TSB

Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung im

ITB

Modellstudie zu einem Holz-Heizkraftwerk am Beispiel der Firma Tombers-Hartholz GmbH

Auftraggeber	SGD Süd Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Abt. D Hauptstraße 16 67705 Trippstadt

Auftragnehmer	Institut für Innovation, Transfer und Beratung GmbH	
	Leiter:	Prof. Dr. G. Schaumann
	Bearbeiter/in:	Dipl.-Ing. (FH) Jörg Wirtz Telefon: 06721 / 409 229
		Dipl.-Ing. (FH) Kerstin Kriebs Telefon: 06721 / 409 218
	Telefax:	06721 / 409 129
	Homepage:	http://tsb.fh-bingen.de

Projektnummer:	731
Datum:	24.11.2003

Dipl.-Ing. (FH) Kerstin Kriebs | Dipl.-Ing. (FH) Jörg Wirtz | Prof. Dr. G. Schaumann

Inhalt

Einleitung 3
1 Ist-Analyse 4
2 Vorstellung der KWK-Anlagen 6
2.1 Dampfprozess 6
2.2 ORC-Prozess 8
2.3 Holzgas-Motorheizkraftwerk 10
3 Auslegung der KWK-Anlagen 12
4 Energiebilanz 13
5 Kohlendioxid-Emissionsbilanz 14
6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 16
7 Sensitivitätsbetrachtung 23
8 Möglichkeiten zur effizienten Wärmenutzung mit KWK-Anlagen 24
9 Zusammenfassung 25
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 27

Einleitung

Die Studie untersucht am Beispiel der Firma Tombers Hartholz GmbH in Mehren Realisierungsmöglichkeiten einer Kraft-Wärme-Kopplung mit dem Brennstoff Holz.

Das Unternehmen betreibt am Standort Mehren in der Eifel ein Sägewerk für Laubhölzer. Zur Wärmeversorgung der Dämpf- und Trockenkammern sowie zur Beheizung der Produktions- und Lagerhallen und des Verwaltungsgebäudes ist eine Holzfeuerungsanlage installiert. Um die Spitzenlastabdeckung und einen Notbetrieb zu ermöglichen, wurde nachträglich ein erdgasbefeuerter Heizkessel installiert. Das naturbelassene Restholz aus der Produktion wird als Brennstoff für den Biomassekessel eingesetzt.

Um den Brennstoff Holz effizienter zu nutzen, entstand die Überlegung in der Firma Tombers Hartholz GmbH, eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage zu errichten. Dazu untersucht die Studie entsprechende Technologien, die für den Brennstoff Holz am Markt verfügbar sind. Hierzu zählen der Dampfprozess, der ORC-Prozess und ein Holzgas-MHKW, deren Technik in der Studie dargestellt werden.

Die Ist-Analyse ermittelt anhand von zur Verfügung gestellten Daten den Wärmebedarf und das Brennstoffpotential. Darauf basieren die weiteren Berechnungen zur Energie- und Kohlendioxid-Emissionsbilanz für die unterschiedlichen KWK-Anlagen. In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die jährlichen Kapital-, Verbrauchs- und Betriebskosten sowie die Einnahmen aus der Stromeinspeisung ermittelt.

Um eine optimale Brennstoffausnutzung zu ermöglichen, wird geprüft, welche Bedingungen für eine effiziente Wärmenutzung der KWK-Anlagen erforderlich sind. Dazu liegt der Schwerpunkt auf der Anpassung von Temperaturniveaus auf die jeweiligen Wärmeverbraucher. Außerdem wird untersucht, ob die Abwärme der KWK-Anlagen zur Brennstofftrocknung eingesetzt werden kann.

Eine abschließende Zusammenfassung stellt die Ergebnisse der Studie dar, sodass sie als Grundlage zur weiterführenden Planung hinsichtlich einer Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Holz herangezogen werden kann.

1 Ist-Analyse

Zur Wärmeversorgung der Betriebsgebäude einschließlich der Dämpf- und Trockenkammern in der Produktion ist ein Biomassekessel und ein erdgasbefeuerter Heizkessel installiert. Der Erdgaskessel dient als Spitzenlastkessel und Notversorgung.

	Biomassekessel	Erdgaskessel
Fabrikat	Mawera	
Bezeichnung	FU 3000 RA	
Baujahr	1996	2001
Nennwärmeleistung	3.000 kW_{th}	850 kW_{th}

Tabelle 1-1 Daten zur installierten Heizungsanlage

Die Wärmeverbraucher benötigen folgende Wärmeleistung.

Dämpfkammer, alt	300 kW_{th}
Trockenkammer 1	64 kW_{th}
Trockenkammer 2	290 kW_{th}
Trockenkammer 3	162 kW_{th}
Trockenkammer 4	500 kW_{th}
Trockenkammer 5	500 kW_{th}
Trockenkammer 6	290 kW_{th}
Kondenstrockner	40 kW_{th}
Vakuumtrockner	58 kW_{th}
Vortrockner 1-4	1.050 kW_{th}
Vorkammer 4-5	500 kW_{th}
Dämpfkammer, neu	300 kW_{th}
Summe für Produktion	4.054 kW_{th}
Betriebsgebäude (Halle 1-2)	900 kW_{th}
Hobelhalle	300 kW_{th}
Besäumhalle	300 kW_{th}
Lagerhalle	300 kW_{th}
Lagerhalle1	60 kW_{th}
Lagerhalle 2	120 kW_{th}
Lagerhalle 3	180 kW_{th}
Summe für Raumwärme	2.160 kW_{th}

Tabelle 1-2 Wärmeleistungen der Wärmeverbraucher

Um den maximalen Wärmeleistungsbedarf möglichst niedrig zu halten, werden nicht alle Dämpf- und Trockenkammern gleichzeitig betrieben. Unter der Annahme, dass drei Kammern gleichzeitig in Betrieb sind und diese jeweils eine notwendige Wärmeleistung von 100 %, 50 % und 20 % der maximalen Heizleistung zeitgleich benötigen, ergibt sich ein maximaler Heizleistungsbedarf für die Produktion von ca. 2.300 kW_{th}. Dies entspricht einem Gleichzeitigkeitsfaktor von etwa 57 %. Die Wärmeleistung von 2.300 kW_{th} stellt die Grundlast für den ganzjährigen Betrieb dar.

Für die Beheizung der Betriebsgebäude liegt eine Wärmeleistung von etwa 2.200 kW_{th} vor. Daraus resultiert ein Gesamtwärmeleistungsbedarf von rund 4.500 kW_{th}, was der Spitzenlast entspricht.

Mit einer installierten Gesamtheizleistung von 3,85 MW_{th} kann die Spitzenlast nicht abgedeckt werden.

Zur Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfs wird der derzeitige Brennstoffverbrauch mit dem Jahresnutzungsgrad des Biomassekessels herangezogen. Die zusätzliche Wärmeerzeugung durch den Erdgaskessel wird abgeschätzt.

Brennstoffverbrauch Holz	5.000	t/a
Heizwert Holz (50 % Holzfeuchte)	3,2	kWh_{Hu}/kg
Brennstoffenergie Holz	16.000	MWh_{Hu}/a
Jahresnutzungsgrad Biomassekessel	85	%
Wärmeerzeugung Biomassekessel	**13.600**	**MWh_{th}/a**
Wärmeleistung Biomassekessel	3	MW_{th}
Vollbenutzungsstunden Biomassekessel	4.533	h/a
Wärmeleistung Erdgaskessel	0,85	MW_{th}
Wärmeerzeugung Erdgaskessel	**200**	**MWh_{th}/a**
Vollbenutzungsstunden Erdgaskessel	235	h/a
Jahresnutzungsgrad Erdgaskessel	90	%
Brennstoffverbrauch Erdgas	222	MWh_{Hu}/a
Heizwert Erdgas	10	kWh_{Hu}/m^3
Brennstoffmenge Erdgas	22.222	m^3
Jahresheizwärmebedarf	**13.800**	**MWh_{th}/a**
Heizleistungsbedarf	**4,5**	**MW_{th}**

Tabelle 1-3 Überschlägige Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfs

Nach Angaben der Firma Tombers Hartholz GmbH beträgt die jährliche Menge an naturbelassenem Restholz aus der Produktion 13.500 fm/a. Durch die Mischung der unterschiedlichen Resthölzer wird eine mittlere Holzfeuchte von 50 % angenommen. Das Restholz entspricht einer Masse von 13.770 t/a mit einem Energieinhalt von ca. 44.064 MWh_{Hu}/a und steht als Brennstoff zur Verfügung.

2 Vorstellung der KWK-Anlagen

Die verschiedenen KWK-Anlagen, die auf dem Brennstoff Holz basieren, werden zunächst kurz vorgestellt.

2.1 Dampfprozess

Zur Stromerzeugung aus Biomasse mit Dampfturbinen wird die Wärme, die bei der Biomasseverfeuerung entsteht, zur Dampferzeugung in einem Dampfkessel eingesetzt. Der Dampf wird einer Dampfturbine zugeführt, die mechanische Energie zum Antrieb eines Generators für die Stromerzeugung bereitstellt. Über einen Wärmetauscher steht Wärme zu Heizzwecken zur Verfügung.

Für einen gleichmäßig hohen Wärmebedarf bietet sich eine Gegendruckturbine an. Der gesamte Abdampf steht zu Heizzwecken zur Verfügung. Je nach Art des Verbrauchers kann Dampf oder Wasser als Wärmeträger mit dem entsprechenden Druck- und Temperaturniveau bereitgestellt werden.

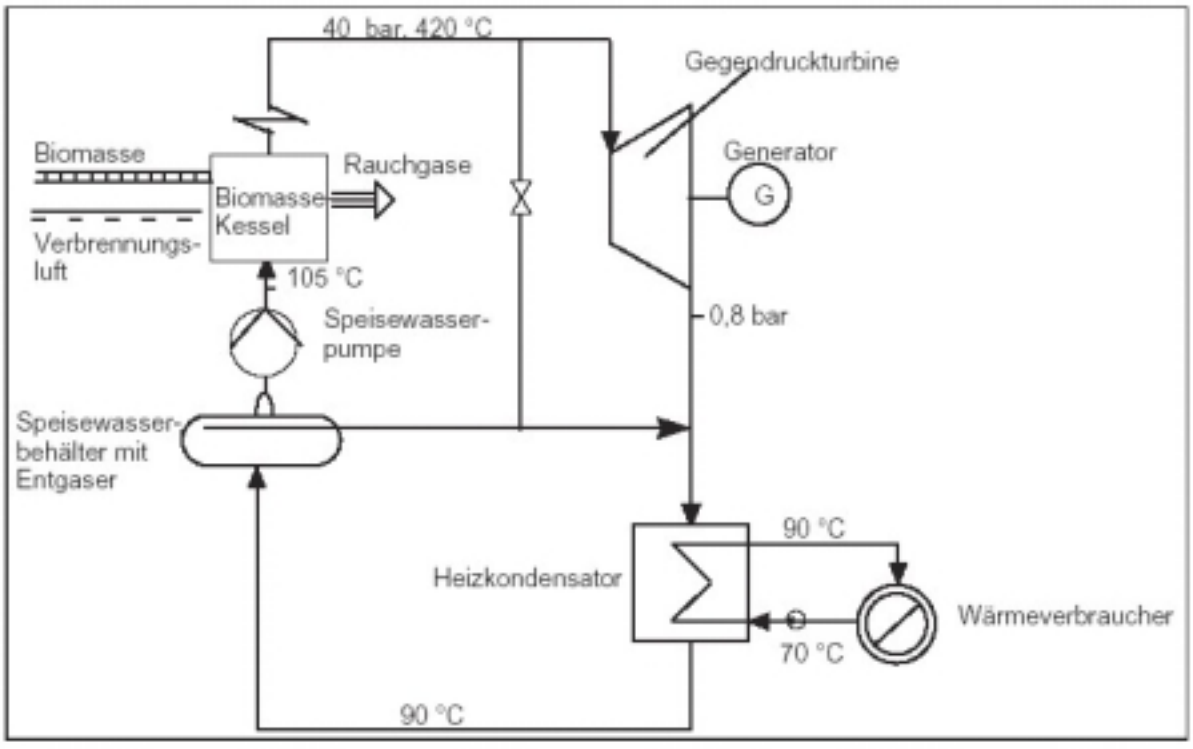

Abbildung 2-1 Schema eines Dampfturbinen-Heizkraftwerks
(Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.)

Zur Zeit wird ein Turbogenerator in einem Leistungsbereich von 500 kW_{el} an der TU Dresden zusammen mit Industriepartnern u. a. AG KK&K entwickelt, der zu Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden soll. Zwischen Turbine und Generator befindet sich kein mechanisches Getriebe, sondern beide sitzen auf einer Welle, sodass der Generator direkt angetrieben wird. Mit einer Leistungselektronik wird die Drehzahl stufenlos geregelt, sodass auch bei Teillast eine optimale Drehzahl eingestellt werden kann. Aufgrund dessen wird ein um etwa 10 % verbesserter Wirkungsgrad im Teillastbereich erwartet. Durch die Einsparung eines Getriebes verringert sich zusätzlich der Platzbedarf der Anlage. Da diese KWK-Anlage noch nicht verfügbar ist, beruhen die weiteren Untersuchungen auf einer konventionellen Turbine.

Aufgrund des Brennstoffs Holz werden nicht der Druck und die Temperatur wie bei fossil befeuerten Dampfkesseln erreicht, sodass sich ein geringerer elektrischer Wirkungsgrad ergibt. Durchschnittlich erzielen solche Anlagen einen elektrischen Wirkungsgrad von 10 % bis zu 20 % im Gegendruckbetrieb.

Die Dampfturbinen in Kombination mit Biomassekesseln sind meist erst ab mehreren MW_{th} Feuerungswärmeleistung wirtschaftlich. Der Dampfturbinenprozess stellt den Standard der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Biomasseverfeuerung dar. Er wird hauptsächlich in der holzverarbeitenden Industrie eingesetzt.

2.2 ORC-Prozess

Der ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) ist vergleichbar mit einem Wasser-Dampf-Prozess. Im ORC-Prozess wird ein organisches Arbeitsmedium eingesetzt. Es handelt sich um Kohlenwasserstoffe wie z. B. Iso-Pentan, Iso-Oktan, Toluol oder Silkonöl. Sie weisen bei tiefen Temperaturen und Drücken günstigere Verdampfungseigenschaften wie Wasser auf, sodass mit dem ORC-Prozess besser Wärmequellen mit niedrigeren Temperaturniveaus wie z. B. Erdwärme (ca. 80°C bis 150°C) genutzt werden können. Die Auswahl des Arbeitsmediums ist auf einen optimalen Betrieb der ORC-Anlage auszurichten. Für Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist Silikonöl geeignet.

Zur Strom- und Wärmeerzeugung liefert ein Thermoölkessel mit Biomassefeuerung Wärme zur Verdampfung des Arbeitsmediums im ORC-Prozess. Der Dampf wird in einer langsamlaufenden Axialturbine entspannt, sodass sie den Generator direkt ohne Getriebe zur Stromerzeugung antreibt. Um den elektrischen Wirkungsgrad zu erhöhen, erfolgt in einem Regenerator eine Wärmerückgewinnung des entspannten Dampfs. Im Kondensator wird die Wärme des Dampfs zu Heizzwecken abgeführt. Sie kann als Prozesswärme oder Fernwärme eingesetzt werden. Eine Pumpe fördert das Kondensat zum Verdampfer, sodass der ORC-Prozess geschlossen ist. Ein Thermoölkessel besitzt gegenüber dem Dampfkessel den Vorteil, dass hohe Temperaturen bei einem drucklosen Betrieb erreicht werden.

Die Rauchgase der Biomassefeuerung können nach der Rauchgasreinigung in einen Rauchgaskondensator zur Wärmerückgewinnung zugeführt werden. Auch diese Wärme steht als Prozess- und Fernwärme zur Verfügung. Die Wärmerückgewinnung ist nach dem ORC-Prozess anzuordnen, damit durch eine niedrige Heißwasser-Austrittstemperatur ein möglichst hoher elektrischer Wirkungsgrad erreicht wird.

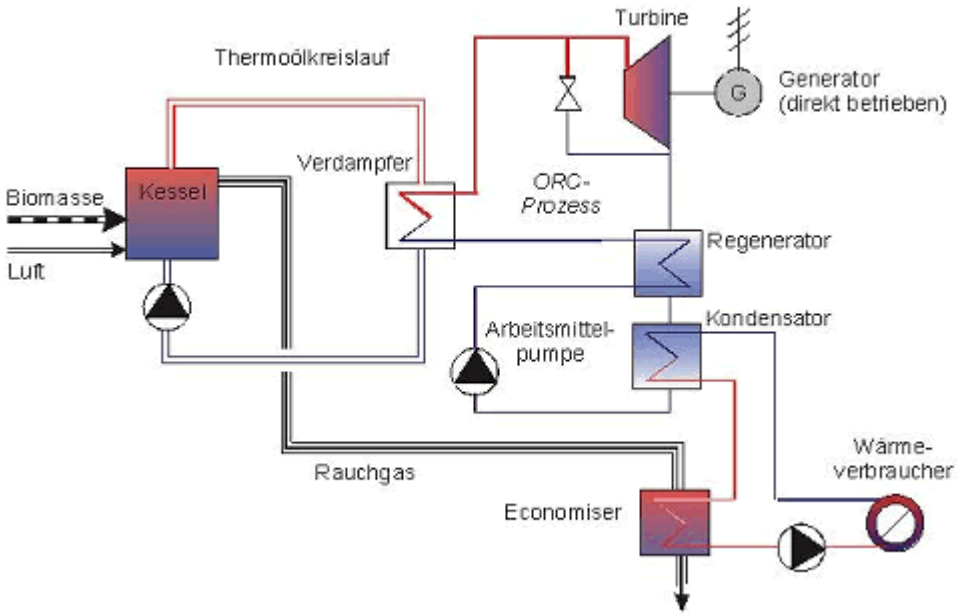

Abbildung 2-2 Schema einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung mit ORC-Prozess
(Quelle: BIOS Bioenergiesystem GmbH, Graz)

Zur Verdampfung des Arbeitsmediums im ORC-Prozess beträgt die Vorlauftemperatur des Thermoöls ca. 300°C (Rücklauftemperatur etwa 250°C). Damit ergibt sich eine Vorlauftemperatur der ausgekoppelten Wärme von ca. 80 bis 100°C und eine Rücklauftemperatur von rund 55 bis 70°C. Mit diesen Temperaturniveaus ist ein elektrischer Wirkungsgrad von 17,7 % bei Nennlast möglich.

Da solche Anlagen in der Regel aus wirtschaftlichen und energetischen Gründen wärmegeführt betrieben werden, beeinflusst das Teillastverhalten des ORC-Prozesses die Stromerzeugung. Durch die langsamlaufende Axialturbine und die thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmediums wird bei 40 % der Nennleistung noch 85 % des elektrischen Wirkungsgrads erreicht. Zwischen 10 und 100 % Nennlast ist ein kontinuierlicher Betrieb des ORC-Prozesses möglich. Der thermische Wirkungsgrad der Anlage beträgt ca. 70 %.

2.3 Holzgas-Motorheizkraftwerk

Ein Holzgas-MHKW erreicht im Vergleich zu anderen KWK-Anlagen auf Basis von Biomasse die höchsten elektrischen Wirkungsgrade.

Als Brennstoff für das Motorheizkraftwerk wird Holzgas eingesetzt, das in einer Holzvergasung entsteht. Dazu werden Holzstücke, Sägespäne, Holzhackschnitzel oder brikettiertes Feinmaterial unterstöchiometrisch oxidiert. Die Vergasung läuft in mehreren Schritten ab. Zuerst verdampft das Wasser. Bei zunehmender Temperatur entweichen die flüchtigen Bestandteile im Holz. Die nicht verbrannte Holzkohle wird bei Temperaturen oberhalb von 1.100°C vergast. Die übrigen Holzkohlepartikel werden aus dem Vergasungsprozess ausgetragen. Für den Einsatz in einem Blockheizkraftwerk ist eine Aufbereitung des Rohgases notwendig. Dazu wird das Rohgas gekühlt, entstaubt und getrocknet. Technische Schwierigkeiten bestehen noch durch den Teergehalt bei der Holzvergasung.

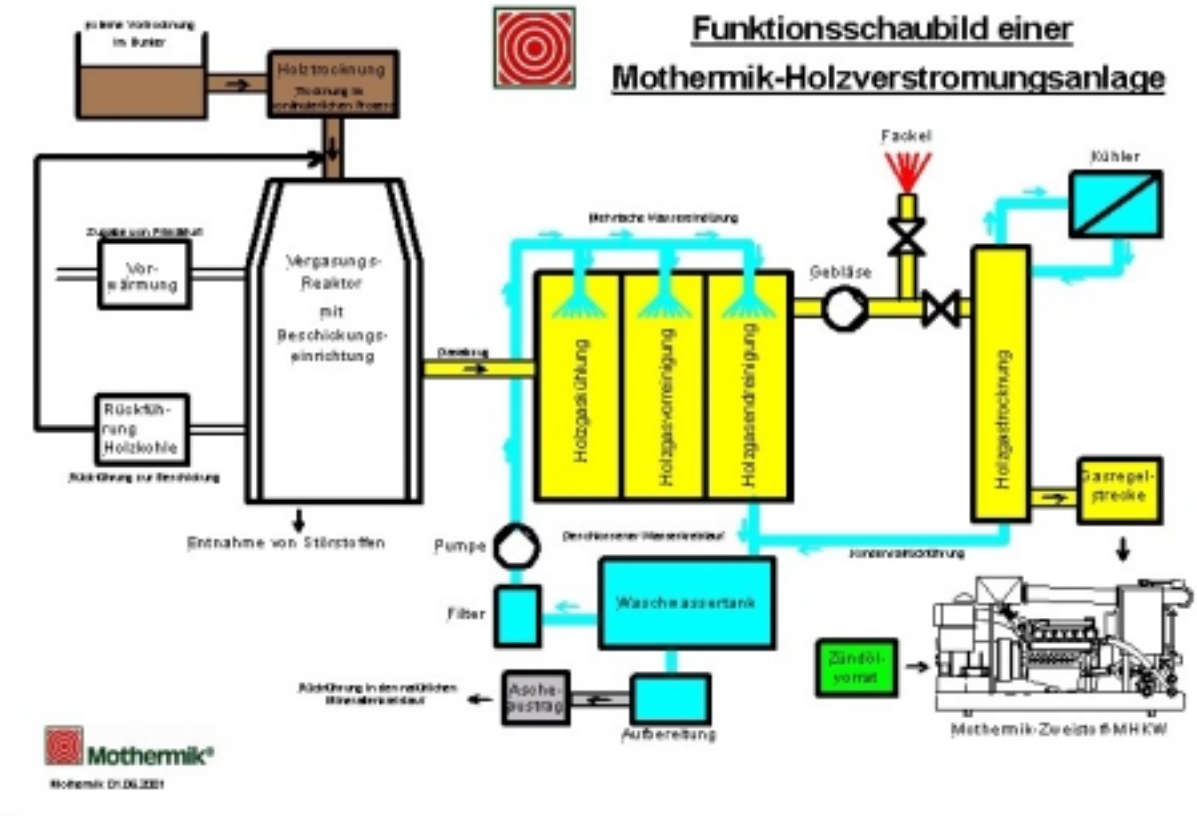

Abbildung 2-3 Schema einer Holzvergasung in Verbindung mit einem MHKW
(Quelle: Fa. Mothermik, Pfalzfeld)

Für den Einsatz in einem Motorheizkraftwerk sollte weniger als 50 mg Teer in einem m³ Holzgas enthalten sein. Um dies zu erreichen, werden moderne Vergasungsverfahren zur Reduzierung der Teerbildung eingesetzt. Mit einem katalytischen Reformer können die im Holzgas enthaltenen Teere in Brenngas umgewandelt werden.

Das Holzgas wird zur Strom- und Wärmeerzeugung einem Motorheizkraftwerk zugeführt. Da für die Zündung eine bestimmte Menge Heizöl benötigt wird, erfolgt die Verbrennung des Holzgases in einem Zweistoffmotor. Alternativ kann auch ein Otto-Motor, der nur mit dem Holzgas betrieben wird, mit vorausgesetzter Zündfähigkeit des Holzgases zum Einsatz kommen. Die vom Motor gelieferte mechanische Arbeit wird im Generator in elektrische Arbeit umgewandelt. Der erzeugte Strom kann entweder ins öffentliche Netz eingespeist oder zum Eigenverbrauch verwendet werden.

Die Wärme der Abgase und des Motorkühlwassers ist über Wärmetauscher zu Heizzwecken einsetzbar. Außerdem kann Abwärme zur Brennstofftrocknung eingesetzt werden.

Da aus der Produktion hauptsächlich trockenes Holz anfällt, ist durch Mischen des geringen Anteils an feuchtem Holz mit dem trockenen Holz eine Brennstofftrocknung nicht zwingend notwendig.

3 Auslegung der KWK-Anlagen

Der vorhandene Biomassekessel und Erdgaskessel können die Abdeckung der Spitzenlast nicht gewährleisten. Außerdem wird im Falle einer Produktionserweiterung eine höhere Wärmeleistung der Heizungsanlage erforderlich.

Um möglichst hohe Vollbenutzungsstunden der KWK-Anlagen zu erzielen, sind diese nach der Wärmeleistung der Grundlast auszulegen. Die derzeitige Grundlast beträgt 2,3 MW_{th}. Mit einer thermischen Leistung der KWK-Anlage von ca. 2 bis 3 MW_{th} ist eine Reserveleistung für eine mögliche Produktionserweiterung berücksichtigt.

Zusammen mit dem vorhandenen Biomassekessel stehen somit etwa 5 bis 6 MW_{th} zur Verfügung, sodass der installierte Erdgaskessel mit 850 kW_{th} nicht mehr zur Spitzenlastabdeckung benötigt wird. Dies vermeidet die hohen Brennstoffkosten für Erdgas im Spitzenlastbetrieb. Außerdem steht mit einem derzeitigen Wärmeleistungsbedarf von 4,5 MW_{th} gegenüber der neu installierten Heizleistung von rund 5,5 bis 6 MW_{th} etwa 1 MW_{th} Heizleistung als Reservekapazität für eine Erhöhung des Wärmebedarfs durch die Produktion bzw. Trockenkammern zur Verfügung.

In den weiteren Betrachtungen werden folgende KWK-Anlagen mit den zugehörigen Kennwerten zu Grunde gelegt.

		Dampfturbine	ORC-Anlage	Holzgas-MHKW
thermische Leistung	MW_{th}	2.654	2.536	1.884
elektrische Leistung	MW_{el}	500	500	1.000
thermischer Wirkungsgrad	%	69	71	48
elektrischer Wirkungsgrad	%	13	14	27
Gesamteffizienz	%	82	85	75

Tabelle 3-1 Kenndaten der KWK-Anlagen

4 Energiebilanz

Die Energiebilanz für die verschiedenen Technologien beruhen auf den Werten des zuvor ermittelten Wärmebedarfs. Sie berechnet die umgesetzten Energie- und Brennstoffmengen, die als Ergebnisse in den Tabellen aufgeführt sind.

		Biomassekessel + Dampfturbine	Biomassekessel + ORC-Anlage	Biomassekessel + Holzgas-MHKW
Heizleistungsbedarf	kW_{th}	4.500	4.500	4.500
Jahresheizwärmebedarf	MWh_{th}/a	13.800	13.800	13.800
Wärmeleistung Biomassekessel	kW_{th}	3.000	3.000	3.000
therm. Leistung KWK-Anlage	kW_{th}	2.654	2.536	1.884
Gesamtwärmeleistung	kW_{th}	5.654	5.536	4.884
elektr. Leistung KWK-Anlage	kW_{el}	500	500	1.000
Vollbenutzungsstunden				
Biomassekessel	h/a	1.500	1.500	1.500
KWK-Anlage	h/a	8.000	8.000	8.000
Wärmeerzeugung Biomassekessel	MWh_{th}/a	4.500	4.500	4.500
Wärmeerzeugung KWK-Anlage	MWh_{th}/a	21.231	20.286	15.076
Gesamtwärmeerzeugung	MWh_{th}/a	25.731	24.786	19.576
Überschusswärme	MWh_{th}/a	11.931	10.986	5.776
Jahresnutzungsgrad Biomassekessel	%	85	85	85
therm. Wirkungsgrad KWK-Anlage	%	69	71	48
elektr. Wirkungsgrad KWK-Anlage	%	13	14	27
Brennstoffbedarf Restholz gesamt	MWh_{Hu}/a	36.063	33.866	36.702
Brennstoffmenge Restholz gesamt	t/a	11.270	10.583	11.469
jährliche Restholzmenge	t/a	13.770	13.770	13.770
Restmenge	t/a	2.500	3.187	2.301
Brennstoffbedarf Heizöl	MWh_{Hu}/a			1.600
Brennstoffmenge Heizöl	l/a			160.000

Tabelle 4-1 Energiebilanz der KWK-Anlagen

Durch den Einsatz der KWK-Anlagen wird durch hohe Vollbenutzungsstunden mehr Wärme erzeugt als im Betrieb benötigt wird.

5 Kohlendioxid-Emissionsbilanz

Zur ökologischen Bewertung der KWK-Anlagen wird eine Kohlendioxid-Emissionsbilanz herangezogen.

Unter Anrechnung der CO_2-Neutralität der Biomasse Holz wird für das Restholz im Unternehmen Tombers Hartholz GmbH eine spezifische Kohlendioxid-Emission von 0 g CO_2/kWh_{BS} angesetzt, da es als Restholz aus der Produktion vorliegt und nicht speziell als Brennstoff hergestellt wird. Die KWK-Anlagen erzeugen Strom, der Strom aus Kraftwerken verdrängt, sodass global gesehen die entsprechenden Kohlendioxid-Emissionen vermieden werden.

In der Tabelle sind zusätzlich die derzeitigen Kohlendioxid-Emissionen aufgeführt, um das Einsparpotential durch die KWK-Anlagen zu verdeutlichen.

		Ist-Zustand	Biomassekessel + Dampfturbine	Biomassekessel + ORC-Anlage	Biomassekessel + Holzgas-MHKW
Brennstoffbedarf Holz	MWh_{Hu}/a	16.000	36.063	33.866	36.702
Brennstoffbedarf Erdgas	MWh_{Hu}/a	222			
Brennstoffbedarf Heizöl	MWh_{Hu}/a				1.600
Stromerzeugung	MWh_{el}/a		4.000	4.000	8.000
spez. CO_2-Emission Holz	kg CO_2/MWh_{Hu}	0	0	0	0
spez. CO_2-Emission Erdgas	kg CO_2/MWh_{Hu}	254			
spez. CO_2-Emission Heizöl	kg CO_2/MWh_{Hu}				318
spez. CO_2-Emission Strom	kg CO_2/MWh_{Hu}		683	683	683
CO_2-Emission	t CO_2/a	56	-2.730	-2.730	-4.952

Tabelle 5-1 Kohlendioxid-Emissionsbilanz

Global betrachtet sparen die KWK-Anlagen mehr Kohlendioxid-Emissionen ein als bisher emittiert werden.

Zur Veranschaulichung sind die Ergebnisse in einem Diagramm abgebildet.

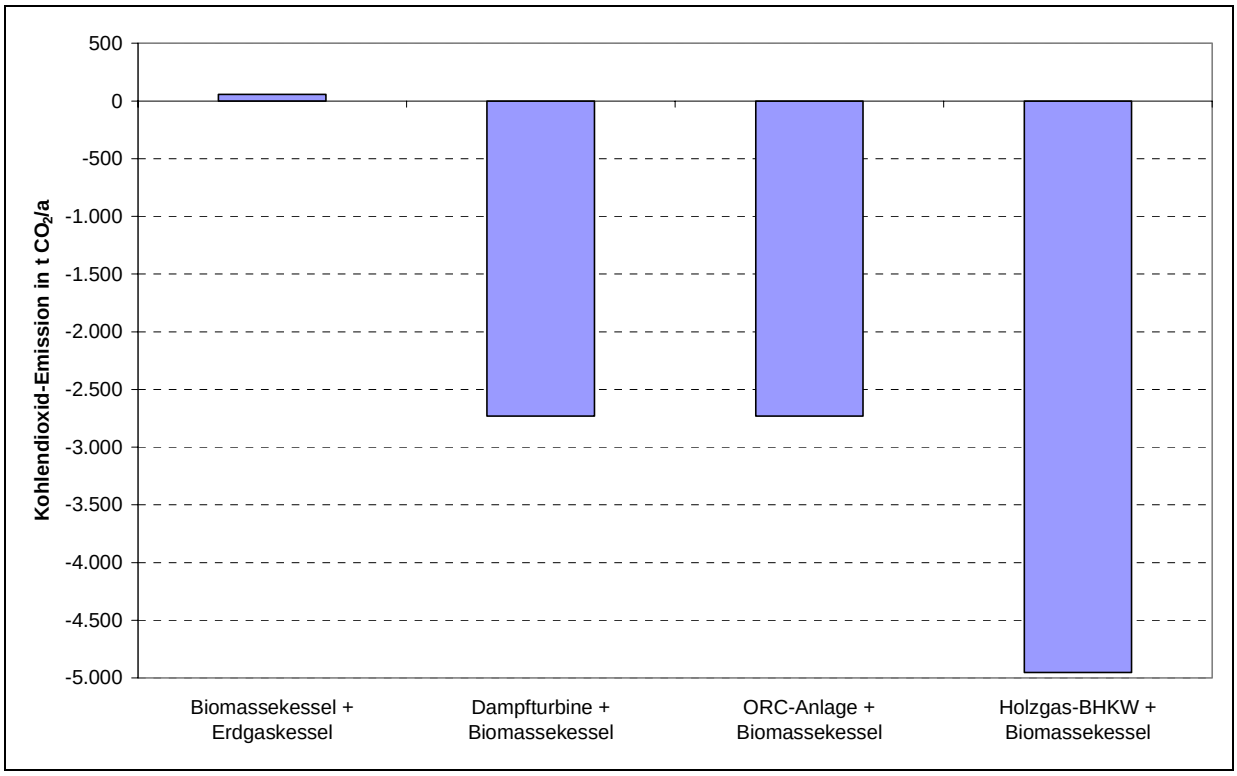

Abbildung 5-1 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der KWK-Anlagen

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die Jahreskosten und die Wärmepreise der Anlagenvarianten anhand von Kapital-, Verbrauchs- und Betriebskosten in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 berechnet. Zusätzlich zu den Kosten ergeben sich für die KWK-Anlagen Einnahmen durch die Stromvergütung. Die Jahresgesamtkosten berechnen sich aus den jährlichen Kosten und den Einnahmen. Der Wärmepreis gibt das Verhältnis der Jahreskosten in Bezug auf den Wärmebedarf wieder.

Es besteht die Möglichkeit, einen zinsgünstigen Kredit im „Programm zur Förderung Erneuerbarer Energien“ der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) zu beantragen. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird dazu ein Zinssatz von 4,0 % zu Grunde gelegt, der für die ersten 10 Jahre fest ist. Die Laufzeit des zinsgünstigen Kredits beträgt maximal 20 Jahre mit maximal 3 tilgungsfreien Anlaufjahren.

Abhängig vom rheinland-pfälzischen Haushalt können nach der Verwaltungsvorschrift „Förderung erneuerbarer Energien“ für die Errichtung von Anlagen zur energetischen Nutzung fester Biomasse in KWK-Anlagen Fördermittel in Höhe von 275 €/kW_{el} und maximal 300.000 € je Anlage bzw. 20 % der förderfähigen Kosten beantragt werden.

Aufgrund des Einsatzes einer innovativen Technik zur Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse Holz stellt es sich als ein besonders förderungswürdiges Pilotprojekt dar.

Rahmenbedingungen

Bestimmung kapitalgebundene Kosten:

Zinssatz (KfW-Programm Erneuerbare Energien)	4 %
Abschreibungsdauer Maschinentechnik	15 Jahre
Abschreibungsdauer Versorgungstechnik	20 Jahre
Abschreibungsdauer Bautechnik	30 Jahre
Abschreibungsdauer Planung, Unvorhergesehenes	15 Jahre

Bestimmung verbrauchsgebundene Kosten:

spezifischer Restholzpreis	0 €/t (inkl. MwSt.)
spezifischer Heizölpreis	0,32 €/l (inkl. MwSt.)
Allgemeiner Strompreis	10 Ct/kWh_{el} (inkl. MwSt.)

Bestimmung betriebsgebundene Kosten:

Wartung / Instandhaltung Heizkessel	2 % der Investition (Heizanlage)
Wartung / Instandhaltung Dampfturbine	2 Ct/kWh_{el}
Wartung / Instandhaltung ORC-Anlage	0,75 Ct/kWh_{el}
Wartung / Instandhaltung Holzvergasung + MHKW	2 Ct/kWh_{el}
Personalkosten	40 €/h

Bestimmung Stromvergütung:

Nach dem EEG (Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien) erhalten KWK-Anlagen für Strom aus Biomasse bis einschließlich einer installierten elektrischen Leistung von 500 kW_{el} mindestens 10,2 Ct/kWh_{el} und für eine elektrische Leistung zwischen 500 und 5.000 kW_{el} mindestens 9,2 Ct/kWh_{el} Stromvergütung. Die Mindestvergütung wird ab dem 01. Januar 2002 für mit diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen jährlich um jeweils einen Prozentpunkt herabgesetzt.

Nach dem Entwurf zur Novellierung des EEG Stand 12.08.2003 beträgt die Vergütung von KWK-Anlagen mit Biomassefeuerung von 200 bis 500 kW_{el} 9,9 Ct/kWh_{el} , während Anlagen mit 500 bis 5.000 kW_{el} 8,9 Ct/kWh_{el} erhalten. Die Mindestvergütung erhöht sich um 2,5 Ct/kWh_{el} für diese Anlagen, wenn der Strom ausschließlich aus Biomasse erzeugt wird. Weiterhin erhöht sich die Mindestvergütung um 1 Ct/kWh_{el}, wenn die Biomasse durch thermochemische Vergasung umgewandelt oder der Strom mit Brennstoffzellen, Gasturbinen, Dampfmotoren, Organic-Rankine-Anlagen, Kalina-Cycle-Anlagen oder Stirlingmotoren erzeugt wird. Die Mindestvergütung wird ab dem 1. Januar 2005 für mit diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen jährlich um jeweils zwei Prozent des Vorjahreswertes gesenkt. Anlagen, die ab dem 1. Januar 2006 in Betrieb genommen werden und keine Biomasse für eine Zünd- und Stützfeuerung einsetzen, erhalten keine Mindestvergütung.

technisches System	EEG Stand 2003	Entwurf EEG Novellierung
Dampfturbine 500 kW_{el}	10,0 Ct/kWh_{el}	12,4 Ct/kWh_{el}
ORC-Anlage 500 kW_{el}	10,0 Ct/kWh_{el}	13,4 Ct/kWh_{el}
Holzvergasung + MHKW 1.000 kW_{el}	9,0 Ct/kWh_{el}	12,4 Ct/kWh_{el}

Investition Dampfturbine + Biomasse-Dampfkessel

	Dampfturbine + Biomasse-Dampfkessel (500 kW_{el})
Maschinentechnik	
Dampfturbine mit Biomasse-Dampfkessel und Zubehör inkl. Montage und Inbetriebnahme	1.999.000 €
Versorgungstechnik	
Anbindung an bestehende Heizanlage	32.000 €
Stromnetzanschluss	109.000 €
Bautechnik	
Heizhaus mit Brennstofflager	275.000 €
Planung, Unvorhergesehenes	
Planung, Unvorhergesehenes	242.000 €
Gesamtinvestition	**1.857.000 €**

Tabelle 6-1 Investition Dampfturbine

Investition ORC-Anlage

	ORC-Anlage (500 kW_{el})
Maschinentechnik	
ORC-Anlage mit Zubehör inkl. Montage und Inbetriebnahme	1.037.000 €
Versorgungstechnik	
Anbindung an bestehende Heizanlage	32.000 €
Stromnetzanschluss	109.000 €
Bautechnik	
Heizhaus mit Brennstofflager	275.000 €
Planung, Unvorhergesehenes	
Planung, Unvorhergesehenes	218.000 €
Gesamtinvestition	**1.671.000 €**

Tabelle 6-2 Investition ORC-Anlage

Investition Holzgas-MHKW

	Holzgas-MHKW (1.000 kW_{el})
Maschinentechnik	
Holzvergaser mit MHKW und Zubehör inkl. Montage und Inbetriebnahme	2.068.000 €
Versorgungstechnik	
Anbindung an bestehende Heizanlage	32.000 €
Stromnetzanschluss	109.000 €
Bautechnik	
Heizhaus mit Brennstofflager	400.000 €
Planung, Unvorhergesehenes	
Planung, Unvorhergesehenes	391.000 €
Gesamtinvestition	**3.000.000 €**

Tabelle 6-3 Investition Holzgas-MHKW

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

		Dampfturbine + Biomassekessel	ORC-Anlage + Biomassekessel	Holzgas-MHKW + Biomassekessel
Investition inkl. MwSt.	**€**	**1.857.000**	**1.671.000**	**3.000.000**
Förderung	*€*	*137.500*	*137.500*	*275.000*
Investition inkl. Förderung und MwSt.	***€***	***1.719.500***	***1.533.500***	***2.725.000***
Kapitalkosten inkl. MwSt. *inkl. MwSt. und Förderung*	€/a *€/a*	155.883 *143.517*	139.154 *126.787*	254.672 *229.938*
Verbrauchskosten inkl. MwSt.	€/a	27.600	27.600	60.200
Betriebskosten inkl. MwSt.	€/a	150.193	56.667	186.667
Summe Kosten inkl. MwSt. ***inkl. MwSt. und Förderung***	**€/a** ***€/a***	**333.676** ***321.310***	**223.421** ***211.054***	**501.539** ***476.805***
Gutschrift Stromvergütung	**€/a**	**400.000**	**400.000**	**800.000**
Jahresüberschuss inkl. MwSt. ***inkl. MwSt. und Förderung***	**€/a** ***€/a***	**66.324** ***78.690***	**176.579** ***188.946***	**298.461** ***323.195***
statische Amortisation inkl. MwSt. ***inkl. MwSt. und Förderung***	**a**	**8,4** ***7,7***	**5,3** ***4,9***	**5,4** ***4,9***

Tabelle 6-4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen

Die Dampfturbine erwirtschaftet einen Jahresüberschuss von rund 66.300 €/a bzw. unter Berücksichtigung von Fördermitteln etwa 78.700 €/a, sodass sich eine statische Amortisation von 8,4 bzw. 7,7 Jahren ergibt.

Der Jahresüberschuss der ORC-Anlage beträgt ca. 176.600 €/a bzw. mit Förderung etwa 188.900 €/a. Daraus resultiert eine statische Amortisation von 5,3 bzw. 4,9 Jahren.

Das Holzgas-MHKW erzielt einen Jahresüberschuss von rund 298.500 €/a bzw. mit Fördermittel ca. 323.200 €/a. Die zugehörige statische Amortisation beträgt 5,4 bzw. 4,9 Jahre.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind zur Veranschaulichung in einem Diagramm dargestellt.

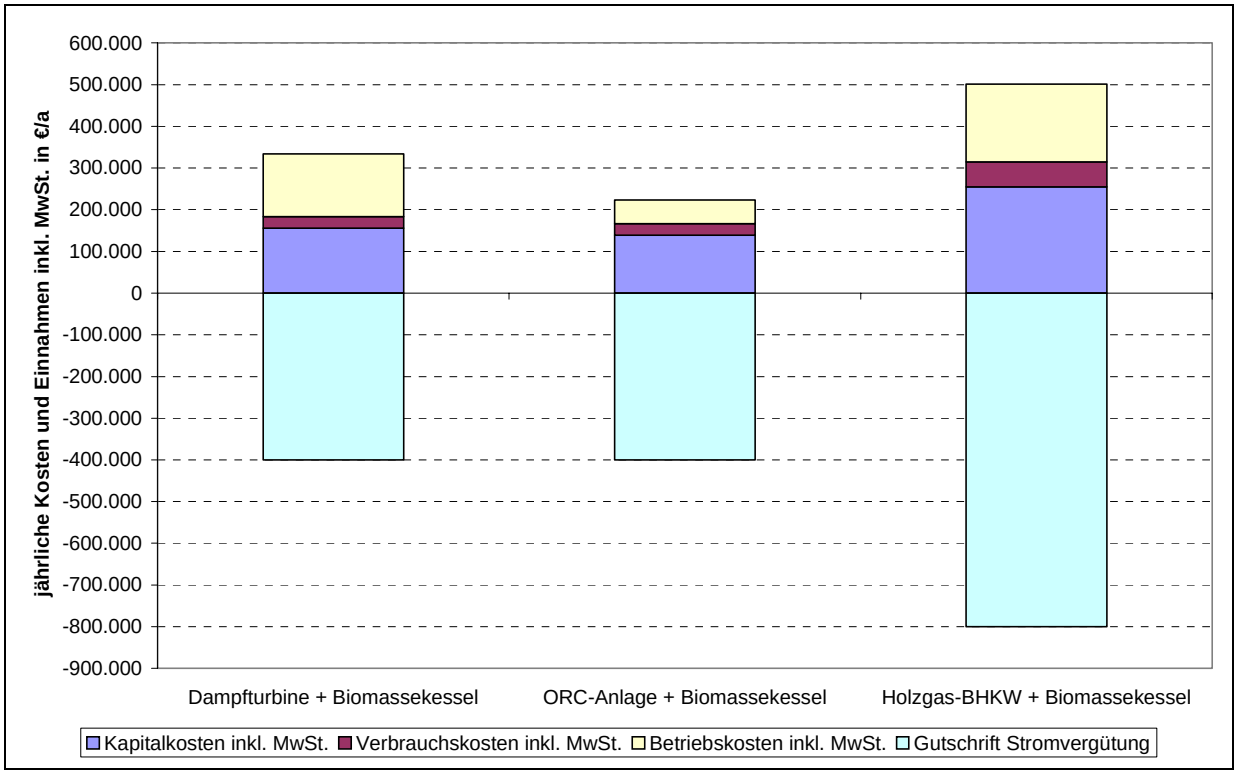

Abbildung 6-1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen

Um die Einspeisevergütung nach dem Entwurf zur Novellierung des EEG vom 12.08.2003 zu berücksichtigen, wird dazu eine entsprechende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

Entwurf EEG Novellierung		Dampfturbine + Biomassekessel	ORC-Anlage + Biomassekessel	Holzgas-MHKW + Biomassekessel
Investition inkl. MwSt.	**€**	**1.857.000**	**1.671.000**	**3.000.000**
Förderung	*€*	*137.500*	*137.500*	*275.000*
Investition inkl. Förderung und MwSt.	***€***	***1.719.500***	***1.533.500***	***2.725.000***
Kapitalkosten inkl. MwSt. *inkl. MwSt. und Förderung*	€/a *€/a*	155.883 *143.517*	139.154 *126.787*	254.672 *229.938*
Verbrauchskosten inkl. MwSt.	€/a	27.600	27.600	60.200
Betriebskosten inkl. MwSt.	€/a	150.193	56.667	186.667
Summe Kosten inkl. MwSt. ***inkl. MwSt. und Förderung***	**€/a** ***€/a***	**333.676** ***321.310***	**223.421** ***211.054***	**501.539** ***476.805***
Gutschrift Stromvergütung	**€/a**	**496.000**	**536.000**	**992.000**
Jahresüberschuss inkl. MwSt. ***inkl. MwSt. und Förderung***	**€/a** ***€/a***	**162.324** ***174.690***	**312.579** ***324.946***	**490.461** ***515.195***
statische Amortisation inkl. MwSt. ***inkl. MwSt. und Förderung***	**a**	**5,8** ***5,4***	**3,7** ***3,4***	**4,0** ***3,7***

Tabelle 6-5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen mit Einspeisevergütung nach Entwurf zur EEG Novellierung

Mit den Einspeisevergütungen nach dem Entwurf zur EEG Novellierung vom 12.08.2003 ergibt sich ein höherer Jahresüberschuss für alle drei KWK-Anlagen.

Für die Dampfturbine stellt sich ein Jahresüberschuss von ca. 162.300 €/a bzw. 174.700 €/a mit Fördermittel ein, sodass sich eine statische Amortisation von 5,8 bzw. 5,4 Jahren ergibt.

Der Jahresüberschuss beträgt für die ORC-Anlage rund 312.600 €/a bzw. 324.900 €/a mit Förderung. Daraus resultiert eine statische Amortisation von 3,7 bzw. 3,4 Jahren.

Das Holzgas-MHKW erreicht einen Jahresüberschuss von etwa 490.500 €/a bzw. 515.200 €/a mit Fördermittel. Die zugehörige statische Amortisation beträgt 4,0 bzw. 3,7 Jahre.

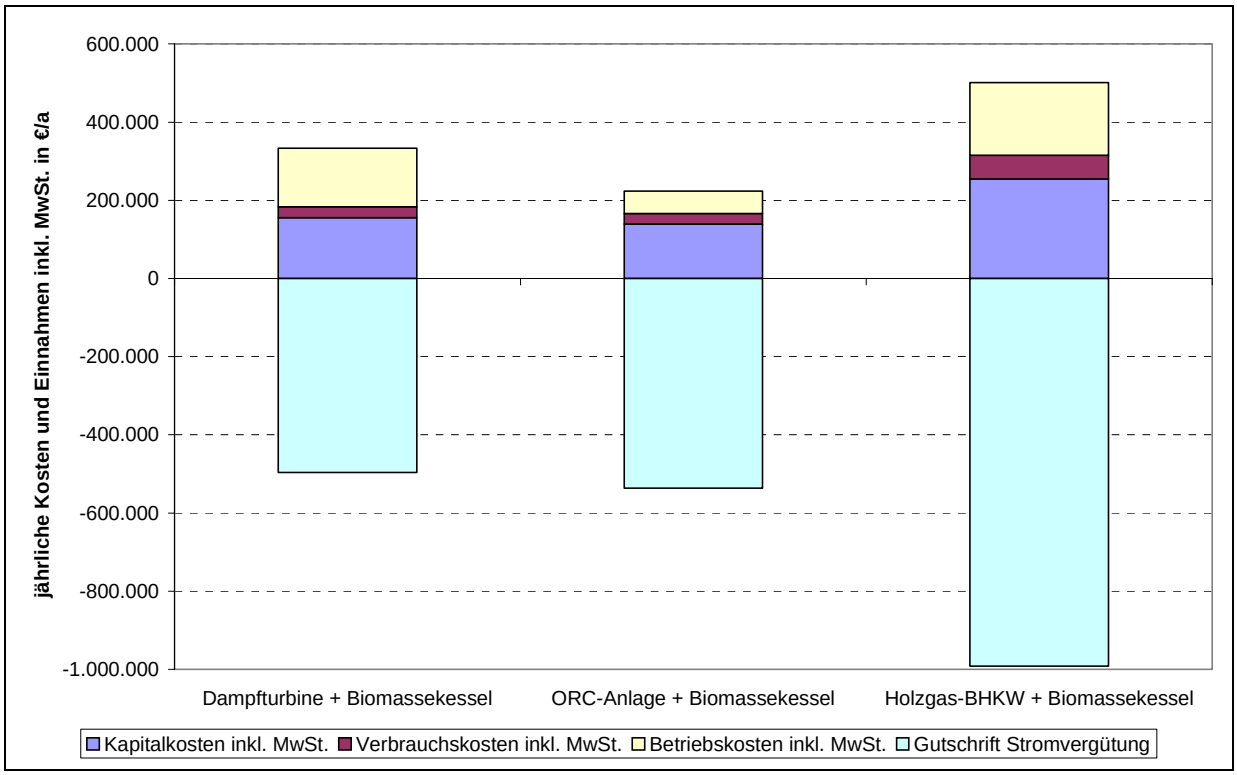

Abbildung 6-2 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen mit Einspeisevergütung nach Entwurf zur EEG Novellierung

7 Sensitivitätsbetrachtung

In der bisherigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird für das Restholz ein Brennstoffpreis von 0 €/t in den Rahmenbedingungen festgelegt. Um auch für andere Werte die Wirtschaftlichkeit zu erfahren, wird eine Sensitivitätsbetrachtung durchgeführt. Dazu wird in Abhängigkeit vom Brennstoffpreis der Jahresüberschuss für die KWK-Anlagen bestimmt. Die Ergebnisse sind in einem Diagramm dargestellt, sodass der gewünschte Wert abgelesen werden kann.

Der Brennstoffpreis für das Restholz wird von -12 €/t bis +12 €/t variiert, sodass sowohl für den Verkauf als auch für die Entsorgung des Restholzes die Wirtschaftlichkeit ermittelt werden kann.

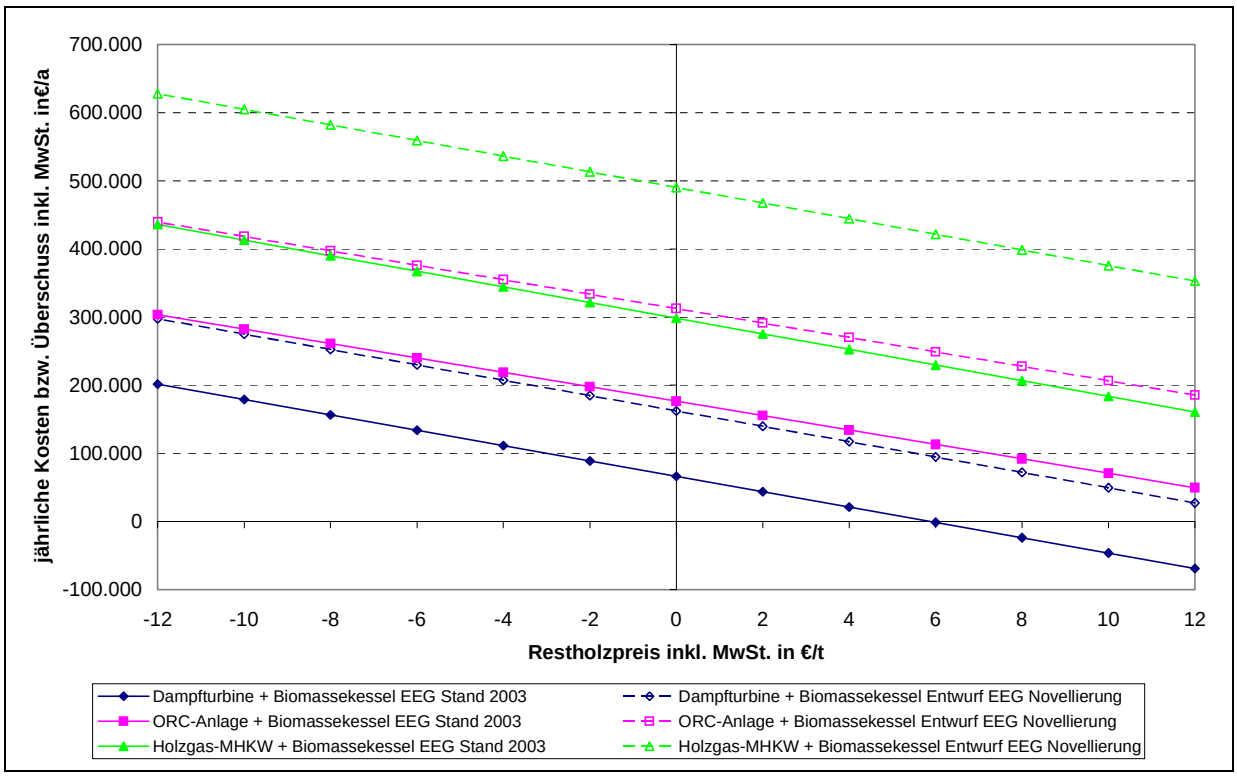

Abbildung 7-1 Sensitivitätsbetrachtung der KWK-Anlagen

Der Verlauf der Geraden zeigt, dass ein Holzgas-MHKW den größten Jahresüberschuss erzielt im Vergleich zur Dampfturbine und ORC-Anlage.

Bis zu einem Restholzpreis von etwa 6,0 bzw. 15 €/t mit Berücksichtigung der Einspeisevergütung nach Entwurf EEG Novellierung liegt ein Jahresüberschuss für die Dampfturbine vor. Für die ORC-Anlage und das Holzgas-MHKW wird ein Jahresüberschuss bis zu einem Restholzpreis zwischen ca. 16 und 43 €/t erzielt.

8 Möglichkeiten zur effizienten Wärmenutzung mit KWK-Anlagen

Um eine optimale Brennstoffausnutzung zu ermöglichen, wird geprüft, welche Bedingungen für eine effiziente Wärmenutzung der KWK-Anlagen erforderlich sind. Dazu liegt der Schwerpunkt auf der Anpassung von Temperaturniveaus auf die jeweiligen Wärmeverbraucher. Außerdem wird untersucht, ob die Abwärme der KWK-Anlagen zur Brennstofftrocknung eingesetzt werden kann.

Die Wärmeversorgung des Betriebs erfolgt derzeit mit einer Warmwasserheizung, die mit einer Heißwassertemperatur von 120°C arbeitet. Dieses Temperaturniveau ist für die Erwärmung der Dämpf- und Trockenkammern erforderlich.

Abhängig von der Technik der jeweiligen KWK-Anlage werden unterschiedliche Temperaturen erreicht.

Der Abdampf der Turbine im Gegendruckbetrieb steht zu Heizzwecken zur Verfügung. Dazu hängt der Gegendruck von der benötigten Vorlauftemperatur ab. Mit Dampf als Wärmeträger ist ein Gegendruck zwischen 3 und 5 bar notwendig, während für Warmwasser als Wärmeträger mit einer Vorlauftemperatur von 90°C ein Gegendruck von 0,75 bar erforderlich ist.

Die Vorlauftemperatur für den Wärmeverbraucher der ORC-Anlage liegt zwischen 80°C und 100°C mit einer Rücklauftemperatur zwischen 55°C und 70°C. Aufgrund dessen ist für den Einsatz einer ORC-Anlage eine Nachheizung des Heizmediums auf 120°C durch den vorhandenen Biomassekessel erforderlich.

Mit einem Motorheizkraftwerk können Vorlauftemperaturen von etwa 110°C erreicht werden, indem das Heizungswasser im Kühlwasserwärmetauscher zunächst auf ca. 80°C vorgewärmt und im Abgaswärmetauscher auf rund 110°C nachgewärmt wird. Um ein Temperaturniveau von 120°C zu erreichen, ist ebenfalls eine Nachwärmung durch den vorhandenen Biomassekessel notwendig.

Alle untersuchten KWK-Anlagen erzeugen mehr Wärme als benötigt wird, sodass grundsätzlich Wärme zur Brennstofftrocknung zur Verfügung steht.

Häufig ist eine Brennstofftrocknung dem Holzvergaser mit Motorheizkraftwerk vorgeschaltet. Dazu wird die bei der Stromerzeugung freiwerdende Wärme vollständig zur Brennstofftrocknung eingesetzt.

9 Zusammenfassung

Die Studie untersuchte am Beispiel der Firma Tombers Hartholz GmbH in Mehren Realisierungsmöglichkeiten einer Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des Brennstoffs Holz. Die Kraft-Wärme-Kopplung ermöglicht eine effizientere Brennstoffnutzung.

Das Unternehmen betreibt am Standort Mehren in der Eifel ein Sägewerk für Laubhölzer. Die derzeitige Wärmeversorgung erfolgt auf naturbelassenem Restholz, das in einem Biomassekessel verfeuert wird. Die Wärme wird zur Beheizung der Dämpf- und Trockenkammern sowie zur Raumheizung benötigt. Zur Spitzenlastabdeckung und für einen Notbetrieb ist zusätzlich ein Erdgaskessel installiert.

Als KWK-Anlagen betrachtete die Studie eine Dampfturbine, eine ORC-Anlage und ein Holzgas-MHKW, deren Technologie zunächst kurz vorgestellt wurde.

Die Ist-Analyse ermittelte anhand von Verbrauchsdaten den Jahresheizwärmebedarf, auf dem die Auslegung der KWK-Anlagen basierte. Sie wurden so dimensioniert, dass die Gesamtheizleistung eine Reservekapazität von ca. 1 MW_{th} für eine Erweiterung der Produktion durch weitere Trockenkammern aufweist.

Für die drei Varianten wurde eine Energie- und Kohlendioxid-Emissionsbilanz erstellt. Sie sparen durch die eigene Stromerzeugung, die Kraftwerksstrom verdrängt, und durch den CO_2-neutralen Brennstoff Holz global gesehen Kohlendioxid-Emissionen ein.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde der Jahresüberschuss aus den Kapital-, Verbrauchs- und Betriebskosten sowie den Einnahmen aus der Stromvergütung berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

EEG Stand 2003			
	Investition in €	Jahresüberschuss in €/a	statische Amortisation in a
Dampfturbine	1.857.000	66.323	8,4
ORC-Anlage	1.671.000	176.579	5,3
Holzgas-MHKW	3.000.000	298.461	5,4
Entwurf EEG Novellierung			
Dampfturbine	1.857.000	162.323	5,8
ORC-Anlage	1.671.000	312.579	3,7
Holzgas-MHKW	3.000.000	490.461	4,0

Tabelle 9-1 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Mit den Einspeisevergütungen nach dem Entwurf zur EEG Novellierung vom 12.08.2003 ergibt sich ein höherer Jahresüberschuss für alle drei KWK-Anlagen. Der Jahresüberschuss der Dampfturbine erhöht sich um 96.000 €/a, der ORC-Anlage um 136.000 €/a und des Holzgas-MHKWs um 192.000 €/a.

Neben dem in den Rahmenbedingungen festgelegten Restholzpreis von 0 €/t ermittelte eine Sensitivitätsbetrachtung für weitere Restholzpreise den Jahresüberschuss für die KWK-Anlagen.

Bis zu einem Restholzpreis von etwa 6,0 bzw. 15 €/t mit Berücksichtigung der Einspeisevergütung nach Entwurf EEG Novellierung liegt ein Jahresüberschuss für die Dampfturbine vor. Für die ORC-Anlage und das Holzgas-MHKW wird ein Jahresüberschuss bis zu einem Restholzpreis zwischen ca. 16 und 43 €/t erzielt.

Um eine optimale Brennstoffausnutzung zu ermöglichen, wurde geprüft, welche Bedingungen insbesondere die Temperaturniveaus für eine effiziente Wärmenutzung der KWK-Anlagen erforderlich sind. Zur Wärmeversorgung des Betriebs arbeitet die Warmwasserheizung mit einer Heißwassertemperatur von 120°C.

Dieses Temperaturniveau ist mit einer Dampfturbine zu erreichen, indem der entsprechende Gegendruck für den Einsatz des Abdampfs zu Heizzwecken gewählt wird.

Die ORC-Anlage liefert eine Vorlauftemperatur zwischen 80°C und 100°C, sodass mit dem vorhandenen Biomassekessel eine Temperaturanhebung auf 120°C notwendig wird.

Da das Holzgas-MHKW eine Vorlauftemperatur von etwa 110°C liefert, ist ebenfalls eine Nachheizung durch den vorhandenen Biomassekessel auf 120°C erforderlich.

Häufig ist eine Brennstofftrocknung dem Holzvergaser mit Motorheizkraftwerk vorgeschaltet. Dazu wird die bei der Stromerzeugung freiwerdende Wärme vollständig zur Brennstofftrocknung eingesetzt.

Fazit:

Aus ökologischer Sicht sparen die auf dem Brennstoff Holz basierenden KWK-Anlagen gegenüber der derzeitigen Wärmeversorgung mit einem Biomassekessel mehr Kohlendioxid-Emissionen ein. Alle drei untersuchten KWK-Anlagen erwirtschaften einen Jahresüberschuss, sodass sie aus wirtschaftlicher Sicht realisiert werden können. Sie bieten außerdem eine Heizleistungsreserve für eine Erweiterung der Produktion durch weitere Trockenkammern.

Für die Anlagenauswahl ist neben der Wirtschaftlichkeit auch das Temperaturniveau der erzeugten Wärme für die hydraulische Einbindung in die bestehende Heizanlage zu berücksichtigen.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Schema eines Dampfturbinen-Heizkraftwerks (Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) 6
Abbildung 2-2 Schema einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung mit ORC-Prozess (Quelle: BIOS Bioenergiesystem GmbH, Graz) 8
Abbildung 2-3 Schema einer Holzvergasung in Verbindung mit einem MHKW (Quelle: Fa. Mothermik, Pfalzfeld) 10
Abbildung 5-1 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der KWK-Anlagen 15
Abbildung 6-1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen 20
Abbildung 6-2 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen mit Einspeisevergütung nach Entwurf zur EEG Novellierung 22
Abbildung 7-1 Sensitivitätsbetrachtung der KWK-Anlagen 23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Daten zur installierten Heizungsanlage 4
Tabelle 1-2 Wärmeleistungen der Wärmeverbraucher 4
Tabelle 1-3 Überschlägige Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfs 5
Tabelle 3-1 Kenndaten der KWK-Anlagen 12
Tabelle 4-1 Energiebilanz der KWK-Anlagen 13
Tabelle 5-1 Kohlendioxid-Emissionsbilanz 14
Tabelle 6-1 Investition Dampfturbine 17
Tabelle 6-2 Investition ORC-Anlage 18
Tabelle 6-3 Investition Holzgas-MHKW 18
Tabelle 6-4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen 19
Tabelle 6-5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der KWK-Anlagen mit Einspeisevergütung nach Entwurf zur EEG Novellierung 21
Tabelle 9-1 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 25