

Bewertung von dezentralen Techniken zur Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) aus Biomasse in kleinen Leistungsbereichen

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) Christian Pohl
 Dipl.-Ing. (FH) Kerstin Kriebs
Telefon: 06721 / 409 218
Telefax: 06721 / 409 129
Homepage: <http://tsb.fh-bingen.de>

Projektnummer: 834

Datum: 16.09.2003

Inhalt

Einleitung.....	3
1 Vorstellung der Techniken	4
1.1 Dampfturbinen	4
1.2 Dampfmotor	5
1.3 Holzvergaser-BHKW	6
1.4 ORC-Anlage.....	7
1.5 Stirlingmotor.....	9
1.6 Gegenüberstellung der Leistungsdaten	10
2 Konzeption der technischen Systeme.....	11
2.1 Konzeption der Dampfturbine SPM.....	12
2.2 Konzeption des Dampfmotors.....	13
2.3 Konzeption des Holzvergaser-BHKWs	14
2.4 Konzeption der ORC-Anlage.....	15
2.5 Konzeption des Stirlingmotors	16
3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	17
3.1 Wirtschaftlichkeit Dampfturbine.....	19
3.2 Wirtschaftlichkeit Dampfmotor	20
3.3 Wirtschaftlichkeit Holzvergaser-BHKW	21
3.4 Wirtschaftlichkeit ORC-Anlage.....	22
3.5 Wirtschaftlichkeit Stirlingmotor	23
4 Gegenüberstellung der technischen Systeme.....	24
4.1 Gegenüberstellung der Energiebilanzen.....	24
4.2 Gegenüberstellung der Kohlendioxid-Emissionsbilanzen	25
4.3 Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit Sensitivitätsbetrachtung.....	26
5 Zusammenfassung	31
6 Anhang.....	34
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	36

Einleitung

Diese Studie untersucht dezentrale Techniken zur Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse in kleinen Leistungsbereichen.

Die KWK-Anlagen werden nach dem technischen Entwicklungsstand, dem Einsatzbereich, der Effizienz und der Wirtschaftlichkeit verglichen und bewertet. Es handelt sich um folgende technische System unter 1 MW_{el} :

- Dampfturbine
- Dampfmotor
- Holzvergaser-BHKW
- ORC-Anlage
- Stirlingmotor

Die einzelnen Techniken werden mit den zugehörigen Anlagendaten und dem technischen Entwicklungsstand vorgestellt.

Zum Vergleich der verschiedenen KWK-Anlagen werden beispielhafte Anwendungsfälle angenommen, auf denen eine Konzeption der jeweiligen Anlage mit einer Wirtschaftlichkeitsbeurteilung basiert.

In der Zusammenfassung werden die Ergebnisse der Untersuchung zusammengestellt.

1 Vorstellung der Techniken

Die technischen Systeme werden mit ihren Einsatzgebieten vorgestellt. Für alle Anlagen werden charakteristische Anlagendaten angegeben.

1.1 Dampfturbinen

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. Außerdem kann Dampf ausgekoppelt werden, um Prozessdampf bereitzustellen.

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.

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 bis zu 25 %.

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.

Folgende Leistungsdaten weist ein Dampfturbinenprozess mit Biomassefeuerung auf:

elektrische Leistung	200 - 10.000 kW _{el}
thermische Leistung	1.000 - 20.000 kW _{th}
elektrischer Wirkungsgrad	10 - 32 %
thermischer Wirkungsgrad	35 - 63 %
Gesamteffizienz	60 - 74 %

1.2 Dampfmotor

Die bei der Biomasseverfeuerung entstehenden Rauchgase erzeugen Dampf in einem Kessel. Dieser Dampf strömt in den Dampfkolbenmotor, der durch Entspannung mechanische Arbeit verrichtet. Der Generator wandelt diese mechanische Arbeit in elektrische Arbeit um. Die Wärme aus der Kondensation des Dampfes kann als Fern- oder Prozesswärme eingesetzt werden. Im Gegensatz zum Dampfturbinenprozess sind beim Dampfkolbenmotor kleinere elektrische Leistungen ab etwa 20 kW_{el} möglich, sodass sie zur dezentralen Energieversorgung in kleinen bis mittleren Leistungsbereichen eingesetzt werden können.

Da sich nicht die hohen Drücke und Temperaturen wie bei konventionell befeuerten Dampfkessel einstellen, sind die Dampfparameter auf den Brennstoff Biomasse zu optimieren.

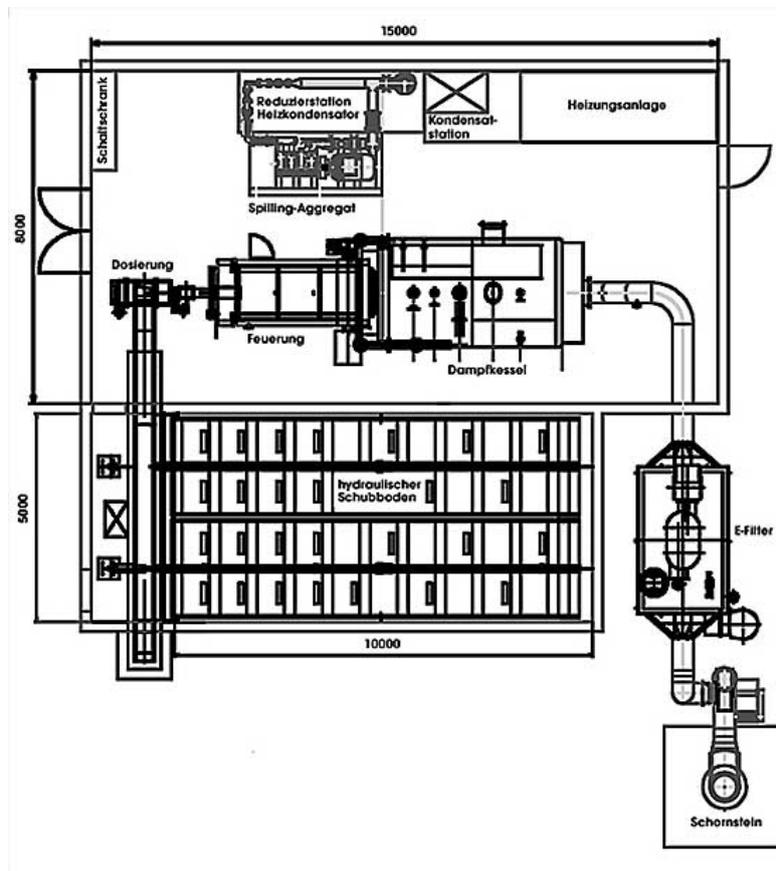


Abbildung 1-1 Anlagenschema eines Dampfmotors mit holzbeheiztem Dampfkessel
(Quelle: Spilling Energie System GmbH)

Folgende Leistungsdaten charakterisieren einen Dampfmotor mit Biomassekessel:

elektrische Leistung	20 - 2.000 kW _{el}
thermische Leistung	80 - 8.000 kW _{th}
elektrischer Wirkungsgrad	11 - 15 %
thermischer Wirkungsgrad	60 - 65 %
Gesamteffizienz	70 - 78 %

1.3 Holzvergaser-BHKW

Als Brennstoff für das Blockheizkraftwerk 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.

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 Reformier können die im Holzgas enthaltenen Teere in Brenngas umgewandelt werden.

Im Holzgas befindet sich hauptsächlich Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO) als Brenngas. Wenn der Wasserstoffanteil zu hoch ist, kann es zu einer klopfenden Verbrennung führen. Das langsam verbrennende Kohlenmonoxid hemmt in zu hoher Konzentration die Verbrennung.

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, 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.

Eine weitere Nutzung erzielt der aus dem Vergasungsreaktor ausgetragene Holzkohlekoks, indem die Industrie daraus Holzpresskohle herstellt.

Derzeit werden einige Versuchsanlagen betrieben. Auf dem Markt sind noch keine Holzvergaser-BHKWs erhältlich. Aufgrund dessen beruhen die Kenndaten für ein Holzvergaser-BHKW auf Zielwerten.

Folgende Leistungsdaten weist ein Holzvergaser-BHKW auf:

elektrische Leistung	60 - 500 kW _{el}
thermische Leistung	150 - 1.000 kW _{th}
elektrischer Wirkungsgrad	20 - 28 %
thermischer Wirkungsgrad	50 - 57 %
Gesamteffizienz	80 - 85 %

1.4 ORC-Anlage

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 Silikonöl. 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 Dampfes. Im Kondensator wird die Wärme des Dampfes 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.

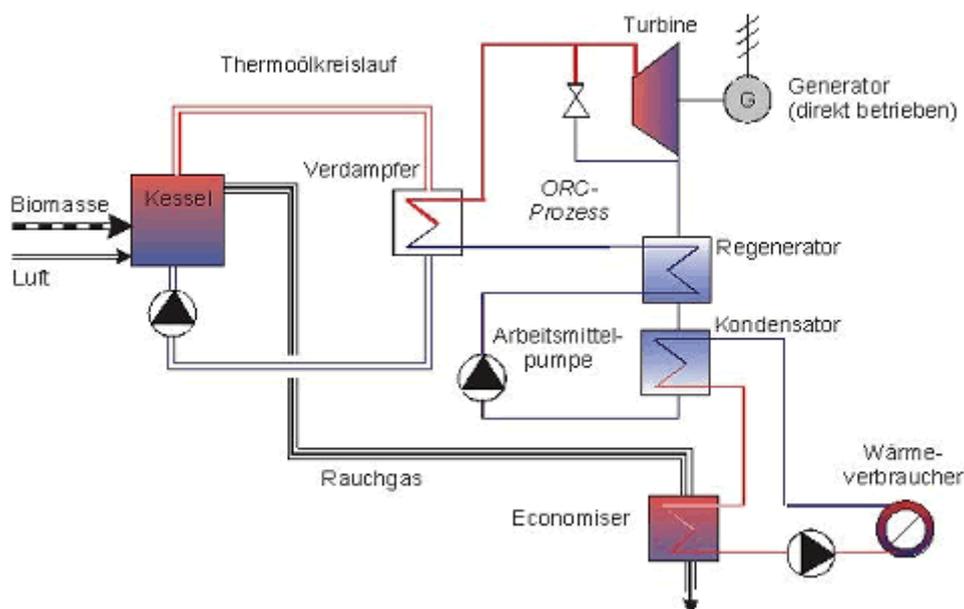


Abbildung 1-2 Schema einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung mit ORC-Prozess
(Quelle: BIOS Bioenergiesystem GmbH, Graz)

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. 80 %.

Eine ORC-Anlage ist seit 1999 in Österreich in Betrieb, während zwei weitere 2001 und 2002 hinzukamen. Drei ORC-Anlagen sind derzeit in Deutschland installiert. In Heberndorf (Thüringen) wurde 2001/2002 eine ORC-Anlage mit 500 kW_{el} in Heberndorf errichtet. Weitere ORC-Anlagen mit jeweils 500 kW_{el} befinden sich in Friedland und Schwerstedt.

Folgende Anlagendaten weist ein ORC-Prozess auf:

elektrische Leistung	300 -1.500 kW _{el}
thermische Leistung	1.700 - 6.000 kW _{th}
elektrischer Wirkungsgrad	14 %
thermischer Wirkungsgrad	81 %
Gesamteffizienz	95 %

1.5 Stirlingmotor

Der Stirlingmotor arbeitet mit einem Arbeitsgas in einem geschlossenen Kreisprozess, das vom Verdichtungszyylinder und Arbeitszylinder unter Wärmeabfuhr und Wärmezufuhr hin- und hergeschoben wird. Da es sich um ein geschlossenes System handelt, wird die Wärme im Gegensatz zu Otto- und Dieselmotoren von außen zugeführt, sodass unterschiedliche Wärmequellen einsetzbar sind. Eine Biomassefeuerung liefert in dieser Untersuchung die notwendige Wärme.

Technische Probleme der Materialbeanspruchung und die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen sind noch zu verbessern. Zur Zeit werden Pilotprojekte untersucht.

Folgende Leistungsdaten weist ein Stirlingmotor mit Biomassefeuerung auf:

elektrische Leistung	bis 100 kW _{el}
thermische Leistung	bis 500 kW _{th}
elektrischer Wirkungsgrad	10 - 12 %
thermischer Wirkungsgrad	65 - 75 %
Gesamteffizienz	85 - 87 %

Da nicht die vollständige Wärme des Biomassekessels zum Antrieb des Stirlingmotors genutzt wird, steht die übrige Wärme zusammen mit der Abwärme des Stirlingmotors zu Heizzwecken zur Verfügung.

1.6 Gegenüberstellung der Leistungsdaten

Die charakteristischen Kenndaten der vorgestellten, technischen Systeme sind zum Vergleich in einer Tabelle aufgeführt.

		Dampfturbine	Dampf-motor	Holzvergaser-BHKW	ORC-Anlage	Stirling-motor
elektrische Leistung	kW _{el}	200 - 10.000	20 - 2.000	60 - 500	300 - 1.000	bis 100
thermische Leistung	kW _{th}	1.000 - 20.000	80 - 8.000	150 - 1.000	1.700 - 6.000	bis 500
elektr. Wirkungsgrad	%	10 - 25	11 - 15	20 - 28	14	10 - 12
therm. Wirkungsgrad	%	35 - 63	60 - 65	50 - 57	81	65 - 75
Gesamteffizienz	%	60 - 74	70 - 78	80 - 85	95	85 - 87

Tabelle 1-1 Systemvergleich nach Leistungsdaten

Die technischen Systeme decken verschiedene Leistungsbereiche ab, sodass sie abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall eingesetzt werden können.

Neben den verschiedenen Leistungsbereichen bestehen zwischen den Wirkungsgraden und der Gesamteffizienz deutliche Unterschiede. Daraus ergeben sich verschiedene Einsatzbereiche der technischen Systeme.

Zur Veranschaulichung sind die elektrischen Leistungsbereiche der technischen Systeme im folgenden Diagramm dargestellt.

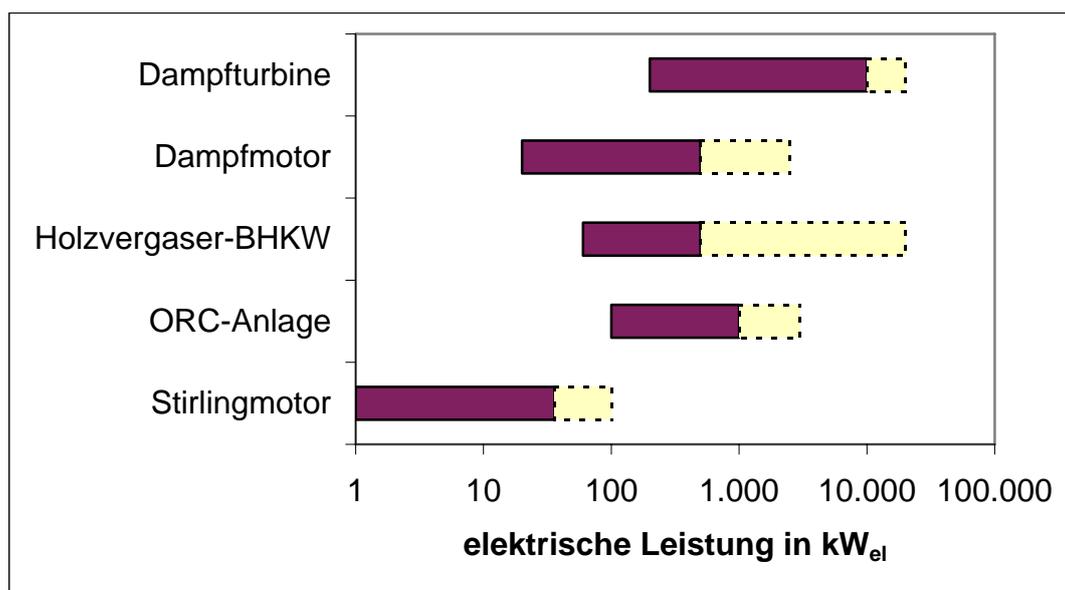


Abbildung 1-3 Elektrische Leistungsbereiche der technischen Systeme

2 Konzeption der technischen Systeme

In einer Konzeption wird für jedes System ein beispielhafter Anwendungsfall zu Grunde gelegt. Für alle Anlagen werden Energiebilanzen aufgestellt, auf denen die Kohlendioxid-Emissionsbilanzen und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen basieren.

Da sich bis auf Dampfmotoren und herkömmliche Dampfturbinen (Dampfturbine SPM ausgenommen) die genannten KWK-Anlagen noch in der Entwicklung befinden, sind die Leistungsdaten und Wirkungsgrade sowie die Vollbenutzungsstunden in der Energiebilanz als Zielwerte angesetzt.

Für die Wirtschaftlichkeit wird zunächst angenommen, dass alle KWK-Anlagen in einer vorhandenen Infrastruktur eines Betriebs installiert wird. Für die Dampfturbine und den Dampfmotor wird zusätzlich eine Neuanlage auf der „grünen Wiese“ betrachtet.

Für die Kohlendioxid-Emissionsbilanz ist zu beachten, dass die Verdrängung der Wärmeerzeugung in Heizwerken oder Heizkesseln zur einer Verminderung des Brennstoffeinsatzes und der zugehörigen CO₂-Emission führt. Durch die unterschiedlichen, spezifischen CO₂-Emissionen der fossilen und regenerativen Brennstoffe, stellen sich Unterschiede in der Kohlendioxid-Emissionsbilanz ein.

2.1 Konzeption der Dampfturbine SPM

Die Dampfturbine „Speed Power Module“, die von der TU Dresden gemeinsam mit Industriepartnern u. a. AG KK&K entwickelt wird, wird als Anwendungsfall für die Untersuchung herangezogen.

Die Energiebilanz ermittelt die Energie- und Brennstoffmengen, auf denen die Kohlendioxid-Emissionsbilanz und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basieren.

		Dampfturbine
elektrische Leistung	kW_{el}	500
thermische Leistung	kW_{th}	3.000
elektrischer Wirkungsgrad	%	11
thermischer Wirkungsgrad	%	63
Gesamteffizienz	%	74
Vollbenutzungsstunden	h/a	8.000
elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	4.000
thermische Energie	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$	24.000
Brennstoffbedarf HHS	$\text{MWh}_{\text{BSH}_U}/\text{a}$	36.364
Heizwert HHS	$\text{kWh}_{\text{H}_U}/\text{Sm}^3$	800
Brennstoffmenge HHS	Sm^3/a	45.455
Eigenbedarf elektrische Leistung	kW_{el}	100
Eigenbedarf elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	800

Tabelle 2-1 Energiebilanz der Dampfturbine

Die Kohlendioxid-Emissionsbilanz berücksichtigt außer dem Brennstoff- und Stromverbrauch auch die verdrängte Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft- und Heizwerken.

		Dampfturbine
Brennstoffbedarf Holzhackschnitzel	$\text{MWh}_{\text{BSH}_U}/\text{a}$	36.364
Eigenbedarf Strom	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	800
vermiedene Stromerzeugung	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	4.000
vermiedene Wärmeerzeugung	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$	24.000
vermiedener Brennstoffbedarf Erdgas	$\text{MWh}_{\text{BSH}_U}/\text{a}$	26.667
spez. CO_2 -Emission Holzhackschnitzel	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{BS}}$	58
spez. CO_2 -Emission Strom	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{el}}$	683
spez. CO_2 -Emission Erdgas	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{BS}}$	254
CO_2 -Emission	$\text{t CO}_2/\text{a}$	-6.850

Tabelle 2-2 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der Dampfturbine

2.2 Konzeption des Dampfmotors

Ein Dampfmotor des Unternehmens Spilling Energie Systeme GmbH wird als Anwendungsfall herangezogen.

Die Energiebilanz ermittelt die Energie- und Brennstoffmengen, auf denen die Kohlendioxid-Emissionsbilanz und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basieren.

		Dampfmotor
elektrische Leistung	kW_{el}	500
thermische Leistung	kW_{th}	3.000
elektrischer Wirkungsgrad	%	11
thermischer Wirkungsgrad	%	63
Gesamteffizienz	%	74
Vollbenutzungsstunden	h/a	8.000
elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	4.000
thermische Energie	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$	24.000
Brennstoffbedarf HHS	$\text{MWh}_{\text{BShU}}/\text{a}$	36.364
Heizwert HHS	$\text{kWh}_{\text{HU}}/\text{Sm}^3$	800
Brennstoffmenge HHS	Sm^3/a	45.455
Eigenbedarf elektrische Leistung	kW_{el}	105
Eigenbedarf elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	840

Tabelle 2-3 Energiebilanz des Dampfmotors

Die Kohlendioxid-Emissionsbilanz berücksichtigt außer dem Brennstoff- und Stromverbrauch auch die verdrängte Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft- und Heizwerken.

		Dampfmotor
Brennstoffbedarf Holzhackschnitzel	$\text{MWh}_{\text{BShU}}/\text{a}$	36.364
Eigenbedarf Strom	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	840
vermiedene Stromerzeugung	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	4.000
vermiedene Wärmeerzeugung	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$	24.000
vermiedener Brennstoffbedarf Erdgas	$\text{MWh}_{\text{BShU}}/\text{a}$	26.667
spez. CO_2 -Emission Holzhackschnitzel	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{BS}}$	58
spez. CO_2 -Emission Strom	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{el}}$	683
spez. CO_2 -Emission Erdgas	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{BS}}$	254
CO_2 -Emission	$\text{t CO}_2/\text{a}$	-6.823

Tabelle 2-4 Kohlendioxid-Emissionsbilanz des Dampfmotors

2.3 Konzeption des Holzvergaser-BHKWs

Die Energiebilanz ermittelt die Energie- und Brennstoffmengen, auf denen die Kohlendioxid-Emissionsbilanz und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basieren.

		Holzvergaser-BHKW
elektrische Leistung Erzeugung	kW _{el}	530
elektrische Leistung Einspeisung	kW _{el}	500
thermische Leistung	kW _{th}	915
elektrischer Wirkungsgrad	%	28
thermischer Wirkungsgrad	%	47
Gesamteffizienz	%	75
Vollbenutzungsstunden	h/a	8.000
elektrische Energie	MWh _{el} /a	4.000
thermische Energie	MWh _{th} /a	7.324
Brennstoffbedarf HHS	MWh _{BSHU} /a	14.224
Brennstoffbedarf Heizöl	MWh _{BSHU} /a	1.194
Heizwert HHS	kWh _{HU} /Sm ³	800
Heizwert Heizöl	kWh _{HU} /l	9,95
Brennstoffmenge HHS	Sm ³ /a	17.780
Brennstoffmenge Heizöl	l/a	120.000
Eigenbedarf thermische Energie	MWh _{th} /a	4.248

Tabelle 2-5 Energiebilanz des Holzvergaser-BHKWs

Die Kohlendioxid-Emissionsbilanz berücksichtigt außer dem Brennstoff- und Stromverbrauch auch die verdrängte Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft- und Heizwerken.

		Holzvergaser-BHKW
Brennstoffbedarf Holz hackschnitzel	MWh _{BSHU} /a	14.224
Brennstoffbedarf Heizöl	MWh _{BSHU} /a	1.194
vermiedene Stromerzeugung	MWh _{el} /a	4.000
vermiedene Wärmeerzeugung	MWh _{th} /a	3.076
vermiedener Brennstoffbedarf Erdgas	MWh _{BSHU} /a	3.418
spez. CO ₂ -Emission Holz hackschnitzel	kg CO ₂ /MWh _{BS}	58
spez. CO ₂ -Emission Heizöl	kg CO ₂ /MWh _{BS}	318
spez. CO ₂ -Emission Strom	kg CO ₂ /MWh _{el}	683
spez. CO ₂ -Emission Erdgas	kg CO ₂ /MWh _{BS}	254
CO ₂ -Emission	t CO ₂ /a	-2.395

Tabelle 2-6 Kohlendioxid-Emissionsbilanz des Holzvergaser-BHKWs

2.4 Konzeption der ORC-Anlage

Als ORC-Prozess wird die vorhandene Anlage der Holzindustrie STIA in Admont (Österreich) zu Grunde gelegt.

Die Energiebilanz ermittelt die Energie- und Brennstoffmengen, auf denen die Kohlendioxid-Emissionsbilanz und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basieren.

		ORC-Anlage
elektrische Leistung	kW_{el}	400
thermische Leistung	kW_{th}	2.300
elektrischer Wirkungsgrad	%	14
thermischer Wirkungsgrad	%	81
Gesamteffizienz	%	95
Vollbenutzungsstunden	h/a	8.000
elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	3.200
thermische Energie	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$	18.400
Brennstoffbedarf HHS	$\text{MWh}_{\text{BSHU}}/\text{a}$	22.857
Heizwert HHS	$\text{kWh}_{\text{HU}}/\text{Sm}^3$	800
Brennstoffmenge HHS	Sm^3/a	28.571
Eigenbedarf elektrische Leistung	kW_{el}	45
Eigenbedarf elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	360

Tabelle 2-7 Energiebilanz der ORC-Anlage

Die Kohlendioxid-Emissionsbilanz berücksichtigt außer dem Brennstoff- und Stromverbrauch auch die verdrängte Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft- und Heizwerken.

		ORC-Anlage
Brennstoffbedarf Holzhackschnitzel	$\text{MWh}_{\text{BSHU}}/\text{a}$	22.857
vermiedene Stromerzeugung	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	3.200
vermiedene Wärmeerzeugung	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$	18.400
vermiedener Brennstoffbedarf Erdgas	$\text{MWh}_{\text{BSHU}}/\text{a}$	20.444
spez. CO_2 -Emission Holzhackschnitzel	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{BS}}$	58
spez. CO_2 -Emission Strom	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{el}}$	683
spez. CO_2 -Emission Erdgas	$\text{kg CO}_2/\text{MWh}_{\text{BS}}$	254
CO_2 -Emission	$\text{t CO}_2/\text{a}$	-5.807

Tabelle 2-8 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der ORC-Anlage

2.5 Konzeption des Stirlingmotors

Ein Stirlingmotor des Unternehmens Mawera Holzfeuerungsanlagen Gesellschaft mbH wird herangezogen. Die Wirkungsgrade gelten für eine Anlage mit Luftvorwärmung.

Die Energiebilanz ermittelt die Energie- und Brennstoffmengen, auf denen die Kohlendioxid-Emissionsbilanz und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basieren.

		Stirlingmotor
elektrische Leistung	kW_{el}	35
thermische Leistung	kW_{th}	225
elektrischer Wirkungsgrad	%	12
thermischer Wirkungsgrad	%	75
Gesamteffizienz	%	87
Vollbenutzungsstunden	h/a	8.000
elektrische Energie	MWh_{el}/a	280
thermische Energie	MWh_{th}/a	1.800
Brennstoffbedarf HHS	MWh_{BSh_u}/a	2.333
Heizwert HHS	kWh_{H_u}/Sm^3	800
Brennstoffmenge HHS	Sm^3/a	2.917
Eigenbedarf elektrische Leistung	kW_{el}	6
Eigenbedarf elektrische Energie	MWh_{el}/a	48

Tabelle 2-9 Energiebilanz des Stirlingmotors

Die Kohlendioxid-Emissionsbilanz berücksichtigt außer dem Brennstoff- und Stromverbrauch auch die verdrängte Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft- und Heizwerken.

		Stirlingmotor
Brennstoffbedarf Holzhackschnitzel	MWh_{BSh_u}/a	2.333
vermiedene Stromerzeugung	MWh_{el}/a	280
vermiedene Wärmeerzeugung	MWh_{th}/a	1.800
vermiedener Brennstoffbedarf Erdgas	MWh_{BSh_u}/a	2.000
spez. CO ₂ -Emission Holzhackschnitzel	$kg\ CO_2/MWh_{BS}$	58
spez. CO ₂ -Emission Strom	$kg\ CO_2/MWh_{el}$	683
spez. CO ₂ -Emission Erdgas	$kg\ CO_2/MWh_{BS}$	254
CO ₂ -Emission	$t\ CO_2/a$	-531

Tabelle 2-10 Kohlendioxid-Emissionsbilanz des Stirlingmotors

3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind die Kapitalkosten aus Investitionskosten nach Herstellerangaben berechnet. Zusammen mit Verbrauchs- und Betriebskosten ergeben sich die jährlichen Kosten. Die Vergütung der Strom- und Wärmeerzeugung wird als jährliche Einnahme aufgeführt. Der Jahresüberschuss der einzelnen Systeme ergibt sich aus den Kosten und den Einnahmen.

Rahmenbedingungen

Bestimmung kapitalgebundene Kosten:

Zinssatz	6 %
Abschreibungsdauer (Lebensdauer)	15 Jahre

Bestimmung verbrauchsgebundene Kosten:

spez. Holzhackschnitzelpreis	4 €/Sm ³
spez. Strompreis	0,10 €/kWh _{el}

Bestimmung betriebsgebundene Kosten:

Wartung / Instandhaltung Dampfturbine	0,1 - 0,2 Ct/kWh _{el}
Wartung / Instandhaltung Dampfmotor	0,7 Ct/kWh _{el}
Wartung / Instandhaltung Holzvergaser-BHKW	2,5 Ct/kWh _{el}
Wartung / Instandhaltung ORC-Anlage	1,5 % der Investition (0,6 Ct/kWh _{el})
Wartung / Instandhaltung Stirlingmotor	2,0 Ct/kWh _{el}
Wartung / Instandhaltung Biomassekessel	2 % der Investition
Personalkosten Dampfturbine (vorhandener Betrieb)	20 €/h; 8.000 h/a; 28 h/w
Personalkosten Dampfturbine (Neuanlage)	4 Mannjahre; 50.000 €/Mannjahr
Personalkosten Dampfmotor (vorhandener Betrieb)	20 €/h; 8.000 h/a; 28 h/w
Personalkosten Dampfmotor (Neuanlage)	4 Mannjahre; 50.000 €/Mannjahr
Personalkosten Holzvergaser-BHKW (vorh. Betrieb)	20 €/h; 8.000 h/a; 14 h/w
Personalkosten ORC-Anlage (vorhandener Betrieb)	20 €/h; 8.000 h/a; 14 h/w
Personalkosten Stirlingmotor (vorhandener Betrieb)	20 €/h; 8.000 h/a; 3 h/w

Bestimmung Erlöse für Stromerzeugung:

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} Stromvergütung. Die Mindestvergütung wird ab dem 01. Januar 2002 für mit diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen jährlich um jeweils einen Prozentpunkt herabgesetzt. In der Wirtschaftlichkeit wird eine Stromvergütung von 10 Ct/kWh_{el} eingesetzt.

Nach dem Entwurf vom 12.08.2003 zur Novellierung des EEG erhöht sich die Vergütung von KWK-Anlagen mit Biomassefeuerungen. Die Vergütungssätze unterscheiden sich je nach verwendeter Technik.

Bestimmung Erlöse für Wärmebereitstellung:

Anteil Wärmenutzung	50 %
spez. Wärmepreis (Heizwerk mit fossilem Brennstoff)	3,5 Ct/kWh _{th}

Bestimmung Erlöse Holzkohlekoksverkauf (Holzvergaser-BHKW):

spez. Holzkohlekokspreis	100 €/t
--------------------------	---------

3.1 Wirtschaftlichkeit Dampfturbine

In der folgenden Tabelle ist die Wirtschaftlichkeit mit jährlichen Kosten und Einnahmen für die beiden Anwendungsfälle aufgeführt. Daraus berechnet sich der Jahresüberschuss und die statische Amortisation der KWK-Anlagen.

		Dampfturbine vorhandener Betrieb	Dampfturbine Neuanlage
elektrische Leistung	kW _{el}	500	500
thermische Leistung	kW _{th}	3.000	3.000
Investition	€	1.481.000	1.481.000
spez. Investition	€/kW _{el}	3.000	3.000
Kapitalkosten	€/a	152.543	152.543
Verbrauchs-kosten	€/a	261.818	261.818
Betriebskosten	€/a	48.953	222.286
Summe Kosten	€/a	463.314	636.647
Gutschrift Stromvergütung	€/a	400.000	400.000
Gutschrift Wärmevergütung	€/a	420.000	420.000
Summe Einnahmen	€/a	820.000	820.000
Jahresüberschuss	€/a	356.686	183.353
statische Amortisation	a	2,9	4,4

Tabelle 3-1 Wirtschaftlichkeit Dampfturbine

Der Jahresüberschuss beträgt für eine Dampfturbine in einem vorhandenen Betrieb ca. 356.700 €/a, sodass sich eine statische Amortisation von 2,9 Jahren ergibt. Mit rund 183.400 €/a ist der Jahresüberschuss für eine Neuanlage geringer. Sie amortisiert sich in 4,4 Jahren.

3.2 Wirtschaftlichkeit Dampfmotor

Die Tabelle stellt die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeit mit den jährlichen Kosten und Einnahmen für beide Anwendungsfälle zusammen. Daraus sind der Jahresüberschuss und die statische Amortisation berechnet.

		Dampfmotor vorhandener Betrieb	Dampfmotor Neuanlage
elektrische Leistung	kW_{el}	500	500
thermische Leistung	kW_{th}	3.000	3.000
Investition	€	1.800.000	1.800.000
spez. Investition	€/kW_{el}	3.600	3.600
Kapitalkosten	€/a	185.400	185.400
Verbrauchs-kosten	€/a	265.818	265.818
Betriebskosten	€/a	70.953	244.286
Summe Kosten	€/a	522.171	695.504
Gutschrift Stromvergütung	€/a	400.000	400.000
Gutschrift Wärmevergütung	€/a	420.000	420.000
Summe Einnahmen	€/a	820.000	820.000
Jahresüberschuss	€/a	297.829	124.496
statische Amortisation	a	3,7	5,8

Tabelle 3-2 Wirtschaftlichkeit Dampfmotor

Für einen Dampfmotor in einem vorhandenen Betrieb ergibt sich ein Jahresüberschuss von etwa 297.800 €/a, sodass er sich in 3,7 Jahren amortisiert. Als Neuanlage beträgt der jährliche Überschuss ca. 124.500 €/a mit einer statischen Amortisation von 5,8 Jahren.

3.3 Wirtschaftlichkeit Holzvergaser-BHKW

Die Tabelle führt die jährlichen Kosten und Einnahmen mit den daraus resultierendem Jahresüberschuss und der statischen Amortisation auf.

		Holzvergaser-BHKW vorhandener Betrieb
elektrische Leistung	kW _{el}	500
thermische Leistung	kW _{th}	915
Investition	€	1.250.000
spez. Investition	€/kW _{el}	2.500
Kapitalkosten	€/a	128.750
Verbrauchskosten	€/a	97.896
Betriebskosten	€/a	93.333
Summe Kosten	€/a	319.979
Gutschrift Stromvergütung	€/a	400.000
Gutschrift Wärmevergütung	€/a	53.829
Gutschrift Holzkohlekoksverkauf	€/a	16.000
Summe Einnahmen	€/a	469.829
Jahresüberschuss	€/a	149.850
statische Amortisation	a	4,5

Tabelle 3-3 Wirtschaftlichkeit Holzvergaser-BHKW

Die Jahreskosten eines Holzvergaser-BHKWs in einem vorhandenen Betrieb betragen rund 149.900 €/a. Es ergibt sich eine zugehörige Amortisation von 4,5 Jahren.

3.4 Wirtschaftlichkeit ORC-Anlage

In der folgenden Tabelle ist die Wirtschaftlichkeit mit jährlichen Kosten und Einnahmen aufgeführt. Daraus berechnet sich der Jahresüberschuss und die statische Amortisation der Anlage.

		ORC-Anlage vorhandener Betrieb
elektrische Leistung	kW _{el}	400
thermische Leistung	kW _{th}	2.300
Investition	€	920.000
spez. Investition	€/kW _{el}	2.300
Kapitalkosten	€/a	94.760
Verbrauchskosten	€/a	150.286
Betriebskosten	€/a	27.133
Summe Kosten	€/a	272.179
Gutschrift Stromvergütung	€/a	320.000
Gutschrift Wärmevergütung	€/a	322.000
Summe Einnahmen	€/a	642.000
Jahresüberschuss	€/a	369.821
statische Amortisation	a	2,0

Tabelle 3-4 Wirtschaftlichkeit ORC-Anlage

Für eine ORC-Anlage in einem vorhandenen Betrieb ergibt sich ein Jahresüberschuss von etwa 369.800 €/a. Die Amortisation beträgt 2,0 Jahre.

3.5 Wirtschaftlichkeit Stirlingmotor

Die Tabelle führt die jährlichen Kosten und Einnahmen mit den daraus resultierendem Jahresüberschuss und der statischen Amortisation für den Anwendungsfall „vorhandener Betrieb“ auf. Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen elektrischen Leistung wird keine Neuanlage betrachtet.

		Stirlingmotor vorhandener Betrieb
elektrische Leistung	kW_{el}	35
thermische Leistung	kW_{th}	225
Investition	€	280.000
spez. Investition	€/kW _{el}	8.000
Kapitalkosten	€/a	28.840
Verbrauchs-kosten	€/a	16.467
Betriebskosten	€/a	11.297
Summe Kosten	€/a	56.604
Gutschrift Stromvergütung	€/a	28.000
Gutschrift Wärmevergütung	€/a	31.500
Summe Einnahmen	€/a	59.500
Jahresüberschuss	€/a	2.896
statische Amortisation	a	8,8

Tabelle 3-5 Wirtschaftlichkeit Stirlingmotor

Ein Stirlingmotor in einem vorhandenen Betrieb erwirtschaftet unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen einen Jahresüberschuss von ca. 2.900 €/a. Die zugehörige statische Amortisation beträgt 8,8 Jahre.

4 Gegenüberstellung der technischen Systeme

In der Gegenüberstellung der technischen Systeme werden die Energiebilanzen, die Kohlendioxid-Emissionsbilanzen und die Wirtschaftlichkeit zusammengefasst. Es werden alle vorgestellten Systeme verglichen.

4.1 Gegenüberstellung der Energiebilanzen

Die Energiebilanz gibt die umgesetzten Energie- und Brennstoffmengen der einzelnen Anlagen an. Sie dient als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

		Dampfturbine	Dampfmotor	Holzvergaser-BHKW	ORC-Anlage	Stirlingmotor
elektrische Leistung	kW_{el}	500	500	500	400	35
thermische Leistung	kW_{th}	3.000	3.000	915	2.300	225
elektr. Wirkungsgrad	%	11	11	28	14	12
therm. Wirkungsgrad	%	63	63	47	81	75
Gesamteffizienz	%	74	74	75	95	87
Vollbenutzungsstunden	h/a	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	4.000	4.000	4.000	3.200	280
thermische Energie	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$	24.000	24.000	7.324	18.400	1.800
Brennstoffbedarf HHS	$\text{MWh}_{\text{BSHu}}/\text{a}$	36.364	36.364	14.224	22.857	2.333
Brennstoffbedarf Heizöl	$\text{MWh}_{\text{BSHu}}/\text{a}$			1.194		
Heizwert HHS	$\text{kWh}_{\text{Hu}}/\text{Sm}^3$	800	800	800	800	800
Heizwert Heizöl	$\text{kWh}_{\text{Hu}}/\text{l}$			9,95		
Brennstoffmenge HHS	Sm^3/a	45.455	45.455	17.780	28.571	2.917
Brennstoffmenge Heizöl	l/a			120.000		
Eigenbedarf elektrische Leistung	kW_{el}	100	105	30 ¹	45	6
Eigenbedarf elektrische Energie	$\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$	800	840	240 ¹	360	48
Eigenbedarf thermische Energie	$\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$			4.248		

Tabelle 4-1 Energiebilanz der technischen Systeme

¹ Abdeckung Eigenbedarf an Strom intern durch Holzvergaser-BHKW

4.2 Gegenüberstellung der Kohlendioxid-Emissionsbilanzen

Mit dem Brennstoffbedarf, den die Energiebilanz ermittelte, werden die Kohlendioxid-Emissionen der einzelnen Systeme für den ausgewählten Anwendungsfall berechnet.

Unter Anrechnung der CO₂-Neutralität der Biomasse Holz und unter der Berücksichtigung der zur Herstellung sowie Transport der Holzhackschnitzel benötigten Energie ergibt sich für die Holzhackschnitzel eine spezifische Kohlendioxid-Emission von 58 g CO₂/kWh_{BS}.

In der Tabelle sind die jährlichen Kohlendioxid-Emissionen aufgelistet.

		Dampf-turbine	Dampfmotor	Holzvergaser-BHKW	ORC	Stirlingmotor
Brennstoffbedarf Holzhackschnitzel	MWh _{BShu} /a	36.364	36.364	14.224	22.857	2.333
Brennstoffbedarf Heizöl	MWh _{BShu} /a			1.194		
Eigenbedarf Strom	MWh _{el} /a	800	840		360	48
vermiedene Stromerzeugung	MWh _{el} /a	4.000	4.000	4.000	3.200	280
vermiedene Wärmeerzeugung	MWh _{th} /a	24.000	24.000	3.076	18.400	1.800
vermiedener Brennstoffbedarf Erdgas	MWh _{BShu} /a	26.667	26.667	3.418	20.444	2.000
spez. CO ₂ -Emission Holzhackschnitzel	kg CO ₂ /MWh _{BS}	58	58	58	58	58
spez. CO ₂ -Emission Heizöl	kg CO ₂ /MWh _{BS}			318		
spez. CO ₂ -Emission Strom	kg CO ₂ /MWh _{el}	683	683	683	683	683
CO ₂ -Emission	t CO ₂ /a	-6.850	-6.823	-2.395	-5.807	-531
spez. CO ₂ -Emission	t CO ₂ /MWh _{el}	-1,7	-1,7	-0,6	-1,8	-1,9
spez. CO ₂ -Emission	t CO ₂ /MWh _{th}	-0,3	-0,3	-0,8	-0,3	-0,3

Tabelle 4-2 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der technischen Systeme

Aufgrund der Verdrängung der Stromerzeugung in Kraftwerken und der Wärmeerzeugung in einem Heizwerk wird global betrachtet mehr Kohlendioxidemissionen eingespart, als von der jeweiligen Anlage vor Ort emittiert wird, sodass diese KWK-Systeme zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen.

4.3 Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit Sensitivitätsbetrachtung

Zusätzlich zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der technischen Systeme für den Anwendungsfall vorhandener Betrieb und Neuanlage werden die Vollbenutzungsstunden, die Holzhackschnitzelpreise und der Anteil der Wärmenutzung in einer Sensitivitätsbetrachtung variiert. Dies ermöglicht dann eine Einschätzung der notwendigen Rahmenbedingungen, um die jeweilige KWK-Anlage wirtschaftlich betreiben zu können.

In der Wirtschaftlichkeit sind u. a. folgende Rahmenbedingungen zu Grunde gelegt.

Vollbenutzungsstunden:	8.000 h/a
Holzhackschnitzelpreis:	4 €/Sm ³
Anteil der Wärmenutzung:	50 %

Die genannten Parameter werden in der Sensitivitätsbetrachtung wie folgt variiert.

Vollbenutzungsstunden:	5.000 h/a ... 8.500 h/a
Holzhackschnitzelpreis:	0 €/Sm ³ ... 9 €/Sm ³
Anteil der Wärmenutzung:	0 % ... 100 %

Als Ergebnis der Sensitivitätsbetrachtung ist die Amortisation in Jahren angegeben. In Form von Diagrammen sind die Ergebnisse für die technischen Systeme dargestellt.

Die zugehörigen Werte zum Jahresüberschuss und zur statischen Amortisation können aus den entsprechenden Tabellen im Anhang entnommen werden.

Die folgenden Diagramme zu jeder KWK-Anlage stellen die Amortisation für die variierten Parameter dar. Es sind die Ergebnisse der beiden Anwendungsfälle „KWK-Anlage in vorhandenem Betrieb“ und KWK-Anlage als Neuanlage“ in Form von Kurven aufgetragen.

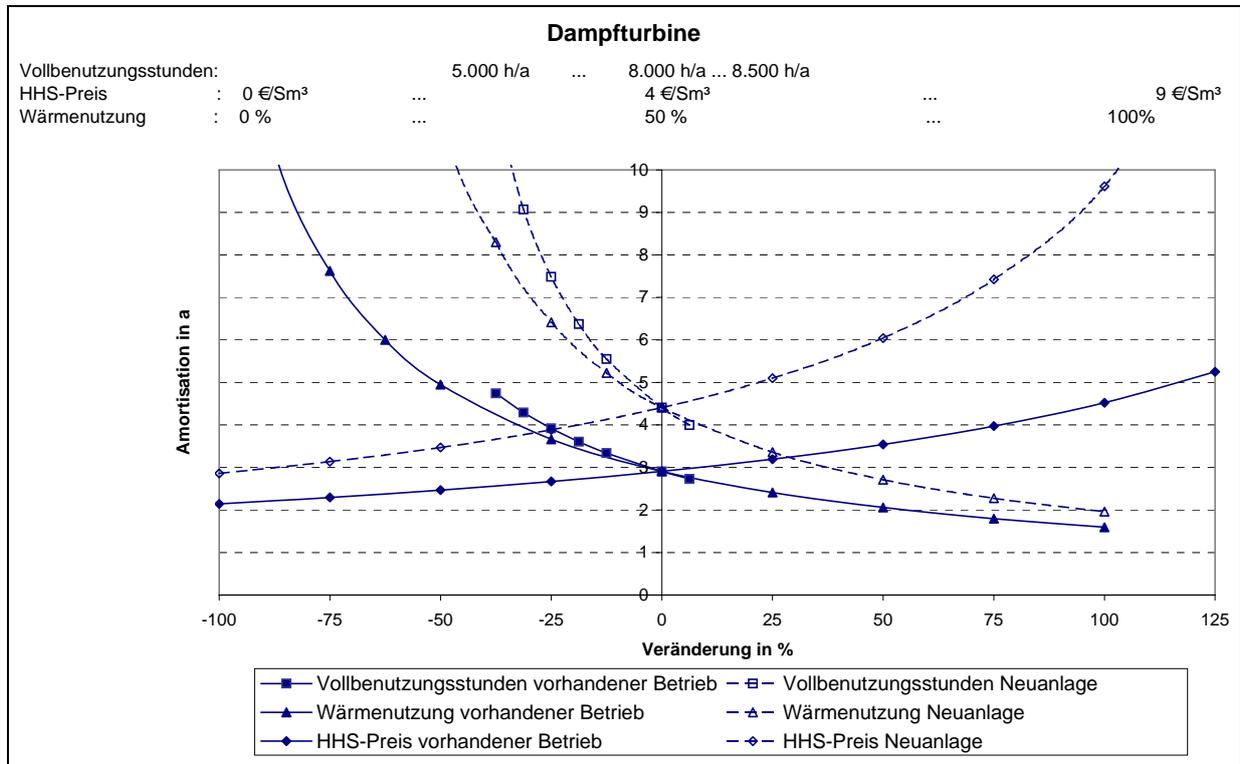


Abbildung 4-1 Sensitivität der Amortisation für Dampfturbine

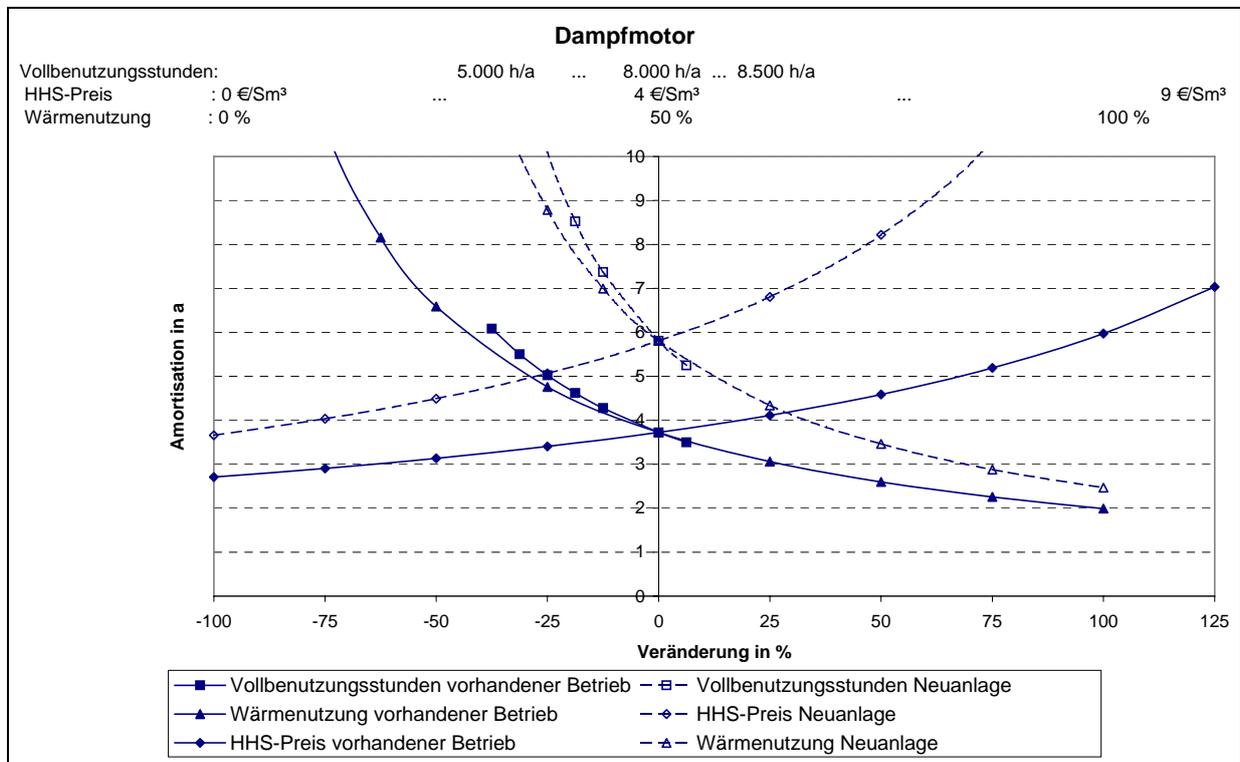


Abbildung 4-2 Sensitivität der Amortisation für Dampfmotor

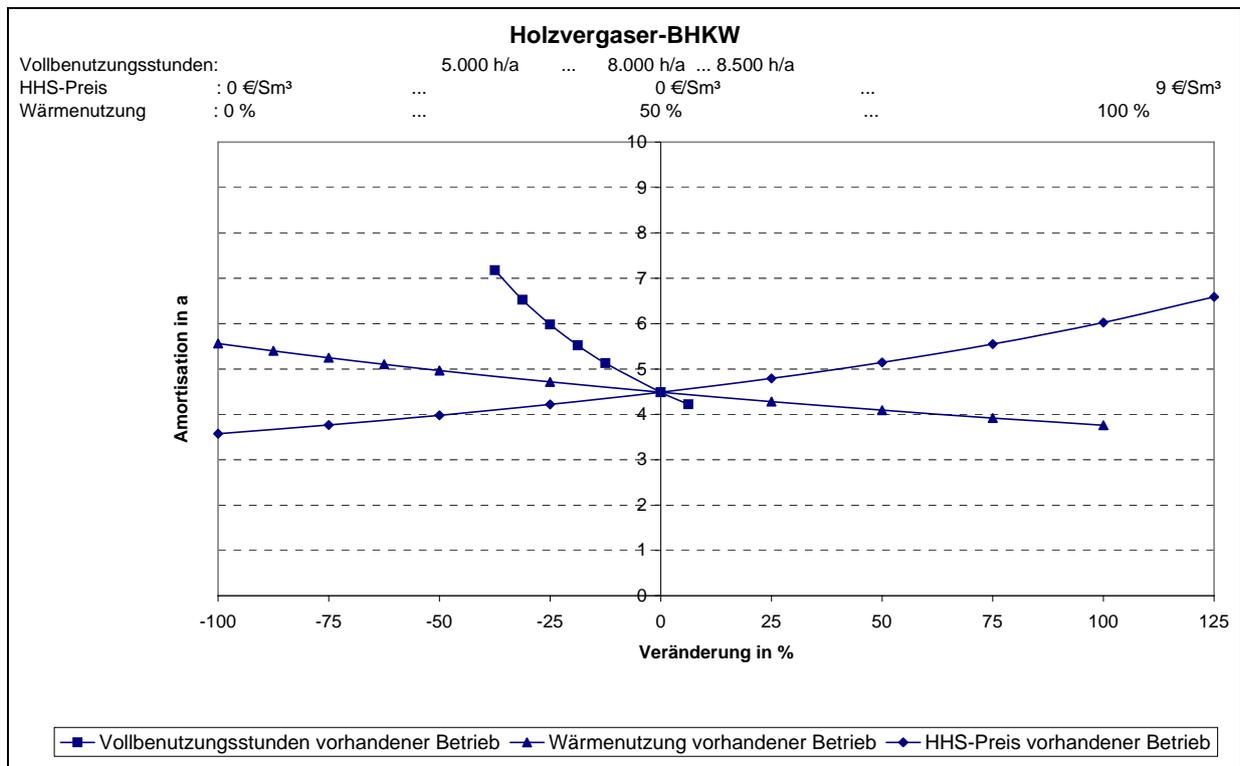


Abbildung 4-3 Sensitivität der Amortisation für Holzvergaser-BHKW

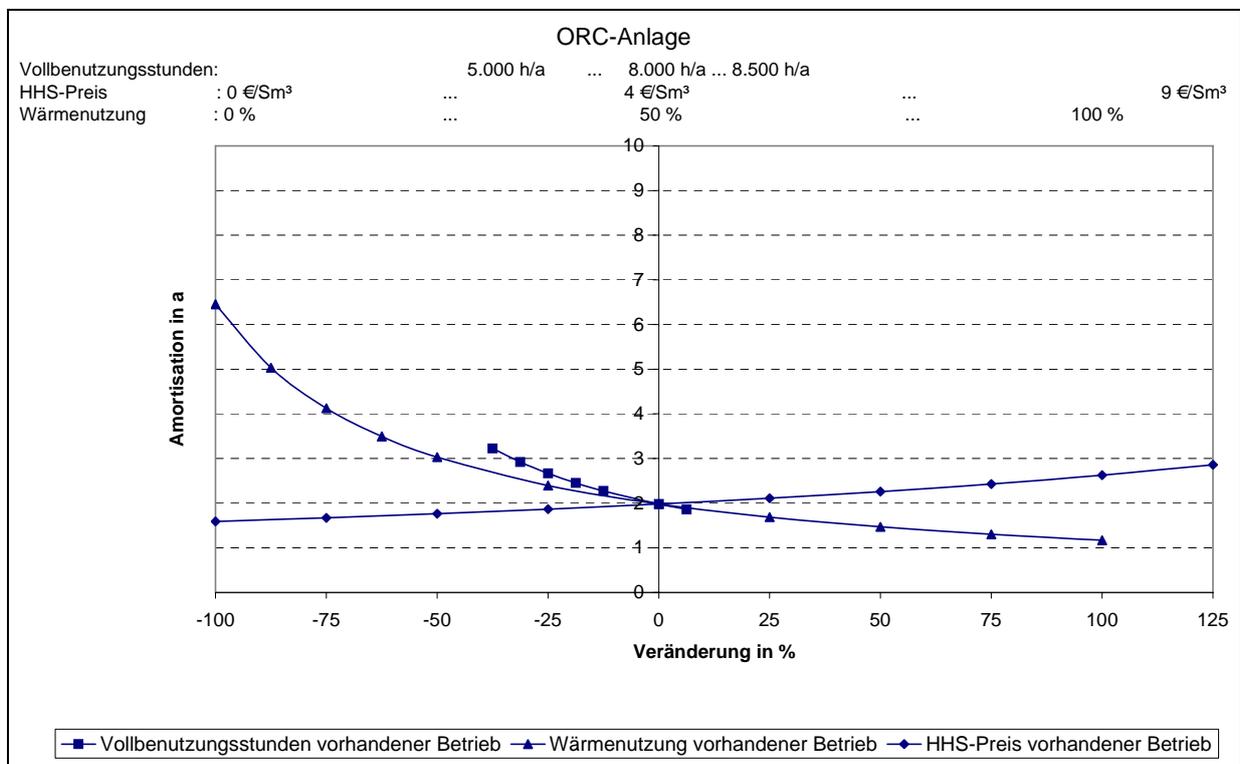


Abbildung 4-4 Sensitivität der Amortisation für ORC-Anlage

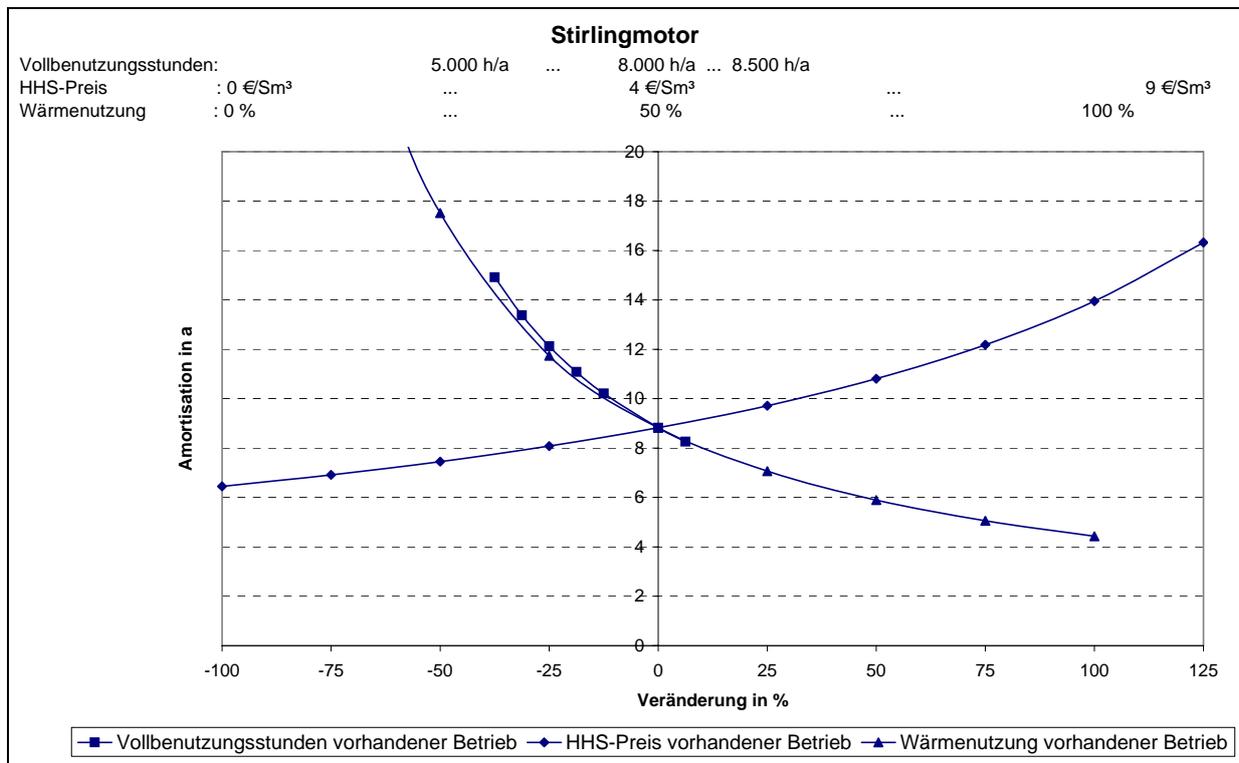


Abbildung 4-5 Sensitivität der Amortisation für Stirlingmotor

Je größer die Steigung der Kurve ist, desto höher ist der Einfluss des zugehörigen Parameters auf die Amortisation, sodass sich auf die einzelnen KWK-Anlagen unterschiedliche Einflussmöglichkeiten ergeben.

Folgende Rahmenbedingungen sind für die einzelnen Techniken erforderlich, um diese wirtschaftlich betreiben zu können.

Dampfturbine:

- Wärmenutzung erforderlich
- hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz im Mix mit zugekauftem Industrierestholz

Dampfmotor:

- Wärmenutzung erforderlich
- hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz im Mix mit zugekauftem Industrierestholz

Holzvergaser-BHKW:

- Wärmenutzung wünschenswert
- hohe Vollbenutzungsstunden
- Industrierestholz oder zugekauftes Industrierestholz

ORC-Anlage:

- Wärmenutzung wünschenswert
- hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz oder zugekauftes Industrierestholz im Mix auch mit Waldholz

Stirlingmotor:

- Wärmenutzung zwingend erforderlich
- sehr hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz
- aufgrund des kleinen Leistungsbereichs für kleinere dezentrale Anwendungsfälle geeignet und dadurch häufiger einsetzbar

5 Zusammenfassung

Die Studie untersuchte dezentrale Techniken zur Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse in kleinen Leistungsbereichen.

Folgende technischen Systeme wurden vorgestellt und vergleichend bewertet:

- Dampfturbine (Speed Power Module)
- Dampfmotor
- Holzvergaser-BHKW
- ORC-Anlage
- Stirlingmotor

Die Bewertung erfolgte in Hinblick auf den technischen Entwicklungsstand, den Einsatzbereich, der Effizienz und der Wirtschaftlichkeit. Dazu wurden z. T. vorhandene Anlagen als beispielhafte Anwendungsfälle herangezogen.

Folgende technische Systeme wurden mit den aufgeführten Kenndaten für den Vergleich zu Grunde gelegt.

		Dampfturbine	Dampf- motor	Holzvergaser- BHKW	ORC-Anlage	Stirling- motor
elektrische Leistung	kW _{el}	200 - 10.000	20 - 2.000	60 - 500	300 - 1.000	bis 100
thermische Leistung	kW _{th}	1.000 - 20.000	80 - 8.000	150 - 1.000	1.700 - 6.000	bis 500
elektr. Wirkungsgrad	%	10 - 25	11 - 15	20 - 28	14	10 - 12
therm. Wirkungsgrad	%	35 - 63	60 - 65	50 - 57	81	65 - 75
Gesamteffizienz	%	60 - 74	70 - 78	80 - 85	95	85 - 87

Tabelle 5-1 Kenndaten der technischen Systeme

Aus diesen Anlagen wurde für die weitere Untersuchung jeweils ein Anwendungsfall ausgewählt. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

		Dampfturbine	Dampfmotor	Holzvergaser- BHKW	ORC- Anlage	Stirlingmotor
		KK&K	Spilling		STIA	Mawera
elektrische Leistung	kW _{el}	500	500	500	400	35
thermische Leistung	kW _{th}	3.000	3.000	915	2.300	225
elektr. Wirkungsgrad	%	11	11	28	14	12
therm. Wirkungsgrad	%	63	63	47	81	75
Gesamteffizienz	%	74	74	75	95	87
Vollbenutzungsstunden	h/a	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000

Tabelle 5-2 Kenndaten der Anwendungsfälle

Auf der Energiebilanz basierte eine Kohlendioxid-Emissionsbilanz zur ökologischen Bewertung der technischen Systeme. Alle KWK-Anlagen tragen zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen bei, da sie aufgrund der Verdrängung von Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft- bzw. Heizwerken global gesehen mehr Kohlendioxid einsparen als sie vor Ort emittieren.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermittelte die jährlichen Kosten und Einnahmen für jedes System. Ergänzend zum Jahresüberschuss wird die statische Amortisation der KWK-Anlagen angegeben.

Für die Wirtschaftlichkeit wurde zunächst angenommen, dass alle KWK-Anlagen in einer vorhandenen Infrastruktur eines Betriebs installiert wird. Für die Dampfturbine und den Dampfmotor wurde zusätzlich eine Neuanlage auf der „grünen Wiese“ betrachtet.

Eine Dampfturbine (Speed Power Module) mit 500 kW_{el} erzielt einen Jahresüberschuss von etwa 356.700 €/a (vorhandener Betrieb) bzw. 183.400 €/a (Neuanlage). Die zugehörige statische Amortisation beträgt 2,9 Jahre bzw. 4,4 Jahre.

Für den betrachteten Dampfmotor mit 500 kW_{el} ergibt sich ein Jahresüberschuss von ca. 297.800 €/a (vorhandener Betrieb) bzw. 124.500 €/a (Neuanlage). Die statische Amortisation berechnet sich zu 3,7 Jahren bzw. 5,8 Jahren.

Ein Holzvergaser-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 500 kW_{el} erreicht einen Jahresüberschuss von ca. 149.800 €/a (vorhandener Betrieb). Daraus ergibt sich eine statische Amortisation von etwa 4,5 Jahren.

Ein Jahresüberschuss beträgt nach den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die in der Studie festgelegt wurden, für die ORC-Anlage mit 400 kW_{el} in der Holzindustrie STIA in Admont / Österreich (EU-Thermie-Projekt Admont) rund 369.800 €/a (vorhandener Betrieb). Als statische Amortisation wurden 2,0 Jahre ermittelt.

Der Stirlingmotor mit 35 kW_{el} erwirtschaftet unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen einen Jahresüberschuss von etwa 2.900 €/a (vorhandener Betrieb). Die zugehörige statische Amortisation beträgt 8,8 Jahre.

In einer weiteren Betrachtung wurden unterschiedliche Anwendungsfälle untersucht, die durch verschiedene Vollbenutzungsstunden, Holzhackschnitzelpreise und verschiedene Anteile der Wärmenutzung charakterisiert sind. In Diagrammen sind die Ergebnisse für jede KWK-Anlage dargestellt, sodass dies eine Einschätzung der notwendigen Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb der KWK-Anlage ermöglicht.

Folgende Rahmenbedingungen sind für die einzelnen Techniken erforderlich, um diese wirtschaftlich betreiben zu können.

Dampfturbine:

- Wärmenutzung erforderlich
- hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz im Mix mit zugekauftem Industrierestholz

Dampfmotor:

- Wärmenutzung erforderlich
- hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz im Mix mit zugekauftem Industrierestholz

Holzvergaser-BHKW:

- Wärmenutzung wünschenswert
- hohe Vollbenutzungsstunden
- Industrierestholz oder zugekauftes Industrierestholz

ORC-Anlage:

- Wärmenutzung wünschenswert
- hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz oder zugekauftes Industrierestholz im Mix auch mit Waldholz

Stirlingmotor:

- Wärmenutzung zwingend erforderlich
- sehr hohe Vollbenutzungsstunden
- vorhandenes Industrierestholz
- aufgrund des kleinen Leistungsbereichs für kleinere dezentrale Anwendungsfälle geeignet und dadurch häufiger einsetzbar

Fazit

Der Einsatz einer bestimmten KWK-Anlage, die Biomasse zur Strom- und Wärmeerzeugung einsetzt, richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Die Dampfprozesse stellen sich nicht als Konkurrenz zu den übrigen KWK-Anlagen dar, da sie aufgrund verschiedener Techniken und Rahmenbedingungen nicht für alle Einsatzfälle geeignet sind.

Für den Einsatz einer KWK-Anlage, die aus Biomasse Strom- und Wärme erzeugt, ist ein hoher elektrischer Wirkungsgrad und hohe Vollbenutzungsstunden entscheidend. Außerdem stellt eine hohe Wärmenutzung und deren Vergütung eine wichtige Komponente in der Wirtschaftlichkeit dar. Es ist für alle KWK-Anlagen sinnvoll, die erzeugte Wärme zu nutzen.

6 Anhang

statische Amortisation von KWK-Anlage in vorhandenem Betrieb					
Vollbenutzungsstunden in h/a	Dampfturbine	Dampfmotor	Holzvergaser- BHKW	ORC-Anlage	Stirlingmotor
5.000	4,7	6,1	7,2	3,2	14,9
6.000	3,9	5,0	6,0	2,7	12,1
7.000	3,3	4,3	5,1	2,3	10,2
8.000 ²	2,9	3,7	4,5	2,0	8,8
8.500	2,7	3,5	4,2	1,9	8,3
Holzhackschnitzelpreis in €/Sm ³	Dampfturbine	Dampfmotor	Holzvergaser- BHKW	ORC-Anlage	Stirlingmotor
0	2,1	2,7	3,6	1,6	6,5
1	2,3	2,9	3,8	1,7	6,9
2	2,5	3,1	4,0	1,8	7,5
3	2,7	3,4	4,2	1,9	8,1
4 ²	2,9	3,7	4,5	2,0	8,8
5	3,2	4,1	4,8	2,1	9,7
6	3,5	4,6	5,1	2,3	10,8
7	4,0	5,2	5,5	2,4	12,2
8	4,5	6,0	6,0	2,6	14,0
9	5,3	7,0	6,6	2,9	16,3
Wärmenutzung in %	Dampfturbine	Dampfmotor	Holzvergaser- BHKW	ORC-Anlage	Stirlingmotor
0	16,6	28,5	5,6	6,5	1.185,5
25	4,9	6,6	5,0	3,0	17,5
50 ²	2,9	3,7	4,5	2,0	8,8
75	2,1	2,6	4,1	1,5	5,9
100	1,6	2,0	3,8	1,2	4,4

² In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung als Rahmenbedingung zu Grunde gelegt.

statische Amortisation von KWK-Anlage als Neuanlage		
Vollbenutzungsstunden in h/a	Dampfturbine	Dampfmotor
5.000	11,5	16,0
6.000	7,5	10,1
7.000	5,5	7,4
8.000 ³	4,4	5,8
8.500	4,0	5,3
Holz hackschnitzelpreis in €/Sm ³	Dampfturbine	Dampfmotor
0	2,9	3,7
1	3,1	4,0
2	3,5	4,5
3	3,9	5,1
4 ³	4,4	5,8
5	5,1	6,8
6	6,0	8,2
7	7,4	10,4
8	9,6	14,1
9	13,6	21,8
Wärmenutzung in %	Dampfturbine	Dampfmotor
0		
25	11,8	18,8
50 ³	4,4	5,8
75	2,7	3,5
100	2,0	2,5

³ In der Wirtschaftlichkeit als Rahmenbedingung zu Grunde gelegt.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Anlagenschema eines Dampfmotors mit holzbefeuerten Dampfkessel (Quelle: Spilling Energie System GmbH)	5
Abbildung 1-2 Schema einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung mit ORC-Prozess (Quelle: BIOS Bioenergiesystem GmbH, Graz)	7
Abbildung 1-3 Elektrische Leistungsbereiche der technischen Systeme	10
Abbildung 4-1 Sensitivität der Amortisation für Dampfturbine	27
Abbildung 4-2 Sensitivität der Amortisation für Dampfmotor	27
Abbildung 4-3 Sensitivität der Amortisation für Holzvergaser-BHKW	28
Abbildung 4-4 Sensitivität der Amortisation für ORC-Anlage	28
Abbildung 4-5 Sensitivität der Amortisation für Stirlingmotor	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Systemvergleich nach Leistungsdaten	10
Tabelle 2-1 Energiebilanz der Dampfturbine	12
Tabelle 2-2 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der Dampfturbine	12
Tabelle 2-3 Energiebilanz des Dampfmotors	13
Tabelle 2-4 Kohlendioxid-Emissionsbilanz des Dampfmotors	13
Tabelle 2-5 Energiebilanz des Holzvergaser-BHKWs	14
Tabelle 2-6 Kohlendioxid-Emissionsbilanz des Holzvergaser-BHKWs	14
Tabelle 2-7 Energiebilanz der ORC-Anlage	15
Tabelle 2-8 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der ORC-Anlage	15
Tabelle 2-9 Energiebilanz des Stirlingmotors	16
Tabelle 2-10 Kohlendioxid-Emissionsbilanz des Stirlingmotors	16
Tabelle 3-1 Wirtschaftlichkeit Dampfturbine	19
Tabelle 3-2 Wirtschaftlichkeit Dampfmotor	20
Tabelle 3-3 Wirtschaftlichkeit Holzvergaser-BHKW	21
Tabelle 3-4 Wirtschaftlichkeit ORC-Anlage	22
Tabelle 3-5 Wirtschaftlichkeit Stirlingmotor	23
Tabelle 4-1 Energiebilanz der technischen Systeme	24
Tabelle 4-2 Kohlendioxid-Emissionsbilanz der technischen Systeme	25
Tabelle 5-1 Kenndaten der technischen Systeme	31
Tabelle 5-2 Kenndaten der Anwendungsfälle	31