

Neue Klein-ORC-Technologie (200kW_{el}) für dezentrale Biomasse-KWK-Anlagen

Prof. Dipl.-Ing. Dr. **Ingwald Obernberger**,
Dipl.-Ing. Dr. **Friedrich Biedermann**, *Dipl.-Ing. Peter Thonhofer*,
BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz/A;
Prof. Dr. Mario **Gaia**, Dr. Roberto **Bini**,
TURBODEN SRL, Milano/I

Kurzfassung

Der ORC-Prozess stellt für dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen eine technisch und wirtschaftlich interessante Technologie dar. Derzeit sind bereits mehr als 80 Anlagen europaweit in Betrieb. Die ORC-Technologie stand bis vor Kurzem im Leistungsbereich von 400 bis 2000 kW_{el} zur Verfügung. Eine neue Entwicklung stellt ein Klein-ORC-Modul für eine elektrische Nennleistung von 200 kW_{el} dar. Schwerpunkt dieser Entwicklung war es bei gleichem elektrischen Wirkungsgrad wie die größeren Anlagen durch kompaktere Bauform und modulare Fertigung eine Klein-ORC-Anlage zu konzipieren, die wirtschaftlich konkurrenzfähig einsetzbar ist, und dadurch diese sehr gut für dezentrale Biomasse-KWK-Anlagen geeignete Technik einem breiteren Anwenderkreis zu öffnen.

Die ORC-Technologie basiert auf dem Rankine Prozess mit dem Unterschied, dass anstelle von Wasser ein organisches Arbeitsmittel verwendet wird. Der ORC-Prozess ist ein in sich geschlossener Prozess, der über Wärmetausch mit dem Thermoölkreislauf (Input an thermischer Energie aus der Biomassefeuerung) und mit dem Fernwärmenetz (Output an thermischer Energie) sowie mit dem örtlichen Stromnetz (Output elektrische Energie) verbunden ist. Die speziellen Vorteile der ORC-Technologie liegen in ihrer Robustheit (hohe Lebensdauer, hohe Verfügbarkeit), in der vollautomatischen und unbemannten Betriebsweise (Personalbedarf nur 3 bis 5 Stunden pro Woche), in ihrem ausgezeichnetem Teillast- und Lastwechselverhalten und in dem für dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen relativ hohen elektrischen Wirkungsgrad (= produzierte elektrische Leistung / der ORC-Anlage zugeführter thermische Leistung) von 17-20%.

Das neue 200 kW_{el}-Modul unterscheidet sich grundsätzlich nicht vom konventionellen für größere Leistungen konzipierten ORC-Prozess. Es wurden jedoch gewisse Anlagenteile adaptiert, vereinfacht und kompakter gestaltet, um eine akzeptable Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Wesentliche durchgeführte Neuentwicklungen sind die drehzahlvariabel angesteuerte Turbine, der hochfrequente und dauermagnetische Synchrongenerator und

eine Leistungselektronik, die den vom Generator produzierten Strom mit variabler Frequenz in netzkonformen Strom mit einer Frequenz von 50 Hz umwandelt. Ein wesentliches Ziel der Neuentwicklung war es die spezifischen Investitionskosten im Vergleich zu einem 500 kW_{el} ORC-Modulen trotz Reduktion der elektrischen Leistung nicht wesentlich zu erhöhen.

Die erste Biomasse-KWK-Anlage, die auf der neuen 200 kW_{el} ORC-Technologie basiert, wurde Ende 2007 in Betrieb genommen. Weitere 4 Anlagen befinden sich derzeit in Planung bzw. Realisierung. Erste Betriebserfahrungen zeigen, dass das 200 kW_{el}-Modul bereits eine hohe Technologiereife erlangt hat.

Abstract

The ORC (Organic Rankine Cycle) process has attained a high level of development and represents a technically and economically efficient solution for decentralised biomass CHP plants. More than 80 plants based on ORC technology are already in operation in Europe at present. The ORC technology was up to now available for biomass CHP plants with nominal electric capacities between 400 and 2,000 kW. In order to expand the applicability of the ORC process for small-scale systems, a new ORC module with a nominal electric capacity of 200 kW was developed. The development focused on a reduction of the complexity of several components without decreasing the electric efficiency in order to enhance its economic competitiveness.

The ORC process is a closed cycle process and utilises a silicon oil as organic working medium. The ORC process is connected via a thermal oil cycle with the thermal oil boiler (input of thermal energy from the biomass furnace), with the district heating network (output of thermal energy), and with the power grid (output of electric energy). The advantages of the ORC process are its robustness (long product life and high availability), the fully automatic and unmanned operation, an excellent partial load and load change behavior, as well as the relatively high electric efficiency for decentralized biomass CHP plants of 17 – 20% (electric energy produced / heat input from the thermal oil cycle).

The newly developed module with a nominal electric output of 200 kW_{el} is in principle based on the conventional ORC technology. However, several plant components have been adapted in order to reach the main goal which was to keep the specific investment costs (€/kW_{el}) comparable to a 500 kW_{el} ORC unit. The new development comprises a revolution speed variable turbine in order to enhance the partial load behaviour as well as a synchronous generator equipped with a permanent magnet and power electronics, which transforms the high and variable engine speed to 50 Hz alternating current. In addition, the new technology is integrated in a compact module.

The first biomass CHP plant equipped with the new 200 kW_{el} ORC technology was put into operation in the end of 2007. 4 plants are in the design respectively realisation phase at present. First operating experiences demonstrate the high technological maturity the new 200 kW_{el} ORC technology has already achieved.

1. Einleitung

Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Technologien auf Basis Biomasse wurden in den letzten Jahren intensiv weiterentwickelt und haben einen großen Aufschwung erlebt. Insbesondere im Leistungsbereich bis etwa 2 MW_{el} wurden neue Technologien entwickelt bzw. verbessert, die sich für den Einsatz in Biomasse-KWK-Anlagen als sehr erfolgversprechend erwiesen haben. Derartige Anlagen sollten überwiegend wärmegeführt betrieben werden, um hohe Gesamtwirkungsgrade zu erreichen und den eingesetzten Biomasse-Brennstoff möglichst effizient zu nutzen. Weiters weisen Biomasse-KWK-Anlagen durch den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern ein großes CO₂-Einsparungspotenzial auf und sollten aufgrund der relativ niedrigen Energiedichte von Biomasse-Brennstoffen vorwiegend dezentral eingesetzt werden.

Laut der Direktive der Europäischen Kommission zur Forcierung der Elektrizitätsproduktion aus erneuerbaren Energieträgern (RES-E directive) sollten bis zum Jahr 2010 EU-weit 21 % der elektrischen Stromproduktion mit erneuerbaren Energieträgern erfolgen (Stand im Jahr 2001: 15,2 %) [1]. Auf Basis dieser Direktive haben die einzelnen Mitgliedsländer nationale Ziele definiert. Bild 1 stellt den Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern in den einzelnen Staaten im Jahr 2005 im Vergleich mit den für das Jahr 2010 festgelegten Zielen dar [1, 2].

Die dargestellten Zahlen zeigen, dass Österreich derzeit weit vom national gesteckten Ziel für das Jahr 2010 (78,1%) entfernt ist, vor allem wenn man berücksichtigt, dass sich in Österreich der Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern vom Jahr 1997 bis zum Jahr 2005 von rund 67% auf 58% deutlich reduziert hat [2]. Für Deutschland stellt sich die Entwicklung positiver dar. Der Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern hat sich in Deutschland im Jahr 2005 (mit 10,5%) im Vergleich zum Jahr 1997 (mit 4,5%) mehr als verdoppelt [2].

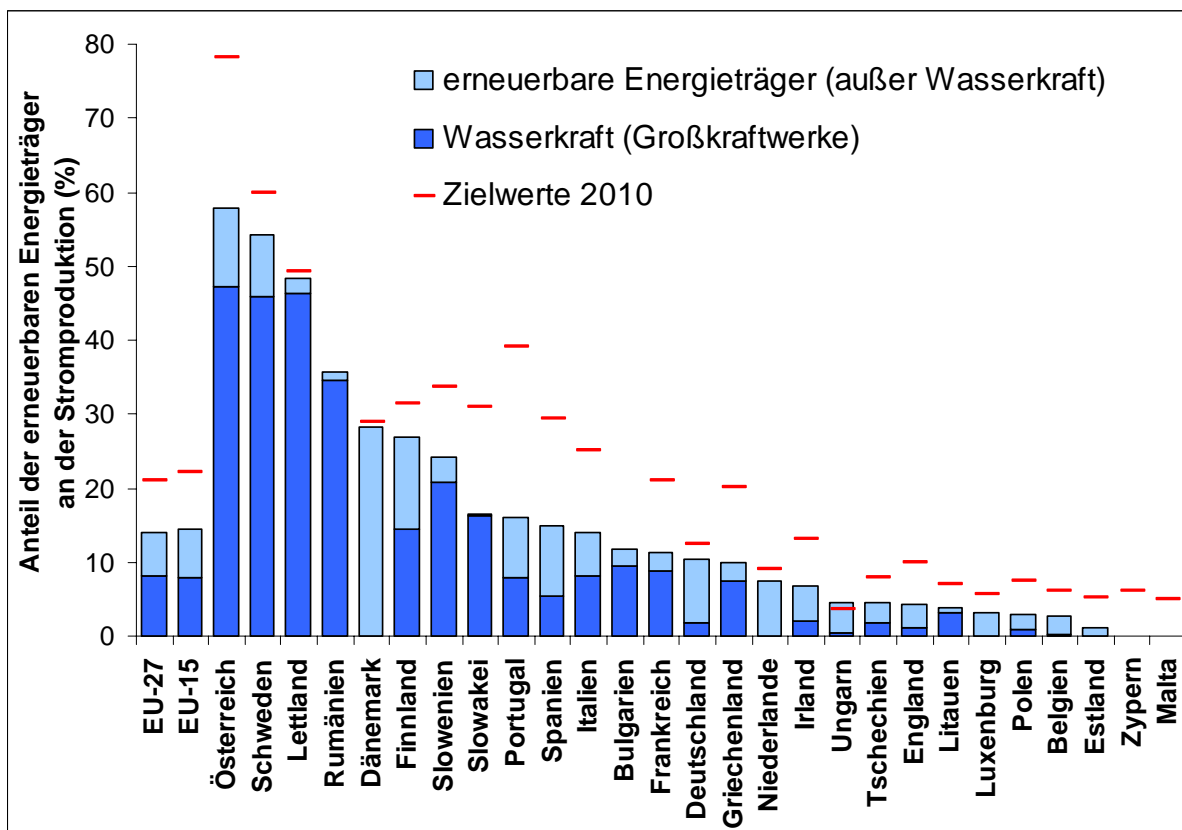


Bild 1: Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Stromproduktion im Jahr 2005 und definierte Zielwerte für das Jahr 2010 in den EU-27 Staaten

Erläuterungen: Wasserkraft (Großkraftwerke) beinhaltet Kraftwerke ab einer elektrischen Nennleistung > 10 MW

Für die Stromproduktion aus fester Biomasse stehen unterschiedliche Technologien zur Verfügung. Auf Basis Biomasse-Verbrennung sind das der Stirlingmotorprozess, der Dampfkolbenmotorprozess, der Dampfschraubenmotorprozess, der ORC-Prozess und der Dampfturbinenprozess, wobei sich der Stirlingmotorprozess insbesondere für Anlagen im kleinen Leistungsbereich (bis 100 kW_{el}) eignet. Im Leistungsbereich von 400 bis rund 2.000 kW_{el} stellt der ORC-Prozess den Stand der Technik dar. Im großen Leistungsbereich (Anlagen größer 2.000 kW_{el}) werden vor allem Anlagen auf Basis Dampfturbinenprozess realisiert. Zukünftig könnte im großen Leistungsbereich auch die Biomassevergasung eine Rolle spielen. Für den, insbesondere für die dezentrale Nutzung von fester Biomasse zur Stromproduktion sehr interessanten Leistungsbereich zwischen 100 und 400 kW_{el}, war bisher keine marktreife Technologie verfügbar.

Auf diesen Leistungsbereich zielt die neueste Entwicklung im Bereich der ORC-Technik ab. Schwerpunkt dieser Entwicklung war es eine Klein-ORC-Anlage mit einer elektrischen

Nennleistung von 200 kW_{el} zu konzipieren, die einen vergleichbaren elektrischen Wirkungsgrad wie größere ORC-Anlagen aufweist und durch kompaktere Bauform und modulare Fertigung wirtschaftlich konkurrenzfähig einsetzbar ist. Durch diese Neuentwicklung soll die ORC-Technologie, die sich sehr gut für dezentrale Biomasse-KWK-Anlagen eignet, einem deutlich breiteren Anwenderkreis offen stehen.

2. Technologiebeschreibung

Die ORC-Technologie basiert auf einer langjährigen Entwicklung, mit dem Ziel Solarenergie, geothermische Energie sowie Energie aus Biomasse dezentral und sinnvoll zu nutzen [3]. 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. 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 [4, 5].

Als Wärmeträgermedium zwischen Biomassefeuerung und ORC-Prozess kommt Thermoöl zum Einsatz. Die im Kühlkreislauf anfallende, aus dem Kondensator ausgekoppelte Wärmemenge wird in ein Prozess- oder Fernwärmenetz eingespeist. Biomasse Kraft-Wärme-Kopplungen auf Basis ORC-Prozess werden derzeit meist thermoölseitig mit einer Vorlauftemperatur von 300 bis 320 °C und einer Spreizung von 50 bis 70 °C betrieben. Auf der Kühlkreislaufseite liegen die Heißwasser-Vorlauftemperaturen üblicherweise zwischen 80 und 90 °C und die Spreizung bei rund 20 °C.

Aus Bild 2 und Bild 3 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. Das unter Druck stehende Silikonöl wird durch das Thermoöl im Verdampfer verdampft sowie leicht überhitzt und danach in einer Axialturbine entspannt, die direkt an einen Generator 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. 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.

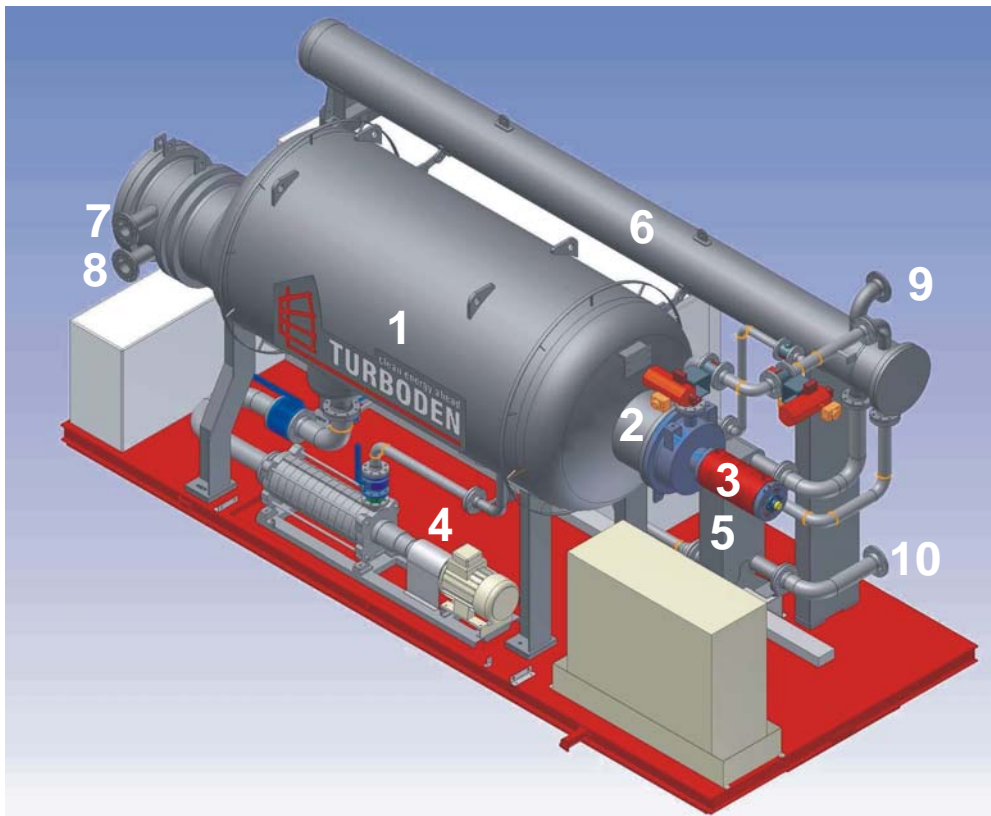


Bild 2: Grafische Darstellung des neuen 200 kW_{el} ORC-Moduls

Erläuterungen: Quelle: [6], 1 ... Regenerator und Kondensator, 2 ... Turbine, 3 ... Generator, 4 ... Umwälzpumpe, 5 ... Vorwärmer, 6 ... Verdampfer, 7 ... Fernwärme-Vorlauf, 8 ... Fernwärme-Rücklauf, 9 ... Thermoöl-Vorlauf, 10 ... Thermoöl-Rücklauf

Ein ganz wesentlicher Vorteil der ORC-Technologie ist dessen ausgezeichnete Teillast- und Lastwechselfähigkeit. Laut vorliegender Betriebserfahrungen ist ein automatisierter Anlagenbetrieb zwischen 10 und 100% der Nennleistung problemlos möglich. Bei Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis ORC-Prozess wird normalerweise ein Thermoölkessel bestehend aus einem Strahlungszug, gefolgt von 2 konvektiven Zügen eingesetzt, dem ein Thermoöl-Economiser und ein Luftvorwärmer nachgeschaltet werden, um die im Rauchgas noch enthaltene fühlbare Wärme besser für die Stromerzeugung zu nutzen (siehe Bild 3). Der Wirkungsgrad des Thermoölkessels (=Nennwärmeleistung / Brennstoffwärmeleistung [H_u]) liegt im Bereich von 68 bis 77% (abhängig vom Luftüberschuss und vom Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffes, bei einer Rauchgasaustrittstemperatur aus dem Thermoölkessel von rund 370 °C). Durch den Thermoöl-Economiser und den Luftvorwärmer wird die Rauchgasaustrittstemperatur auf rund 220 °C gesenkt und der Wirkungsgrad um rund 12% angehoben, was auch eine entsprechende Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades der Gesamtanlage bedingt. Der

Thermoölkessel, der Thermoöl-Economiser und der Luftvorwärmer werden meist mit einer automatischen Kesselabreinigungsanlage auf Druckluftbasis ausgestattet, welche es nach vorliegenden Betriebserfahrungen ermöglicht, die Anlage ohne manuelle Reinigung über rund 4.000 Stunden zu betreiben, ohne dass ein nennenswerter Anstieg der Rauchgasaustrittstemperatur zu beobachten ist, wenn chemisch unbehandelte Biomasse als Brennstoff verwendet wird.

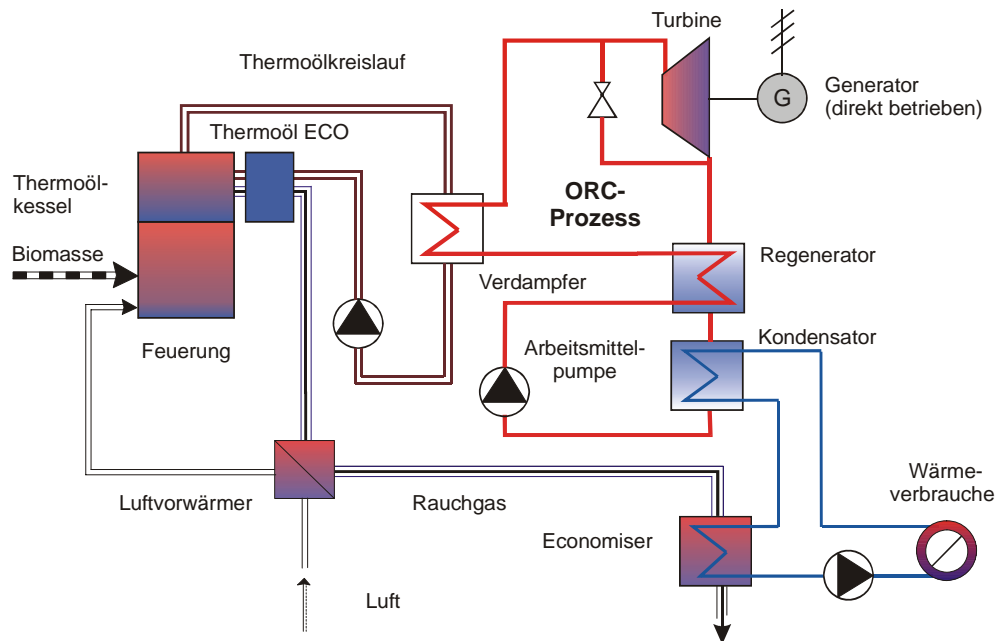


Bild 3: Schematische Darstellung einer Biomasse-KWK-Anlage auf Basis ORC-Prozess

Die Effizienz des ORC-Prozesses kann durch Implementierung eines verzweigten Kondensatkreislaufes noch weiter verbessert werden. Beim ORC-Prozess mit verzweigtem Kondensatkreislauf wird in einem zweiten Thermoöl-Economiser dem Rauchgas zusätzlich Wärme entzogen, wodurch der elektrische Anlagenwirkungsgrad zwischen 4% und 8% gesteigert werden kann [7]. Aufgrund der zusätzlichen für ein ORC-Modul mit verzweigtem Kondensatkreislauf anfallenden Investitionskosten ist es aber von den spezifischen Rahmenbedingungen des jeweiligen Projektes abhängig (z.B. Wärmenutzungspotential, Stromeinspeisetarif, Brennstoffkosten), ob sich diese Technologie auch wirtschaftlich rechnet.

Das neue 200 kW_e-Modul, welches von der Firma Turboden Srl entwickelt wurde [6], unterscheidet sich grundsätzlich nicht von der konventionellen ORC-Technologie für den größeren Leistungsbereich. Für die Neukonzeption war es jedoch eine wesentliche Zielsetzung gewisse Anlagenteile zu adaptieren, zu vereinfachen und kompakter zu

gestalten, um den Economy-of-Scale-Effekt zu durchbrechen und eine gute Wirtschaftlichkeit zu erreichen. In diesem Zusammenhang wurde eine schnell laufende Turbine entwickelt, die durch eine entsprechende Leistungselektronik in Abhängigkeit der Last drehzahlvariabel angesteuert werden kann, wodurch insbesondere deren Teillastwirkungsgrad verbessert wird. Weiters wird ein hochfrequenter und dauermagnetischer Synchrongenerator (425 Hz bei Vollast) eingesetzt, der direkt ohne Zwischengetriebe an die Turbine gekoppelt ist. Die Leistungselektronik, bestehend aus Gleich- und Wechselrichter, wandelt den vom Generator produzierten Strom mit variabler Frequenz in netzkonformen Strom mit einer Frequenz von 50 Hz um. Weiters wurde der Schaltschrank direkt in den Container des ORC-Moduls integriert, um eine kompakte Bauform zu realisieren und das Modul bereits im Werk (vor Auslieferung) komplett testen zu können. Um zusätzlich die Baugröße zu reduzieren, wurde der Kondensator und der Regenerator in ein Gehäuse integriert und ein neu auf dem Markt befindlicher lasergeschweißter Plattenwärmetauscher als Vorwärmer eingesetzt, der einen geringen Druckverlust aufweist, wodurch der Eigenstrombedarf der Arbeitsmittelpumpe reduziert wird.

3. Technische Daten des 200 kW_{el} ORC-Moduls und Integration in das Gesamtsystem

In Tabelle 1 sind die technischen Daten des neuen 200 kW_{el} ORC-Moduls dargestellt. Durch das Thermoöl wird dem ORC-Modul eine Wärmeleistung von 1.200 kW zugeführt. Die elektrische Bruttoleistung beträgt rund 213 kW und die thermische Leistung (Kondensator) rund 975 kW. Die elektrische Nettogleistung liegt bei 200 kW (=Bruttoleistung – Eigenstromverbrauch des Moduls). Der elektrische Bruttowirkungsgrad des Moduls liegt bei Nennlast bei rund 18% (= elektrische Bruttoleistung / zugeführter Wärmeleistung mit dem Thermoöl) und der elektrische Nettowirkungsgrad bei 16,7 (= elektrische Nettogleistung / zugeführter Wärmeleistung mit dem Thermoöl). Die thermischen und elektrischen Verluste des ORC-Moduls liegen bei rund 2%.

Thermische Leistung Input (Thermoöl) - Nennlast ORC	1.200	kW
Elektrische Leistung (brutto) - Nennlast ORC	213	kW
Elektrische Leistung (netto) - Nennlast ORC	200	kW
Thermische Leistung Output (Kondensator) - Nennlast ORC	975	kW
Elektrischer Bruttowirkungsgrad - Nennlast ORC	17,8	%
Elektrischer Nettowirkungsgrad - Nennlast ORC	16,7	%
Elektrische und thermische Verluste	rund 2	%
Heizmedium	Thermoöl	
Eintrittstemperatur	300	°C
Austrittstemperatur	250	°C
Kühlmedium	Wasser	
Eintrittstemperatur	60	°C
Austrittstemperatur	80	°C

Tabelle 1: Erwartete technische Daten einer Biomasse-KWK auf Basis des neu entwickelten 200 kW_{el} ORC-Moduls

Erläuterungen: Quelle: [6]

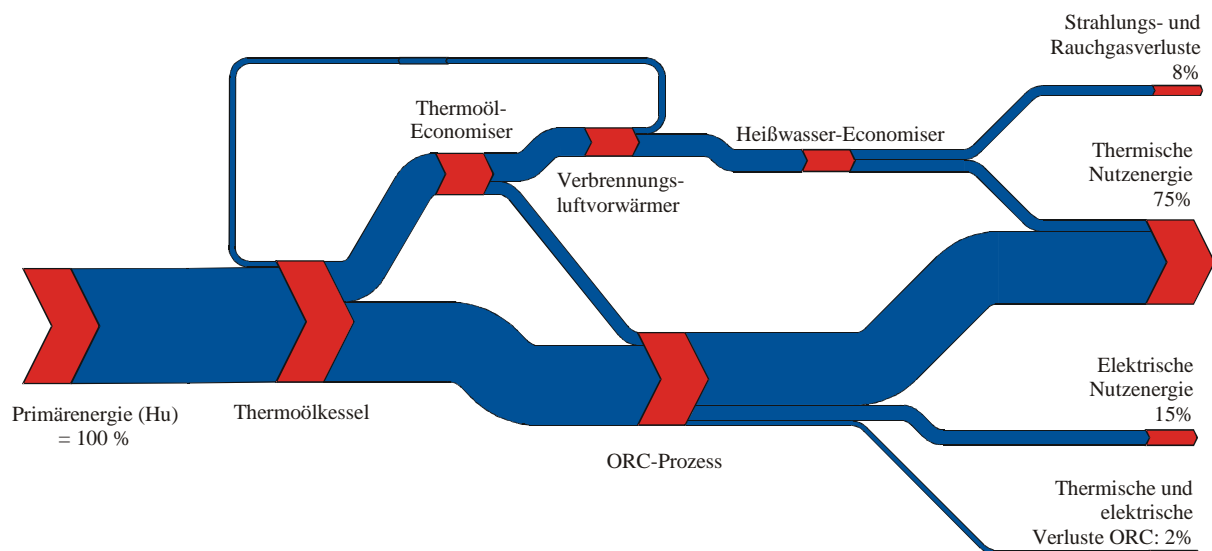


Bild 4: Energieflussdiagramm einer KWK-Anlage auf Basis eines 200 kW_{el}-ORC-Moduls

In Bild 4 ist das Energieflussdiagramm einer Biomasse-KWK-Anlage auf Basis eines 200 kW_{el} ORC-Moduls dargestellt. Der elektrische Wirkungsgrad der Gesamtanlage (=elektrische Nettoleistung/zugeführte Brennstoffwärmeleistung [H_u]) beträgt bei der dargestellten Verschaltungsvariante mit Thermoöl-Economiser und Luftvorwärmer rund 15% und der thermische Wirkungsgrad der Gesamtanlage (=thermische Nettoleistung/zugeführte Brennstoffwärmeleistung [H_u]) rund 75%. Die Strahlungs- und Rauchgasverluste sowie die

elektrischen und thermischen Verluste einer Biomasse-KWK-Anlage auf Basis ORC-Prozess liegen in Summe bei rund 10%.

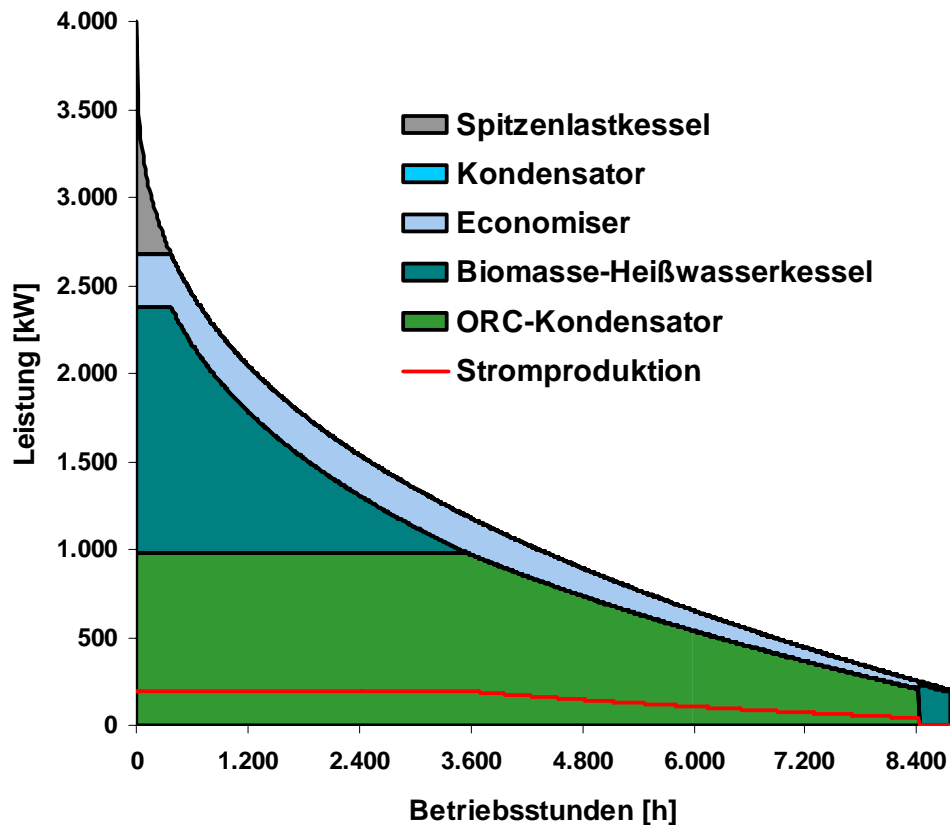


Bild 5: Schematische Darstellung der Einbindung einer 200 kW_{el}-Biomasse-KWK-Anlage auf Basis ORC-Prozess in ein Fernwärmesystem

Bild 5 zeigt beispielhaft eine wirtschaftlich und technisch effiziente Einbindung des 200 kW_{el} ORC-Prozesses in ein Fernwärmesystem. Daraus ist ersichtlich, dass die Biomasse-KWK aus wirtschaftlichen Gründen nicht die gesamte Wärmeproduktion des Fernwärmenetzes abdecken sollte. Rund 67% der Spitzenlast werden durch die KWK-Anlage, einem zweiten Biomassewarmwasserkessel und dem nachgeschalteten Warmwasser-Economiser abgedeckt. Die restlichen 33% der Spitzenlast werden von einem Spitzenlastkessel (z.B. Öl- oder Gaskessel) bereitgestellt. Die KWK-Anlage auf Basis des 200 kW_{el} ORC-Moduls wird für den Bandlastbetrieb ausgelegt und deckt rund 30% der Spitzenlast ab. Unter den dargestellten Rahmenbedingungen produziert die Biomasse-KWK auf Basis des 200 kW_{el} ORC-Moduls mehr als 74% der gesamten jährlich produzierten Wärmemenge, der zweite Biomassewarmwasserkessel rund 24% und die Ölkesselanlage weniger als 2%.

4. Stand der Markteinführung, erste Betriebserfahrungen und wirtschaftliche Bewertung

Die erste Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf Basis ORC-Technologie wurde 1999 im Rahmen eines europäischen Demonstrationsprojektes in der Holzindustrie STIA in Admont realisiert. Diese Anlage ist nun bereits seit über 50.000 Betriebsstunden mit einer Anlagenverfügbarkeit von größer 98% im Einsatz. Aufbauend auf der erfolgreichen Markteinführung konnten sich ORC-Anlagen auf Basis fester Biomasse in den letzten Jahren erfolgreich am Markt etablieren. Derzeit sind europaweit mehr als 80 Biomasse-KWK-Anlagen auf Basis ORC-Prozess in Betrieb. Weitere rund 20 Anlagen befinden sich derzeit in der Realisierungsphase.

Auch die neue 200 kW_{el} ORC-Technologie wurde bereits erfolgreich in den Markt eingeführt. Im Jahr 2007 befanden sich insgesamt 5 KWK-Anlagen, die auf dieser Technologie basieren, in der Planungs- und Realisierungsphase, wobei 4 Anlagen mit fester Biomasse befeuert werden und eine Anlage für die Nutzung der Abwärme eines Blockheizkraftwerkes konzipiert ist.

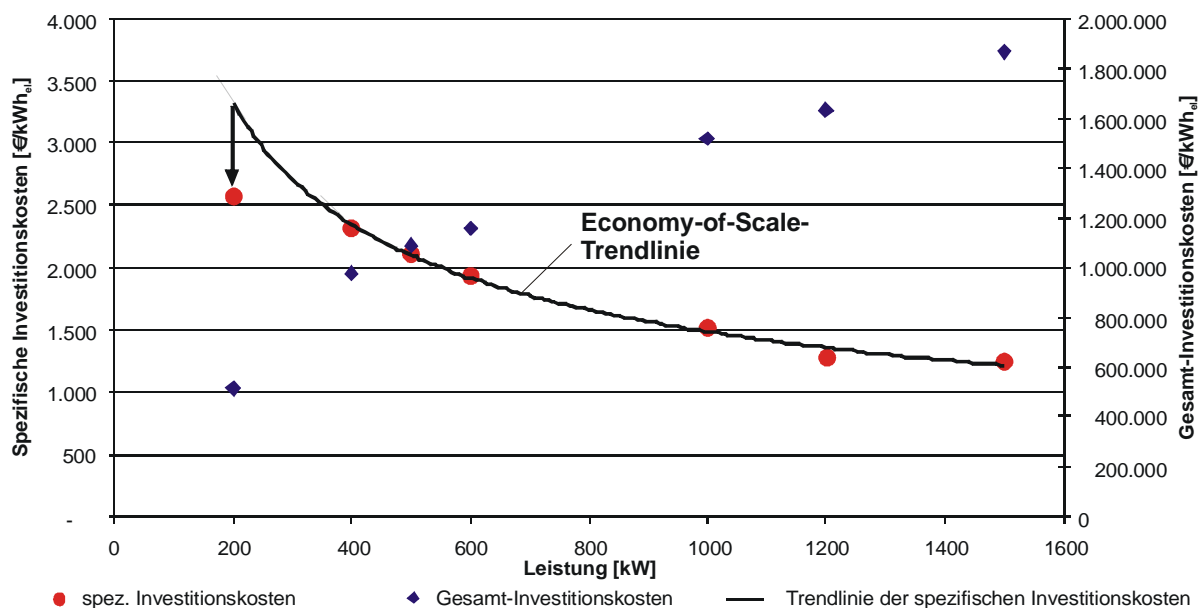


Bild 6: Vergleich der Gesamt-Investitionskosten und der spezifischen Investitionskosten von ORC-Modulen in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung

Erläuterungen: Alle Angaben exkl. MWSt., Stand Mitte 2008

Die erste Biomasse-KWK-Anlage auf Basis des 200 kW_{el} ORC-Moduls wurde Ende 2007 in St. Walburg, Südtirol, in Betrieb genommen. Erste Betriebserfahrungen zeigen, dass das 200 kW_{el}-Modul bereits eine hohe Technologiereife erlangt hat. Die Anlage St. Walburg war bis

Ende Juli 2008 bereits über 4.500 Stunden in Betrieb. Die produzierte Strommenge betrug mehr als 400.000 kWh, wobei diesbezüglich anzumerken ist, dass die Anlage derzeit in der warmen Jahreszeit aufgrund der niedrigen Wärmeabnahme im Teillastbetrieb gefahren wird (wärmegeführte Betriebsweise). Die Anlagenverfügbarkeit lag nach der Inbetriebnahmephase bei über 90%.

In Bild 6 sind die Investitionskosten für das 200 kW_{el} ORC-Modul im Vergleich zu größeren ORC-Anlagen dargestellt. Ein wesentliches Ziel der Neuentwicklung war es die spezifischen Investitionskosten trotz Reduktion der elektrischen Leistung nicht wesentlich zu erhöhen, was durch die Neukonzeption einzelner Komponenten der 200 kW_{el}-ORC-Anlage erreicht werden konnte.

In Bild 7 sind die spezifischen Stromgestehungskosten für die neue 200 kW_{el} ORC-Technologie im Vergleich mit verschiedenen Biomasse-KWK-Technologien dargestellt und mit den Stromeinspeisetarifen in Deutschland und Österreich verglichen. Die Berechnung der Stromgestehungskosten der untersuchten Biomasse-KWK-Anlagen erfolgte auf Basis der Richtlinie VDI 2067 [8]. Gemäß dieser Richtlinie werden für die Ermittlung der Gesamtkosten die verschiedenen Kostenarten in vier Kostengruppen eingeteilt, nämlich die kapitalgebundenen Kosten (Kapital- und Instandhaltungskosten), die verbrauchsgebundenen Kosten, die betriebsgebundenen Kosten und die sonstigen Kosten. Als Kapitalkosten für die Berechnung der Stromgestehungskosten wurden die Mehrinvestitionskosten für die Errichtung einer KWK-Anlage herangezogen werden (Mehrkosten einer Biomasse-KWK-Anlage im Vergleich zu einer konventionellen Biomassefeuerung mit Heißwasserkessel mit derselben Nutzwärmeleistung). Wesentliche Rahmenbedingungen für die Berechnung sind in den Erläuterungen zu Bild 7 angeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die spezifischen Stromgestehungskosten für die neue 200 kW_{el} ORC-Technologie mit rund 18,9 Cent/kWh_{el} höher liegen als für größere ORC-Technologien (beispielhaft betragen diese 15,1 Cent/kWh_{el} für ein 600 kW_{el}-Modul und 12,3 Cent/kWh_{el} für ein 1.500 kW_{el}-Modul). In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass die spezifischen Investitionskosten für das neue ORC-Modul durch die vorgenommenen Optimierungen verschiedener Anlagenkomponenten im Vergleich zu größeren ORC-Modulen nicht wesentlich steigen. Die Kosten für den Thermoöl-Kessel samt Economiser sowie für den Thermoölkreislauf sind jedoch spezifisch höher als für größere ORC-Anlagen. Diesbezüglich sollten zukünftig ebenfalls Kosteneinsparungen erreicht werden, da die kapitalgebundenen Kosten die wichtigste Kostenkomponente darstellen. Die 35 kW_{el}-Stirlingmotortechnologie weist mit rund 21,4 Cent/kWh_{el} deutlich höhere spezifische Stromgestehungskosten als die neue ORC-Technologie auf.

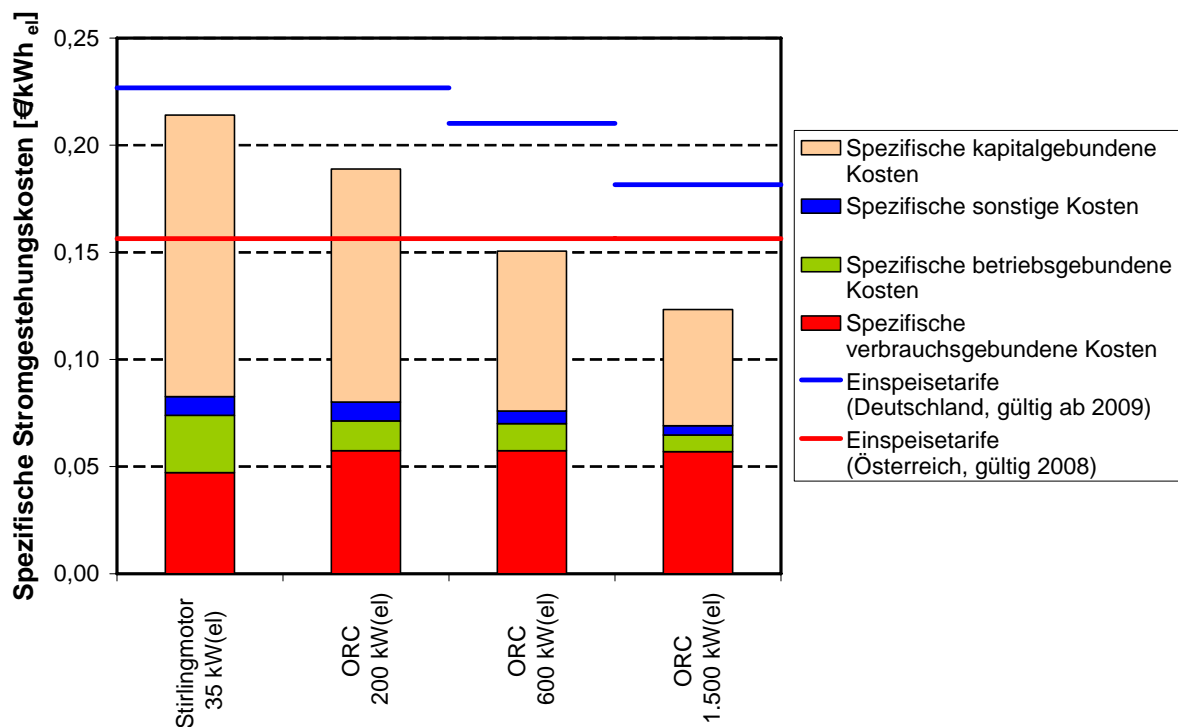


Bild 7: Spezifische Stromgestehungskosten für verschiedene Biomasse-KWK-Technologien

Erläuterungen: Rahmenbedingungen für die Berechnung: Jahresvolllaststunden: 6.000 h/a (Grundlastabdeckung); elektrische Jahresnutzungsgrade: für Stirlingmotortechnologie: 10,5%, für ORC-Technologien: 14%; gesamter Jahresnutzungsgrad: 86%; spezifischer Stromverbrauch der KWK-Anlage (gesamt) für Stirlingmotortechnologie: 20 kWh_{el}/MWh_{th}, für ORC-Technologien: 35 kWh_{el}/MWh_{th}; Bewertungszeitraum: 15 a; Zinssatz: 7% p.a.; Brennstoffpreis: 22 €/MWh(H_u); die Einspeisetarife für Österreich [9] beziehen sich auf Waldhackgut; die Berechnung der Einspeisetarife für Deutschland [10] basiert auf einer Volllaststundenzahl von 6.000 h/a und berücksichtigt den KWK-, den Navaro- und den Technologiebonus

Ein Vergleich der Stromgestehungskosten mit den in Österreich gültigen Stromeinspeisetarifen zeigt, dass in Österreich mit der neuen 200 kW_{el} ORC-Technologie aufgrund der derzeit geltenden niedrigen Ökostrom-Einspeisetarife kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist, wenn nicht zusätzliche Investitionskostenförderungen lukriert werden können (die derzeitigen Ökostrom-Einspeisetarife verhindern die Realisierung derartiger Anlagen). Für Deutschland stellt sich die Situation positiv dar. Durch die wesentlich vorteilhaftere Stromeinspeiseregulierung (dargestellt sind die ab Anfang 2009 gültigen Tarife) sind in Deutschland Projekte auf Basis der neuen Technologie wirtschaftlich sinnvoll und möglich. Ähnlich positiv wie in Deutschland stellt sich die Situation auch in Italien dar.

Der Einfluss der Variation der Jahresvolllaststunden auf die spezifischen Stromgestehungskosten ist in Bild 8 dargestellt. Es zeigt sich unter etwa 4.000 h/a ein deutlicher Anstieg der spezifischen Stromgestehungskosten. Zu empfehlen sind bei Biomasse-KWK-Anlagen jährliche Volllaststunden von > 6.000 h/a. Eine korrekte Dimensionierung der Biomasse-KWK-Anlage zur Grundlastabdeckung auf Basis des Wärmebedarfs (Jahresdauerlinie) stellt daher eine Grundvoraussetzung zur Erreichung eines wirtschaftlichen Betriebes dar.

Der Einfluss des Brennstoffpreises auf die spezifischen Stromgestehungskosten ist in Bild 9 dargestellt. Variiert man den Brennstoffpreis um $\pm 20\%$, ergibt sich eine Änderung der spezifischen Stromgestehungskosten von nur rund $\pm 3,6\%$. Der Einfluss des Brennstoffpreises ist somit relativ gering.

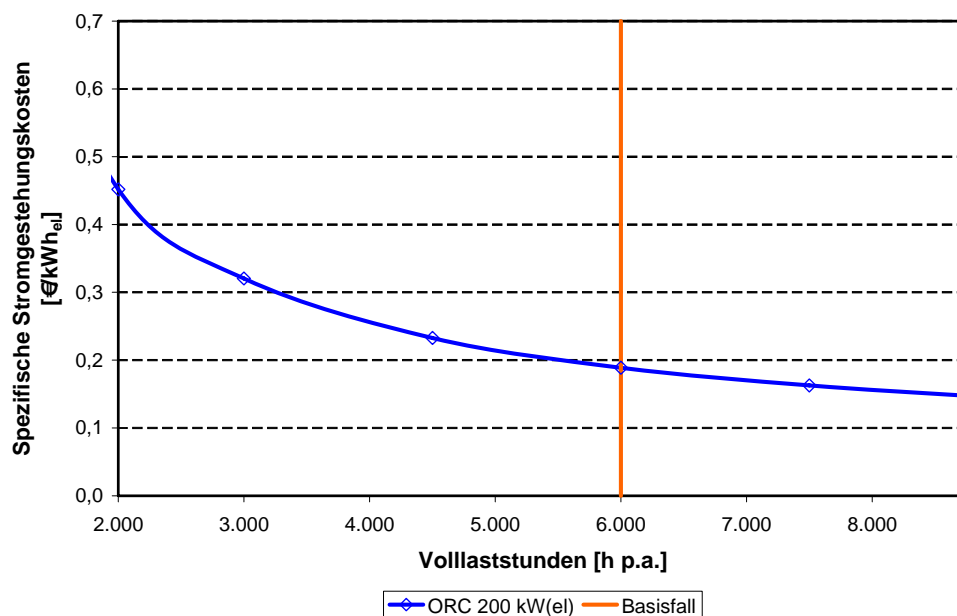


Bild 8: Spezifische Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Volllaststunden

In Bild 10 sind die spezifischen Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Investitionskosten dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Reduktion der Gesamtinvestitionskosten um 10% die spezifischen Stromgestehungskosten um rund 6,4% sinken. Die Gesamtinvestitionskosten haben somit einen relativ großen Einfluss auf das wirtschaftliche Ergebnis. Es erscheint daher wichtig und zielführend, dass auch für den Thermoölkessel sowie den Thermoölkreislauf ähnliche Kompaktlösungen erarbeitet werden wie für das neue Klein-ORC-Modul.

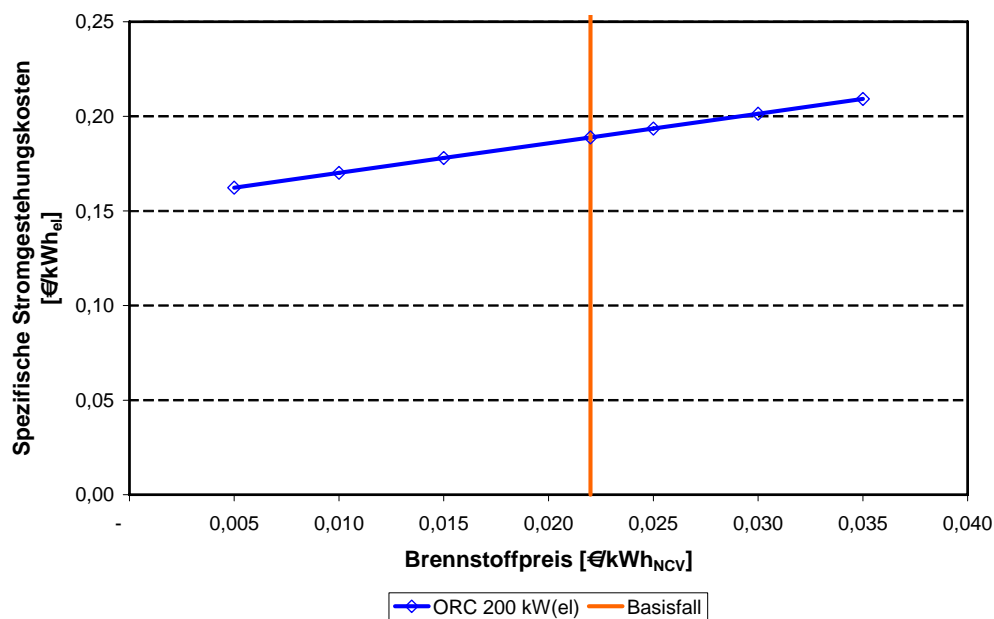


Bild 9: Spezifische Stromgestehungskosten in Abhängigkeit des Brennstoffpreises

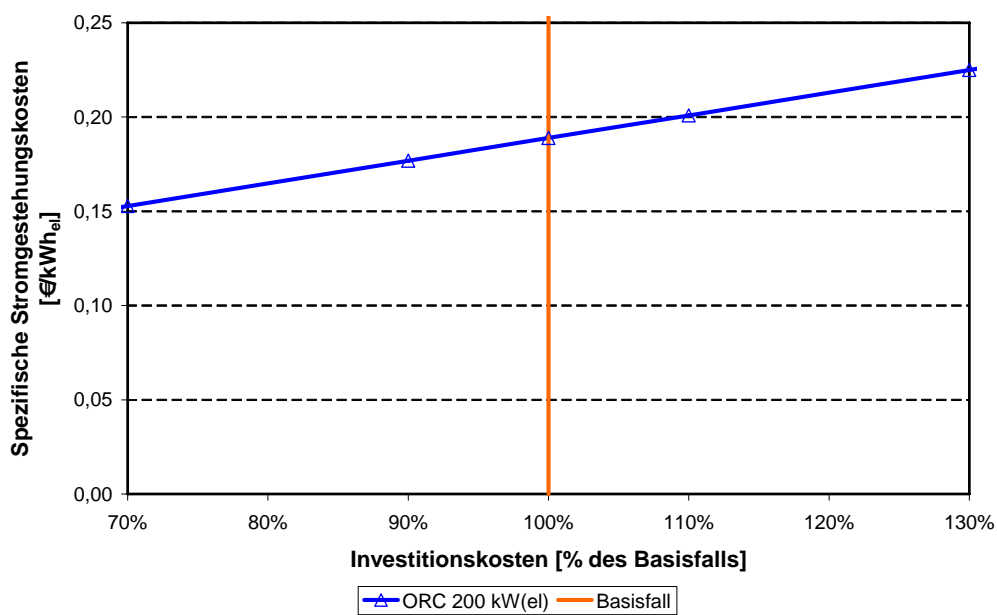


Bild 10: Spezifische Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Investitionskosten

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der ORC-Prozess und seine Anbindung an die Biomassefeuerungsanlage stellt eine dem Stand der Technik entsprechende Technologie dar, die bereits mehrfach erfolgreich realisiert wurde. Durch die Entwicklung des neuen 200 kW_e-Moduls wird das Leistungsspektrum der ORC-Technologie nach unten vergrößert und diese Technologie einem deutlich breiteren

Anwenderkreis geöffnet. Gerade im Leistungsbereich von 100 bis 400 kW_{el} ist ein interessantes und großes Marktpotential für Biomasse-KWK-Anlagen gegeben, das bisher nicht genutzt werden konnte. Die Anwendungsgebiete der neuen 200 kW_{el} ORC-Technologie liegen im Bereich der Prozess- und Fernwärmesysteme. Ein weiteres und interessantes Anwendungsgebiet der neuen ORC-Technologie ist die Abwärmenutzung in Blockheizkraftwerken.

Um eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Technologie zu realisieren, wurden verschiedene Komponenten des ORC-Prozesses optimiert sowie das Modul sehr kompakt gestaltet. Die erste KWK-Anlage, die auf der neuen 200 kW_{el} ORC-Technologie basiert, ging Ende 2007 in St. Walburg, Südtirol, in Betrieb. Weitere 4 Anlagen befinden sich derzeit in Planung bzw. Realisierung. Erste Betriebserfahrungen zeigen, dass das 200 kW_{el}-Modul bereits eine hohe Technologiereife erlangt hat.

Durchgeführte Wirtschaftlichkeitsrechnungen belegen, dass unter deutschen wie auch italienischen Rahmenbedingungen die neue Klein-ORC-Technologie wirtschaftlich betrieben werden kann. In Österreich rechnen sich derartige Anlagen aufgrund der derzeit gültigen niedrigen Stromeinspeisetarife nur, wenn zusätzliche Investitionskostenförderungen lukriert werden können. Ein Optimierungspotential bezüglich der Investitionskosten derartiger Klein-KWK-Anlagen ist noch in der Entwicklung von Thermoöl-Kompaktsystemen gegeben, um auch die damit verbundenen Investitionskosten entsprechend zu reduzieren.

Literatur

- [1] EUROPEAN COMMISSION, 2004: Electricity From Renewable Energy Sources. European Commission, Directorate-General for Energy and Transport, Brussels, ISBN 92-894-6666-9, http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/index_en.html
- [2] EEA, 2008: Share of renewable electricity in gross electricity consumption in EU-27 in 2005 (and 2010 indicative targets), European Environment Agency, Copenhagen, Denmark; <http://dataservice.eea.europa.eu/atlas/viewdata/viewpub.asp?id=3396> [23. Juli 2008]
- [3] Angelino, G., Gaia, M., Macchi, E., 1984: 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
- [4] Bini, R.; Gaia, M.; Girardi, P.; Sabatelli, F., 1996: 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

- [5] Obernberger, I., 2003: 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
- [7] Obernberger I., Gaia M., Biedermann F., 2005: Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des ORC-Prozesses – Stand der Technik und Möglichkeiten der Prozessoptimierung. In: Tagungsband zur internat. Konferenz „Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen“, Juni 2005, Salzburg, Austria, VDI-Bericht Nr. 1891, ISSN 0083-5560, ISBN 3-18-091891-8, pp. 131-148, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf (ed), Germany
- [8] Richtlinie VDI 2067, 1983: Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen - Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland
- [9] Bundesgesetzblatt Nr. 59/2008: Ökostromverordnung 2008; Bundeskanzleramt (Hrsg.), Wien, Österreich
- [10] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien ("Erneuerbare-Energien-Gesetz"), 2008: Verabschiedet vom Deutschen Bundestag am 6. Juni 2008, <http://www.eeg-aktuell.de>