarifen vergleichbar sind. Liegen diese spezifischen Stromgestehungskosten über dem lukrierbaren Strompreis, dann erscheint die Errichtung einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen grundsätzlich sinnvoll.

Für das in den Tabellen 2 und 3 dargestellte Fallbeispiel wurde von einer Biomasse-KWK-Anlage auf Basis eines ORC-Prozesses mit einer elektrischen Nennleistung von 500 kW ausgegangen. Weiters wurde der mittlere Brennstoffpreis mit 0,011 €/kWh und die jährliche Anlagenauslastung mit 5.000 Vollaststunden festgelegt. Eine Investitionsförderung wurde nicht berücksichtigt.

TECHNISCHE DATEN			
Elektrische Nettoleistung	P_{el}	[kW _{el}]	500
elektrischer Jahresanlagennutzungsgrad	v_{el}	[%]	14
gesamter Jahresanlagennutzungsgrad	v_{ges}	[%]	80
thermischer Jahresnutzungsgrad der Referenz-Biomasse-Heißwasseranlage	v_{th}	[%]	85
Stromkennzahl	σ	-	0,21
erzeugte Nettostrommenge	Q_{el}	[kWh/a]	2.500.000
erzeugte Wärmemenge	Q_{th}	[kWh/a]	11.785.714
Brennstoffwärmebedarf gesamt	Q_{Br}	[kWh/a]	17.857.143
Mehr-Brennstoffwärmebedarf KWK	Q_{Br-KWK}	[kWh/a]	3.991.597
MEHRINVESTITIONEN im Vergleich zu einer Heißwasserkesselanlage			
Thermoölkessel, Thermoölkreislauf und Economiser		[€]	145.400
Installationen inkl. Armaturen		[€]	40.700
ORC-Anlage		[€]	814.200
Generator		[€]	inkludiert
Steuerung und Verkabelung		[€]	36.350
Netzanschluß (Trafo, etc.)		[€]	109.000
Planungskosten		[€]	123.289
Sonstige Mehrkosten (Hydraulik, Baukosten)		[€]	87.240
Investitionskosten	I	[€]	1.356.179
spez. Investitionskosten ohne Förderung	I_{spez}	[€/kW _{el}]	2.712

Tabelle 2: Überblick über die technischen Daten und Mehrinvestitionskosten einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf ORC-Basis im Vergleich zu einer konventionellen Biomasse-Heißwasserkesselanlage mit gleicher Nutzwärmeleistung

Aufbauend auf dieser Basiskalkulation der Stromgestehungskosten wurde auch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, im Rahmen derer die Parameter Jahresvollaststunden (Anlagenauslastung), Brennstoffpreis und Investitionsförderung einzeln und unabhängig voneinander variiert wurden, um deren Einfluss auf das Gesamtergebnis beurteilen zu können (siehe Abbildungen 11 und 12).

JAHRESMEHRKOSTEN im Vergleich zu einer Heißwasserkesselanlage			
Realzinssatz	i_r	[%/a]	6
Nutzungsdauer KWK	n	[a]	15
Kapitalgebundene Kosten	K_k	[€a]	139.636
spez. kapitalgebundene Kosten		[€/kWh _{el}]	0,056
Brennstoffkosten		[€/a]	43.508
Anteil sonstige Betriebsmittel		[(% von I)/a]	0,3
sonstige Betriebsmittelkosten		[€/a]	4.069
Verbrauchsgebundene Kosten	K_v	[€a]	47.577
spez. verbrauchsgebundene Kosten		[€/kWh _{el}]	0,019
Personalstundensatz		[€/h]	22
Arbeitsstunden pro Jahr			200
Personalkosten		[€/a]	4.400
Instandhaltungskosten		[(% von I)/a]	1,5
Instandhaltungskosten		[€/a]	20.343
Betriebsgebundene Kosten	K_b	[€a]	24.743
spez. betriebsgebundene Kosten		[€/kWh _{el}]	0,010
Anteil von Versicherung, Verwaltung		[(% von I)/a]	0,5
Versicherung-, Verwaltungskosten		[€/a]	6.781
Sonstige Kosten	K_s	[€a]	6.781
spez. sonstige Kosten		[€/kWh _{el}]	0,003
Gesamtkosten	K_{ges}	[€a]	218.736
spez. Gesamtstromerzeugungskosten		[€/kWh_{el}]	0,087

Tabelle 3: Berechnung der spezifischen Stromgestehungskosten einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf ORC-Basis als Mehrkosten im Vergleich zu einer konventionellen Biomasse-Heißwasserkesselanlage mit gleicher Nutzwärmeleistung

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 2; Brennstoffkosten: 0,011 €/kWh; Jahresvollaststunden der KWK-Anlage: 5.000; Investitionsförderung: 0%; die Kosten für Instandhaltung, Personal und sonstige Kosten basieren auf Erfahrungswerten; Berechnungsbasis: VDI-Richtlinie 2067

Die Ergebnisse der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsrechnungen zeigen, dass die spezifischen Stromgestehungskosten einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf ORC-Basis mit einer elektrischen Nennleistung von 500 kW unter den oben genannten Annahmen bei rund 0,087 €/kWh_{el} liegen, wenn keine Investitionsförderungen berücksichtigt werden. Für eine ORC-Anlage mit einer elektrischen Nennleistung von 1.000 kW (bei sonst gleichbleiben-

den Rahmenbedingungen) sinken die spezifischen Stromgestehungskosten auf ca. 0,070 €/kWh_{el}, da sich die spezifischen Investitionskosten von rund 2.710 €/kW_{el} auf ca. 2.040 €/kW_{el} verringern (Economy-of-Scale-Effekt) [8].

Die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalyse zeigen deutlich, dass die Auslastung der Kraft-Wärme-Kopplungsanlage den stärksten Einfluss auf die spezifischen Stromerzeugungskosten hat. Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen müssen so konzipiert sein, dass sie mindestens 5.000 Jahresvollaststunden erreichen können, nach Möglichkeit noch mehr. Die Abhängigkeit der Stromerzeugungskosten vom Brennstoffpreis sowie von gewährten Investitionsförderungen ist ebenfalls markant. Wichtig für die wirtschaftliche Beurteilung und Absicherung eines Projektes ist, dass Brennstoffmengen und -preise langfristig vertraglich gesichert und um mögliche Investitionsförderungen auf jeden Fall angesucht werden sollte.

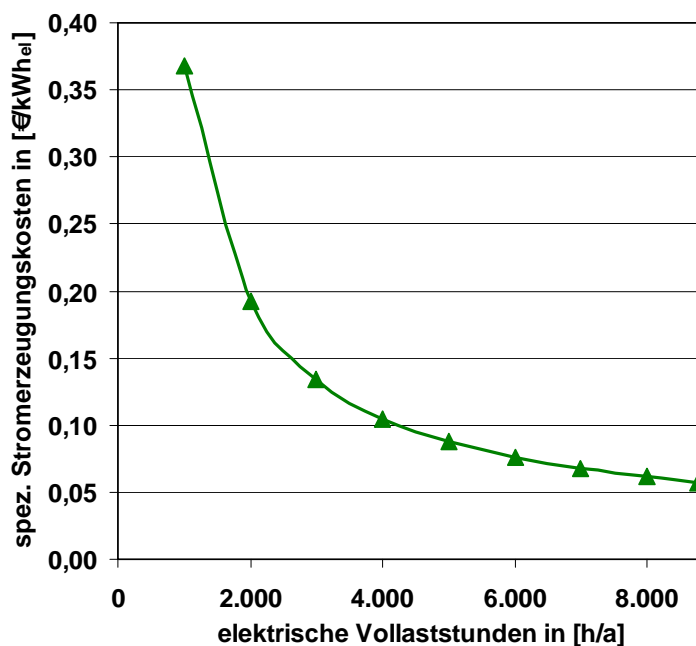


Abbildung 11: Spezifische Stromerzeugungskosten in Abhängigkeit der Anlagenauslastung (Jahresvollaststunden) - Biomasse-KWK-Anlage auf ORC-Basis (500 kW_{el})

Erläuterungen: verwendete Basisdaten siehe Tabelle 2 und 3

Die sich ergebenden spezifischen Stromerzeugungskosten liegen international gesehen in einem Bereich, der in denjenigen Ländern, die Einspeisetarife für Strom aus erneuerbaren Energieträgern bzw. entsprechende Investitionsförderungen gewähren, einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb derartiger Anlagen ermöglicht (siehe Deutsches Erneuerbare-Energien-Gesetz bzw. österreichisches Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz).

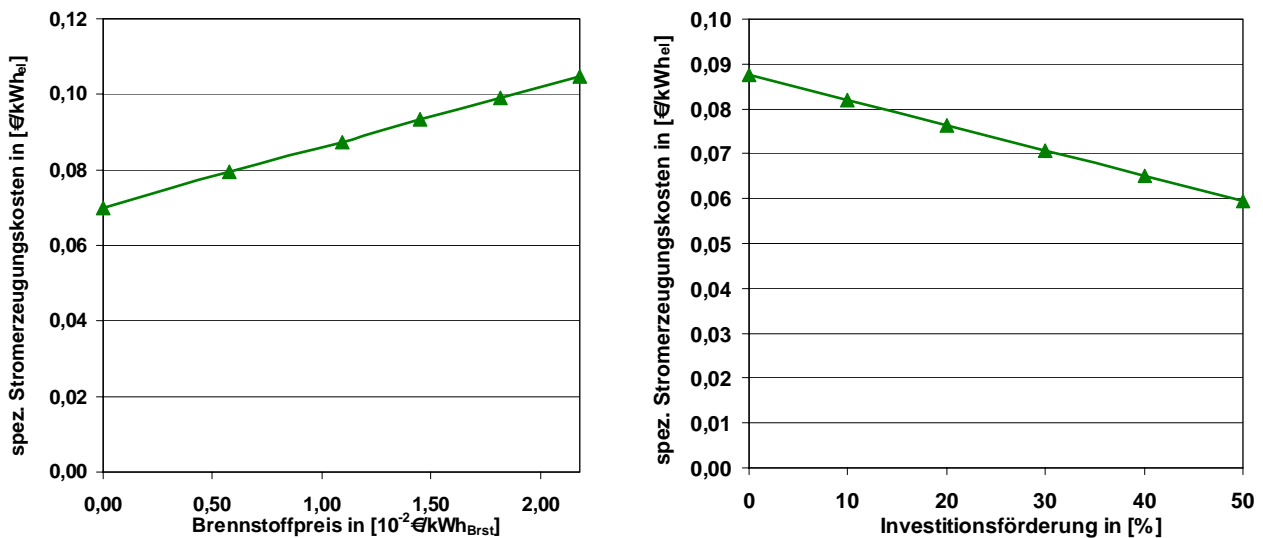


Abbildung 12: Spezifische Stromerzeugungskosten in Abhängigkeit des Brennstoffpreises und der gewährten Investitionsförderungen - Biomasse-KWK-Anlage auf ORC-Basis (500 kW_{el})

Erläuterungen: verwendete Basisdaten siehe Tabelle 2 und 3

Da es sich bei dem hier vorgestellten Projekt um eine internationale Demonstrationsanlage handelt, sind verständlicherweise noch nicht alle Kostensenkungspotentiale dieser Technologie ausgeschöpft. Auf Basis der durch das Projekt gewonnene Erfahrungen und der darauf aufbauenden Entwicklungs- und Optimierungstätigkeiten kann ein zukünftiges Verbesserungs- und Kostensenkungspotential für weitere Anlagen erwartet werden, insbesondere sobald eine Kleinserienfertigung erreicht wird.

Ökologische Aspekte

Durchgeführte Emissionsmessungen an der Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage der Holzindustrie STIA/Admont zeigten, dass die behördlich bzw. von der österreichischen Förderungsstelle vorgeschriebenen Grenzwerte (jeweils bezogen auf trockenes Rauchgas und 13,0 Vol%O₂) von 100 mg/Nm³ für CO, 25 mg/Nm³ für C_xH_y, 250 mg/Nm³ für NO_x (gemessen als NO₂) und von 50 mg/Nm³ für Staub sowohl bei Nennlast als auch im Teillastbetrieb problemlos eingehalten werden können. Durch die Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung werden rund 2.800 t/a CO₂, rund 21 t/a CO, rund 15 t/a SO₂, rund 11 t/a NO_x, rund 10 t/a Staub und rund 4 t/a C_xH_y an Emissionen eingespart (durch die Substitution alter Ölf Feuerungen sowie von Strom laut österreichischem Kraftwerksmix), wodurch eine deutliche Verbesserung der regionalen Umweltsituation resultiert und ein wichtiger österreichischer Beitrag zur Erreichung des Kyoto-Zieles geleistet wird.

Das anfallende Kondensat aus der Rauchgaskondensationsanlage wird nach einer pH-Wert-Stabilisierung (pH-Wert wird auf größer gleich 7,5 gehalten, um eine Lösung von Schwermetallen im Kondensat weitgehend zu verhindern) in einen Sedimentationsabscheider geleitet, in dem eine effiziente Abtrennung des Schlammes vom Kondensat erfolgt. Anschließend gelangt das gereinigte Kondensat in den öffentlichen Kanal.

Bei den anfallenden Aschen wird zwischen einer verwertbaren Fraktion (Mischung aus Grob- asche und Zyklonflugasche) und einer zu deponierenden Fraktion (Kondensatschlamm) unterschieden. Diese beiden Chargen werden getrennt gesammelt. Die verwertbare Aschenfraktion, welche rund 90% der gesamten anfallenden Asche ausmacht, wird als Sekundärrohstoff mit bodenverbessernder und düngender Wirkung in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt. Der Kondensatschlamm, welcher mit Schwermetallen angereichert ist, wird deponiert. Auf diese Weise kann auch hinsichtlich der anfallenden Biomasseaschen eine umweltverträgliche Kreislaufwirtschaft erreicht werden.

Der ORC-Prozess selbst verursacht keine festen, flüssigen oder gasförmigen Emissionen, da es sich um einen vollständig geschlossenen Kreislauf handelt.

Anwendungspotential und zukünftige Entwicklungsziele

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch diese neue Kraft-Wärme-Kopplungstechnologie auf Biomassebasis für dezentrale Anlagen eine wirtschaftlich und technisch interessante Lösung zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung aus heimischen erneuerbaren Energieträgern zur Verfügung steht. Das Potential für derartige Anlagen in Österreich ist sehr groß, wenn man bedenkt, dass mehr als 400 Biomassefernhelzwerke in Österreich bereits in Betrieb sind und jährlich rund 50 Biomasse-Großanlagen (mit einer Kessel-nennleistung über 1,0 MW_{th}) in Österreich neu installiert werden. Dadurch könnte diese innovative Kraft-Wärme-Kopplungstechnologie auf ORC-Basis, die nicht nur bei Neuanlagen einsetzbar ist, sondern auch bei bestehenden Anlagen nachgerüstet werden kann (nur Kessel-tausch, Feuerung kann meist bestehen bleiben), auch einen wertvollen Beitrag zur Erreichung der Ziele des neuen österreichischen Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetzes (EIWOG) leisten, das vorsieht, dass bis zum Jahr 2007 rund 4% des österreichischen Gesamtstromverbrauches (entspricht ca. 1.500 GWh/a) aus erneuerbaren Energiequellen (exklusive der Wasserkraft) bereitgestellt werden sollen [3].

Auf europäischer Ebene (siehe Weißbuch für erneuerbare Energieträger der Europäischen Kommission) soll der Beitrag der erneuerbaren Energieträger zur Primärenergie-Bedarfsdeckung bis zum Jahre 2010 innerhalb der EU verdoppelt werden (von derzeit etwa 6% auf 12%), der Einsatz der Biomasse soll verdreifacht werden (Biomasse soll dann 75% der eingesetzten erneuerbaren Energieträger ausmachen) und die Stromerzeugung aus Biomasse soll

verzehnfacht werden (auf Basis der Vergleichszahlen aus dem Jahr 1995). Diese Ziele verdeutlichen den besonderen Stellenwert von Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungen in der zukünftigen europäischen Energiepolitik.

Die zukünftigen Entwicklungsziele fokussieren sich auf eine weitere Verbesserung des erreichbaren elektrischen Wirkungsgrades (das realistisch erscheinende Verbesserungspotential liegt in der Größenordnung zwischen 10 und 20%) sowie auf ein Upscaling der ORC-Technologie von 400 kW_{el} auf bis zu 1.200 kW_{el}. Ein nächstes europäisches Demonstrationsprojekt zur Errichtung einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf ORC-Basis mit einer elektrischen Nennleistung von 1.000 kW, die die genannten Zielsetzungen erfüllt, ist bereits in Detailplanung und wird im Jahr 2001 realisiert (Biomasse-Heizkraftwerk Lienz/A). Eine zweite Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf ORC-Basis mit einer elektrischen Nennleistung von 1.000 kW, die mit einer Absorptionskältemaschinenanlage gekoppelt wird (kombinierte Strom- und Kälteproduktion aus Biomasse), ist ebenfalls in Detailplanung und wird zu Beginn des Jahres 2002 in Betrieb gehen (Biomasse-Heizkraftwerk Fussach/A). Für beide dieser Anlagen führt das Ingenieurbüro BIOS die Vor-, Genehmigungs- und Detailplanung durch, die Fa. Turboden ist Lieferant der ORC-Module.

Veröffentlichungen

- [1] Bini, R.; Gaia, M.; Giradi, 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
- [2] Obernberger, Ingwald: Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis eines ORC-Prozesses – Holzindustrie STIA Admont. In: Tagungsband zur 2. Euroforum Konferenz, 8.-9. Oktober 1998, Wien, Euroforum (Hrsg.), München, Deutschland, 1998
- [3] Obernberger, Ingwald; Hammerschmid, Alfred: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien – Potential, technische und wirtschaftliche Bewertung, Einsatzgebiete, Schriftenreihe "Thermische Biomassenutzung", Band 4, ISBN 3-7041-0261-X, dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Österreich, 1999
- [4] Bini, Roberto; Manciana, E.: Organic Rankine Cycle Turbogenerators for Combined Heat and Power Production from Biomass. In: Proceedings of the 3rd Munich Discussion Meeting 1996, ZAE Bayern (ed), Munich, Germany, 1996
- [5] TURBODEN: Firmendokumentation der ORC-Anlage - Holzindustrie STIA / Admont, Turboden srl (Hrsg.), Brescia, Italien, 1999
- [6] Obernberger, Ingwald; Hammerschmid, Alfred: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien. In: Erneuerbare Energie, Heft 4, 1999, Arge Erneuerbare Energie (Hrsg.), Gleisdorf, Österreich, 1999

- [7] Obernberger, Ingwald; Hammerschmid, Alfred; Biedermann, Friedrich; Reinalter Johann: 5. Planerseminar –Grundlagen für eine optimierte Planung von dezentralen Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Oktober 1999, St. Pölten, Österreich, Österreichischer Biomasseverband (Hrsg.), Graz, Österreich, 1999
- [8] Obernberger, Ingwald: Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien auf Basis Biomasseverbrennung. In: Tagungsband zur Konferenz „Zukunft der Energie“, Oktober 2000, Pinkafeld, Fachhochschule Pinkafeld (Hrsg.), Pinkafeld, Österreich, 2000
- [9] Obernberger Ingwald, Bini Roberto, Neuner Helmut, Preveden Zvonimir: Biomass fired CHP plant based on an ORC cycle – project ORC-STIA-Admont, final report of the EU-THERMIE project No. BM/120/98, European Commission, DG TREN (ed.), Brussels, Belgium, 2001
- [10] Gaia, M., Angelino, G., Macchi, E., De Heering, D., Fabry, J.P.: Experimental results of the ORC engine developed for the Borj Cedria solar plant. In: Proc. of the 8th Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Perth, August 1983, Pergamon Press (ed.), Oxford, UK, 1984
- [11] 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, Zurich, VDI-Verlag (ed.), Düsseldorf, Germany, 1984
- [12] Angelino, G., Gaia, M., et al.: One MW binary cycle turbogenerator module made in Europe. In: Proc. of the "World Geothermal Congress", Florence, May 1995, International Geothermal Association, Inc. (ed.), Auckland, New Zealand, ISBN 0-473-03123 -X