

Fachhochschule Lippe und Höxter
Fachbereich Maschinentechnik und Mechatronik
Labor Thermodynamik und Energietechnik

Prof. Dr.-Ing. Joachim Dohmann

Biomasse-Kraftwerk
- Projektskizze -



Lemgo, Mai 2007

Abstract

Vorgestellt wird ein Konzept für ein Biomasse-Kraftwerk. Es handelt sich um ein Kraftwerk unter Verwendung von Biomassen aus der Landwirtschaft und der Forstwirtschaft. Das Kraftwerk stellt die leitungsgebundenen Energieformen Strom, Gas und Fernwärme zur Verfügung. Vorgestellt werden ebenfalls einige Grundprinzipien, die Einfluss auf das Konzept genommen haben. Das Konzept ist sehr gut geeignet, in Form eines Hochschulkraftwerks der Fachhochschule Lippe und Höxter am Standort Lemgo realisiert zu werden.

1. Erneuerbare Energien

Die Anforderungen an zukünftige Energiekonzepte werden durch die drohende Verknappung, durch steigende Preise und durch sinkende Verfügbarkeit fossiler Energieträger beeinflusst. Ferner rücken Umweltverträglichkeit und Klimaschutz weiter in den Fokus der politischen Diskussion. Die Energieversorgung allgemein wird daher konzeptionellen Änderungen unterworfen sein. Erneuerbare Energien werden eine zunehmende Rolle in der Energieversorgung spielen.

Tabelle 1: Nutzung und Potential der verschiedenen erneuerbaren Energiequellen.

	Strom		Wärme		Kraftstoff	
	Nutzung	Potential	Nutzung	Potential	Nutzung	Potential
	TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a
Wasserkraft	21,5	24	-	-	-	-
Windkraft	26,5	165	-	-	-	-
Biomasse	13,1	60	76,5	200	20,7	60
Photovoltaik	1,0	105	-	-	-	-
Geothermie	0,002	200	1,6	330	-	-
Solarthermie	-	-	3	290	-	-
Erneuerbare Gesamt	62,1	554	81,1	820	20,7	60
Gesamtverbrauch	611		1500		610	
Quelle: BMWi 2006						

Die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien ist bei dem Entwurf von Energiekonzepten selbstverständlich zu berücksichtigen. Die Versorgung erfolgt in den Anwendungssektoren Strom, Wärme und Mobilität. Die verschiedenen Energiequellen sind unterschiedlich zur Bedienung dieser Sektoren geeignet.

Eine Übersicht über das Potential der verschiedenen Energiequellen in Deutschland ist in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Wasserkraft ist die traditionelle erneuerbare Energie. Wasserkraft läßt sich zur Stromgewinnung einsetzen. Der Anteil an der Stromerzeugung beträgt etwa 3-4%. Zukünftige Möglichkeiten eines weiteren Ausbaus dieser Energieform in Deutschland sind nicht zu erwarten.

Die **Windkraft** hat in den letzten Jahren erhebliche Zuwachsraten gezeigt. Die Marktanteile am Strommarkt haben die 4%-Marke überschritten und damit die Wasserkraft übertroffen. Im Bereich der Windkraft sind erhebliche Potentiale vorhanden, hierbei handelt es sich aber überwiegend um neue Windkraftanlagen im Offshorebereich. Im Binnenland sind die meisten „guten“ Anlagenstandorte besetzt. Es wird zukünftig schwierig sein, weitere Standorte zu finden. Ein gewisses Potential besteht aber darin, ältere kleine Anlagen durch neue Großanlagen zu ersetzen (Repowering).

Die Nutzung von **Biomasse** umfasst Techniken wie Verbrennung von Holz zur Erzeugung von Wärme und Strom, die Vergärung landwirtschaftlicher Produkte in Biogasanlagen zu Biogas und der anschließenden Nutzung in dezentralen Blockheizkraftwerken. In den vergangenen Jahren wurde die Herstellung von Biodiesel aus Rapsöl vorangetrieben. Die Herstellung von Bioethanol beginnt aktuell wirtschaftlich zu werden.

Alle drei Anwendungssektoren können durch den Einsatz von Biomasse bedient werden. Die angegebenen Potentiale sind allerdings sehr schwierig zu ermitteln, da die Herstellung von Biomasse zur energetischen Verwendung in Konkurrenz steht mit dem Anbau von Nahrungsmitteln. Zur Zeit stehen allerdings noch stillgelegte Flächen zum Anbau energetisch nutzbarer Biomasse ungenutzt zur Verfügung.

Speziell im Bereich der Strom- und der Wärmeerzeugung sind wachsende Marktanteile dieses Energieträgers zu erwarten.

Bei der **Geothermie** ist eine Unterscheidung zu treffen zwischen der sog. Tiefengeothermie und der oberflächennahen Geothermie. Der Tiefengeothermie wird das enorme Potential von 200 TWh/a zugeordnet, das heute praktisch ungenutzt ist. Hierzu ist anzumerken, dass diese Form der Energiegewinnung zwar Stand der Forschung aber nicht Stand der Technik ist. Die weitere Entwicklung bleibt abzuwarten.

Die oberflächennahe Geothermie zur Bereitstellung von Wärme besitzt ein sehr großes Potential in der Größenordnung von 330 TWh/a. Die Anwendung erfordert jedoch den Einsatz von elektrischer Energie. Das Verhältnis zwischen geothermisch gewonnener Wärme und notwendigem Strombedarf besitzt etwa den Zahlenwert 3. Die vollständige Nutzung des Potentials erfordert daher den Einsatz von ca. 100 TWh/a elektrischer Energie. Sofern diese Energie aus thermischen Kraftwerken (fossil oder erneuerbar) gedeckt wird und diese Kraftwerke einen Wirkungsgrad von 1/3 besitzen, stellt die oberflächennahe Geothermie überhaupt keinen Netto-Energiegewinn dar. Die einfache Angabe des Potentials überdeckt die-

sen Zusammenhang vollständig. Zur wirkungsvollen Nutzung der Geothermie sind effiziente Kraftwerke zur Stromlieferung und große Leistungsziffern der Wärmepumpenprozesse erforderlich.

Die **Solarthermie** besitzt ebenfalls ein sehr großes Potential, sicher lassen sich durch Einsatz dieser Technik erhebliche fossile Primärenergien einsparen. Die Angabe des Potentials verschleiert aber das technische Grundproblem, dass der Wärmefall und der Wärmebedarf zeitlich versetzt sind. Die Kombination von oberflächennaher Geothermie und der Solarthermie bietet in diesem Zusammenhang einige sinnvolle Kombinationslösungen.

Die Photovoltaik bietet die Möglichkeiten der Gewinnung elektrischer Energie. Heute ist die Photovoltaik aber leider noch eine sehr teure Energie. Statt erhebliche Investitionen in diesem Bereich zum gegenwärtigen Zeitpunkt zu tätigen, wäre eine massive Forcierung der Forschung sinnvoller, mit dem Ziel, den spezifischen Preis dieser Technik schnell zu senken.

2. Grundprinzipien

Primärenergie ist keine Nutzenergie. Letztere entsteht aus der Primärenergie durch einen Umwandlungsprozess. Diese Umwandlungsprozesse sind stets mit Verlusten behaftet, die teilweise aus thermodynamischen Gründen unvermeidbar sind, teilweise auf der Unvollkommenheit der beteiligten Maschinen beruhen. Nutzenergie und Primärenergie sind durch die fundamentale Beziehung

$$\dot{m}_B = \frac{P}{\eta \cdot h_u}$$

verknüpft. Der Massenstrom \dot{m}_B eines Brennstoffs ist mit der Leistung P direkt gekoppelt. Die Verknüpfungsgröße ist der thermische Wirkungsgrad η , der einerseits abhängig ist von der Technik, andererseits abhängig ist von der Größe einer Energiemaschine. Im Zusammenhang mit dem Klimaschutz ist der thermische Wirkungsgrad von großer Bedeutung, da die ausgestoßene Menge an Kohlendioxid direkt mit dem Brennstoffverbrauch verbunden ist. Um die Kohlendioxidemission zu begrenzen, ist einerseits die (vermeidbare) Leistung zu reduzieren, andererseits die Verwendung besonders effizienter Maschinen ein Muss. Abb. 1 zeigt den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Maschinengröße für einige ausgewählte Techniken. Es handelt sich dabei offenbar um ein universelles Prinzip, unabhängig von der gewählten Technik: Große Maschinen besitzen große Wirkungsgrade, kleine Maschinen besitzen kleine Wirkungsgrade.

Für die Verbrennung von Erdgas in Gasmotoren werden bei kleinen Maschinen Wirkungsgrade um 20% gefunden, bei großen hingegen von 40%. Zur Bereitstellung elektrischer Nutzenergie bedeutet dies, dass kleine Maschinen doppelt so viel Brennstoff verbrauchen und CO₂ emittieren, als dies bei Verbrennung in großen Maschinen der Fall wäre. Diese Tatsache spricht für die Verwendung von Maschinen großer Größe.

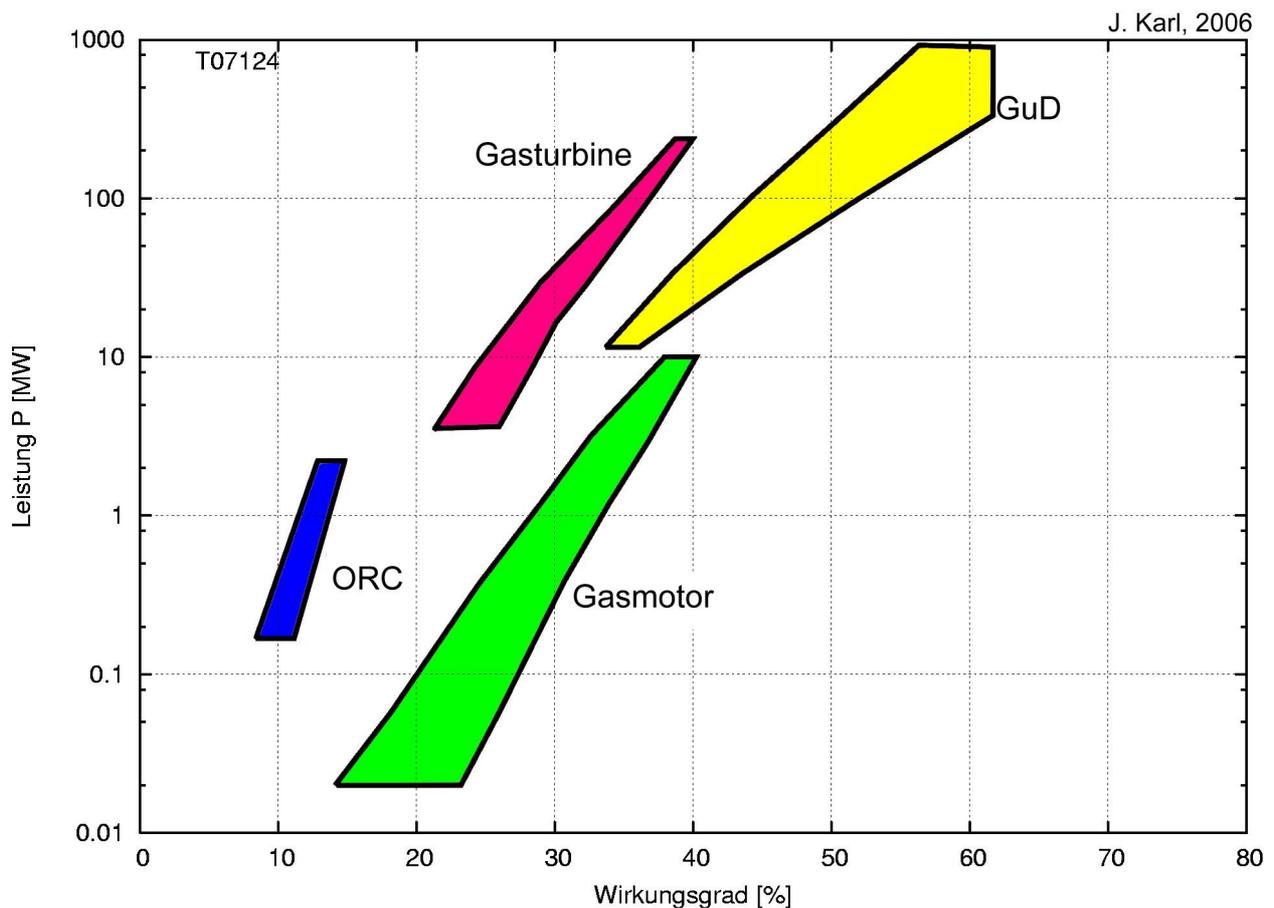


Abb. 1: Zusammenhang zwischen der Nennleistung einer Maschine und dem thermischen Wirkungsgrad für eine Auswahl von Kraftprozessen. ORC: Organic Rankine-Cycle, GuD: Gas- und Dampf-Turbinenprozess. [Kar06]

Der Zusammenhang ist in Abb. 2 für Gasmotoren präzisiert. Gasmotoren werden gerne im Zusammenhang dezentraler Energieversorgungssysteme eingesetzt. Die Daten der Abb. 2 entstammen einem Marktvergleich [Asue05] und basiert auf konkreten Anfragen bei Herstellern. Abb. 2 ist zu entnehmen, dass Wirkungsgrade oberhalb von 30% erst ab einer Maschinengröße von 500 kW zu erreichen ist. Die Daten unterliegen allerdings einer starken Streuung. Hieraus kann die Empfehlung abgeleitet werden, im Falle konkreter Kaufabsichten einen intensiven technischen Vergleich vorzunehmen. Es darf erwartet werden, dass die Wirkungsgrade zukünftiger Gasmotoren gegenüber heutigen Maschinen infolge technischer Verbesserungen noch etwas ansteigen wird. Der prinzipielle Zusammenhang zwischen der Anlagengröße und dem Wirkungsgrad wird allerdings erhalten bleiben.

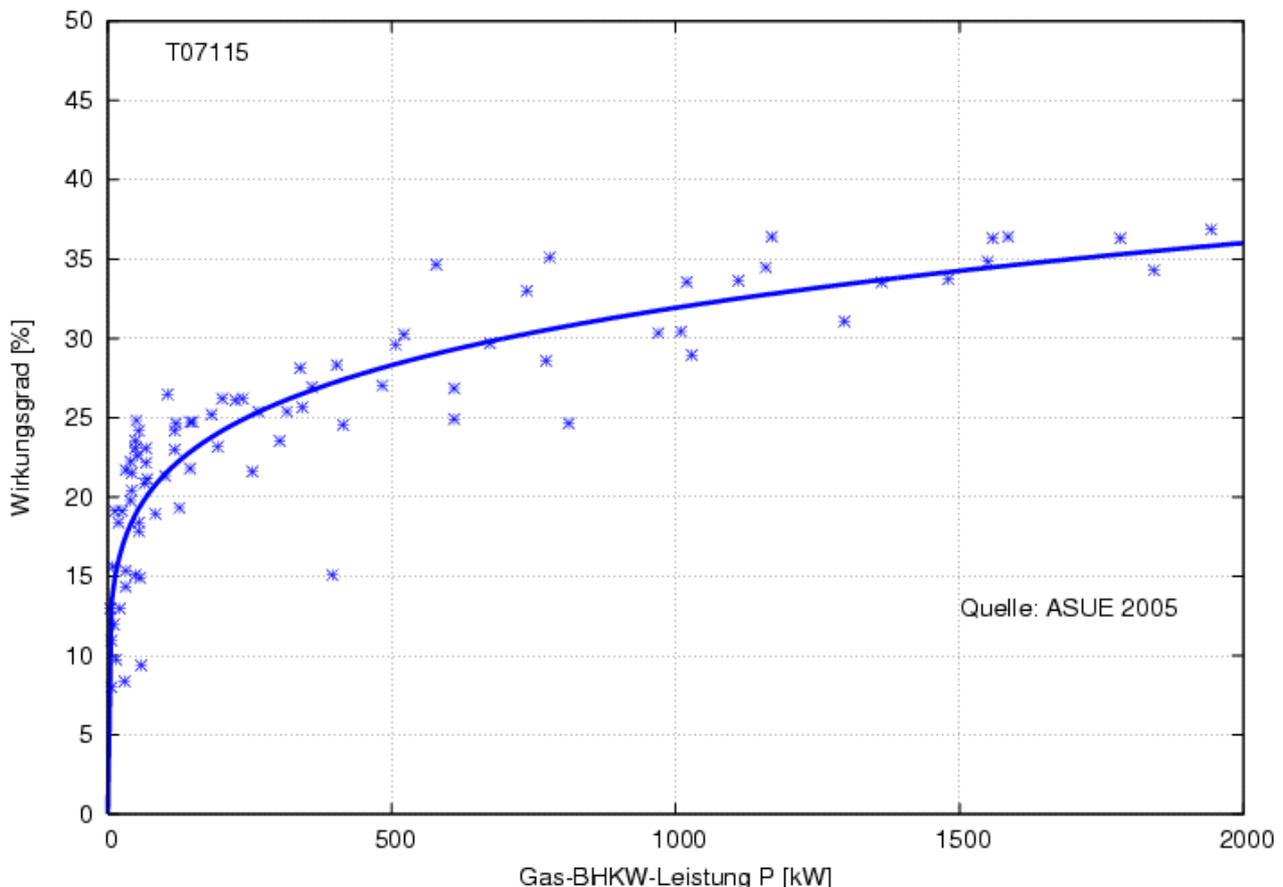


Abb. 2: Wirkungsgrad von Gasmotoren für den Einsatz in Blockheizkraftwerken.

Wirkungsgrade beeinflussen die Kosten einer Energieversorgungsstruktur direkt über den Brennstoffbedarf und damit über die Brennstoffkosten. Die Wirtschaftlichkeit einer Struktur ist aber in gleicher Größenordnung von den Beschaffungskosten abhängig. In Abb. 3 ist der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Anlagenpreis in Abhängigkeit von der Anlagengröße für Gas-BHKWs dargestellt. Bei größeren Modulgrößen stabilisiert sich der Preis bei einem Wert von ca. 500 €/kW. Bei kleineren Anlagen kann der spezifische Preis durchaus Werte erreichen, die um einen Faktor 5 höher sind. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass bei Vergrößerung einer Maschine Kostenanteile auftreten, die nicht proportional mit der Größe mitwachsen. Dieser Zusammenhang wird auch als Kostendegression bezeichnet. Auch in Bezug auf diese Eigenschaft sind große Maschinen offenbar in einem klaren Vorteil.

Die optimale Maschinengröße ist nicht allein durch technische Aspekte bestimmt. Vielmehr ist beim Übergang zu größten Maschinen zu beachten, dass größte Maschinen auch größte Einzugsgebiete zum Anbau der Biomasse erfordern. Die mittlere Transportentfernung wächst mit der Maschinengröße an. Dieser Zusammenhang ist bei der wirtschaftlichen Optimierung von Kraftwerken zu Berücksichtigen und führt zu einer natürlichen Begrenzung der Größe.

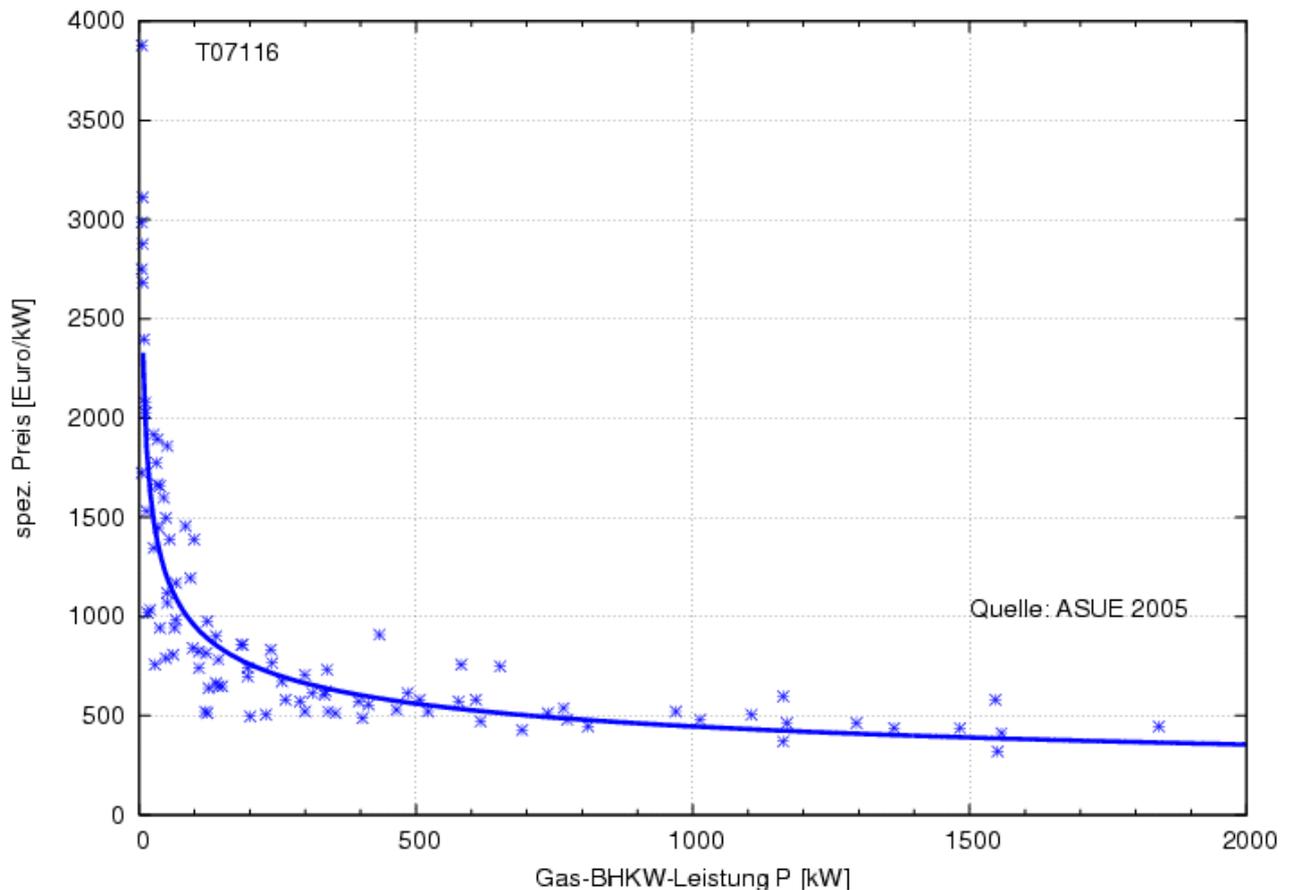


Abb. 3: Zusammenhang zwischen spezifischen Preis und der Größe von Gas-BHKW. Die spezifischen Preise stabilisieren sich im Größenbereich oberhalb der 500 kW-Klasse.

3. Markt

3.1 Strommarkt

Der Markt für Strom aus erneuerbaren Energien ist ein regulierter Markt. Der Gesetzgeber garantiert den Zugang zu bestehenden Netzen. Außerdem werden Einspeisevergütungen durch das Erneuerbare Energiengesetz EEG festgelegt. Für eine 500 kW-Maschine mit Inbetriebnahme in 2007 sind mögliche Vergütungssätze in Tab. 2 zusammengestellt.

Der Gesetzgeber formuliert im EEG zunächst eine Grundvergütung. Der genaue Wert dieser Grundvergütung hängt für Gasmotoren für den Einsatz von Biogas von der Größe ab. Strom aus kleineren Maschinen wird höher vergütet als Strom aus großen Maschinen. Hierdurch sollten mit Hinblick auf die Kostendegression offenbar Anreize für den Bau kleinerer Einheiten geschaffen werden. Eine zielstrebigere Förderung wäre aber sicher durch Kopplung der Vergütungssätze an Wirkungsgrade erreicht worden.

Tab.2: Vergütungssätze nach dem EEG.

	[ct/kWh]	Grundlage
Grundvergütung	9,45	EEG §8, Abs.1 u. Abs.5
Nawaro-Bonus	6,00	EEG §8, Abs. 2
KWK-Bonus		EEG §8, Abs. 3
	2,00	KWKG §3, Abs. 4
Technologie-Bonus	2,00	EEG §8, Abs. 4
Summe	19,45	

Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Primärenergieträger - gemeint sind native Biomassen der Landwirtschaft und Forstwirtschaft - führt zur Gewährung des Nawaro-Bonus. Hierbei ist zu beachten, dass der Einsatz von Rückständen aus der Verarbeitung von Biomassen sofort zum Verlust dieses Bonus führt.

Der Kraft-Wärme-Kopplungsbonus wird gewährt, wenn die bei der Stromerzeugung unvermeidbar anfallende Wärme im Sinne des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes genutzt wird. Hierzu zählt beispielsweise die Einspeisung der Wärme in ein Fernwärmenetz. Es sind allerdings zahlreiche technische Mindestanforderungen zu erfüllen.

Der Technologie-Bonus wird gewährt, wenn fortschrittliche Verfahren eingesetzt werden. Hierzu zählt beispielsweise die Reinigung von Biogas auf Erdgasqualität.

Bei der Konzeption des Kraftwerks wurde die gesetzliche Regelung berücksichtigt und das Ziel verfolgt, die verschiedenen Boni gleichzeitig zu beanspruchen. Der Vergütungssatz verdoppelt sich in diesem Fall gegenüber dem Grundvergütungssatz.

3.2 Wärmemarkt

Der Wärmemarkt ist im Gegensatz zum Strommarkt nicht reguliert. Wärme läßt sich aus technischen Gründen nur sehr schlecht über größere Entfernungen transportieren. Wärmequelle und Wärmeverbraucher müssen daher in räumlicher Nähe zueinander liegen. Der Wärmemarkt basiert daher ausschließlich auf Einzelverträgen zwischen Wärmeanbieter und Wärmekunden. Die Vergütungssätze unterscheiden sich daher erheblich. Denkbar sind Wärmepreise im Bereich zwischen 2 ct/kWh und 6 ct/kWh. Der höhere Preis orientiert sich am Preis für Erdgas. Die Versorgung großer Wärmeverbraucher (Gewächshäuser, Schulzentren, Hochschule, etc.) oder auch die Einspeisung in das Fernwärmenetz ist sinnvoll.

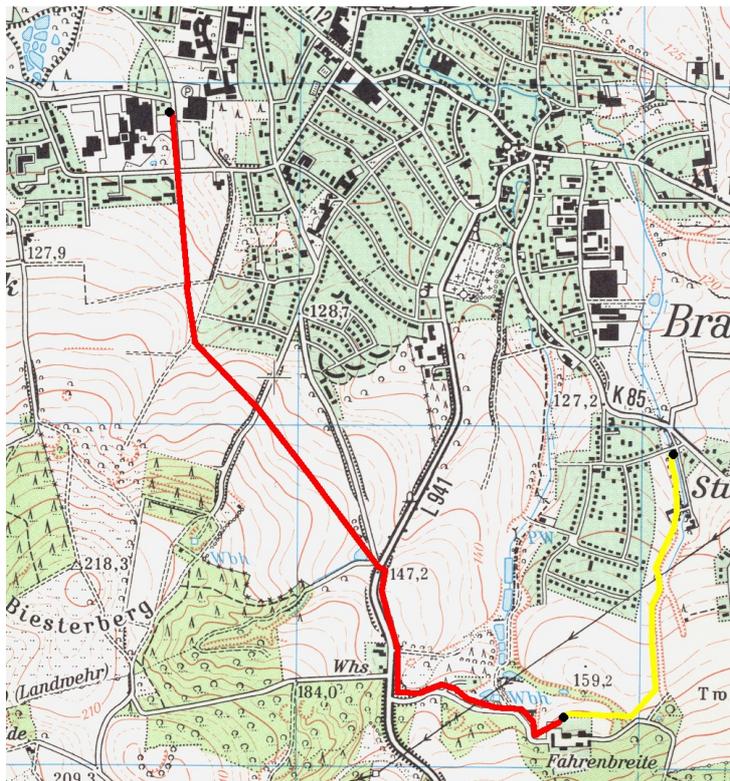


Abb. 4: Flurkarte von Lemgo. Eingezeichnet ist die Biogasleitung von der Biogasanlage Gut Fahrenbreite bis zum Hochschulkraftwerk (rot). Alternativ besteht die Möglichkeit zur Reinigung auf Erdgasqualität und der Einspeisung ins das öffentliche Netz (gelb).

3.3 Gasnutzung

Bei Verwendung von Biogasanlagen zur Vergärung von Biomassen ist auch denkbar, dass das Gas einer direkten Nutzung zugeführt wird. Biogas besteht etwa zur Hälfte aus Methan und zur Hälfte aus Kohlendioxid. Ferner sind noch in geringem Umfang Beimengungen anderer Gase, insbesondere Wasserdampf und Schwefelwasserstoff vorhanden. Biogas unterscheidet sich damit von Erdgas, das fast ausschließlich aus Methangas besteht.

Es sind damit zwei verschiedene Nutzungspfade möglich. Biogas kann in ein Biogasnetz eingespeist werden. Hierzu ist die Entfernung von Wasserdampf und die Entfernung von Schwefelwasserstoff erforderlich. Diese Gasreinigung entspricht dem Stand der Technik. Verbraucher, z.B. in Form von Biogasmotoren (Biogas-BHKW) können in der Nähe eines Wärmeverbrauchers angeschlossen werden. Es ist sogar denkbar, dass Erdgas bei Bedarf in dieses Biogasnetz eingeleitet wird, wenn das Biogasaufkommen den aktuellen Bedarf übersteigt. Diese Variante berechtigt nicht, den Technologie-Bonus in Anspruch zu nehmen.

In Abb. 4. ist die direkte Verbindung einer Biogasanlage mit einem Verbraucher dargestellt. Es handelt sich um die Biogasanlage auf Gut Fahrenbreite mit dem Biomasse-Kraftwerk auf dem Campus in Lemgo der Fachhochschule Lippe und Höxter.

Die alternative Nutzungsmöglichkeit besteht in der Reinigung des Biogases bis auf Erdgas-

qualität und die Einspeisung in das vorhandene Erdgasnetz. Für diese Technik gibt es im Inland bisher nur sehr wenige ausgeführte Beispiele. Die Technik wird aber prinzipiell beherrscht. Schwierigkeiten entstehen in diesem Fall aber dadurch, dass die Anforderungen an die Gasqualität zur Einspeisung in das Erdgasnetz unangemessen hoch sind und sich dies ungünstig auf die Kosten und den Energiebedarf der Gasreinigung auswirkt.

Es besteht daher grundsätzlich noch eine Kombinationslösung: Die regionalen Gasversorger deklarieren die lokalen Netze in Biogasnetze um. Die Anforderungen an die Gasqualität sind gegenüber den Anforderungen an Erdgasnetze auf ein technisch vernünftiges Maß gesenkt. Beispielsweise ist es aus praktischer vollkommen ausreichend, den Methangehalt in solchen Netzen auf z.B. 97,5 % (Rest Kohlendioxid) abzusenken. Ein derartiges Gas kann ohne Schwierigkeiten in allen Anwendungen eingesetzt werden ohne dass technische Änderungen an Kesseln, Brennern oder Motoren erforderlich wären.

4. Versorgungskonzept

Diese verschiedenen Vorüberlegungen führen auf verschiedene kommunale Versorgungskonzepte unter Einsatz von Biomassen als Energieträger. Eine dieser Schaltungen wird an dieser Stelle vorgestellt.

Das Biomassekraftwerk dient der kommunalen Versorgung mit Gas, Wärme und Strom, also leitungsgebundenen Energieformen.

Mais und ähnliche Biomassen werden in einer Biogasanlage eingesetzt, die als „Nawaro“-Anlage geführt wird. Die Gärrückstände können daher in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt werden. Das entstehende Biogas besteht etwa zu gleichen Teilen aus den Komponenten Methan und Kohlendioxid. Außerdem enthält es die Spurengase Wasserdampf und Schwefelwasserstoff.

Das Biogas wird in einer ersten Gasreinigung von den Spurengasen befreit. Dieser Schritt ist stets sorgfältig auszuführen, da hiervon die Lebensdauer aller nachgeschalteten Bauteile betroffen ist. In einer Gasreinigung-II wird die Trennung der beiden Hauptkomponenten vorgenommen. Das Methangas wird in das Erdgasnetz eingespeist.

Raps wird im Biomassekraftwerk in einer Rapspresse zu Öl und Presskuchen verarbeitet. Der Presskuchen wird in der Biogasanlage eingesetzt. Hier sorgt der Restölgehalt im Presskuchen für ausgesprochen hohe Biogausbeuten. Die Ölreinigung dient der Entfernung unerwünschter Pflanzenölbestandteile. Die entstehenden Rückstände werden ebenfalls in der Biogasanlage eingesetzt.

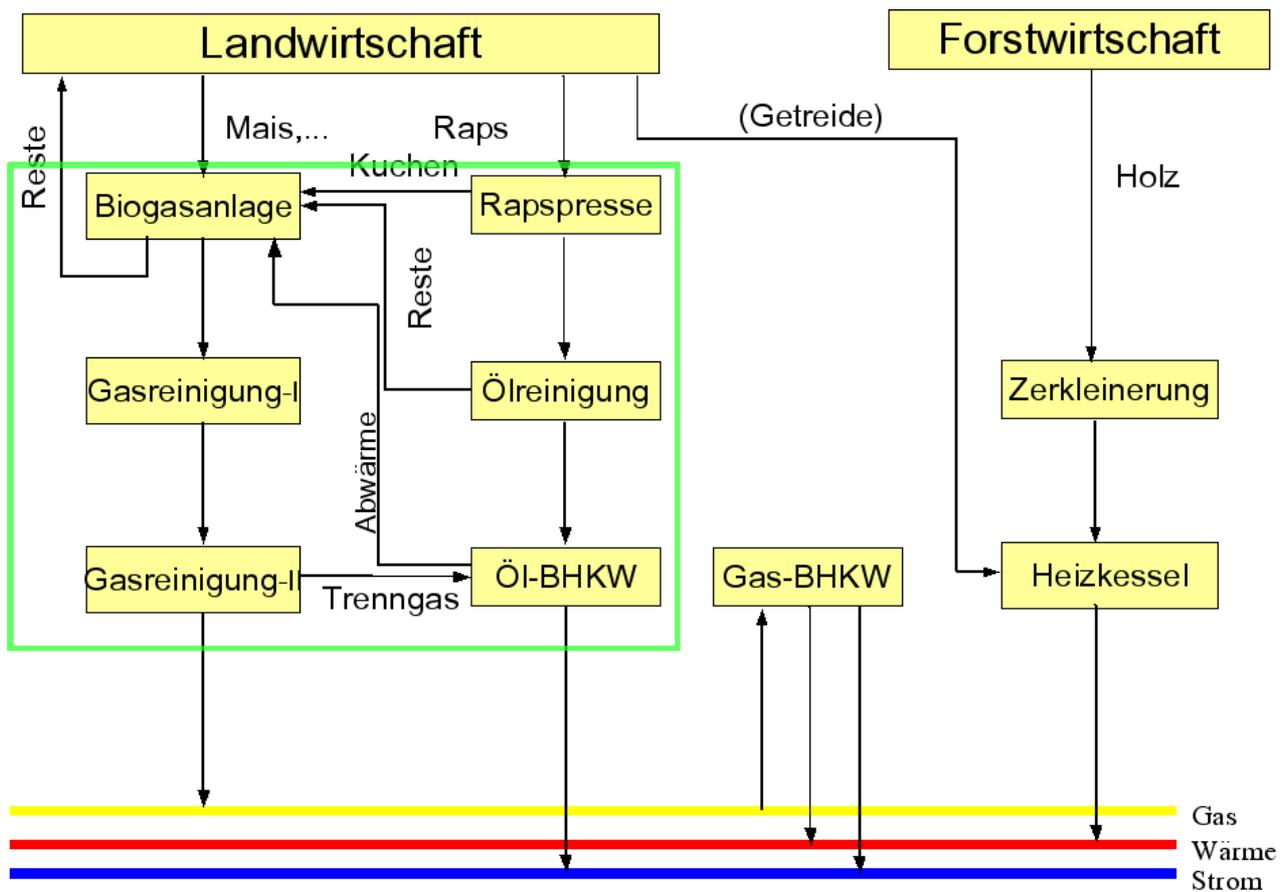


Abb. 5: Schema eines Biomassekraftwerks (Hochschulkraftwerk)

In der Ölerreinigung wird durch Verwendung eines Additivs und Wasser ein Mikroemulsionskraftstoff hergestellt. Dieser sorgt bei Einsatz des Kraftstoffs im Pflanzenöl-BHKW für geringe Stickoxid-Emissionen und geringe Rußbildung. Pflanzenöl-BHKW und Biogasanlage sind wärmetechnisch verschaltet. Je nach Aufstellungsort kann ein Teil der Abwärme des BHKW zusätzlich noch in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Dieser Teil der Kraft-Wärmekopplung kann besonders vorteilhaft in den kalten Wintermonaten genutzt werden. Pflanzenöl verfügt über optimale Lagerfähigkeiten.

Die Schaltung des Biomassekraftwerks kann durch eine Nutzung forstwirtschaftlicher Biomassen ergänzt werden. Sinnvoll ist die Verbrennung vorgetrockneter Holzhackschnitzel in einer speziellen Hackschnitzelfeuerung. Sinnvoll ist es auch, Hackschnitzel zu verwenden, die aus der Pflege der Straßenbegrünung stammen. Die Hackschnitzelfeuerung kann sowohl zur Deckung der Wärmegrundlast als auch der Spitzenlast eingesetzt werden.

5. Zusammenfassung

Das vorliegende Konzept des Biomassekraftwerks verwendet ausschließlich Biomassen aus der Landwirtschaft und Forstwirtschaft und liefert ausschließlich leitungsgebundene Energieformen. Die Schaltungsvariante wirkt sich positiv auf die Einspeisevergütungen aus.

Ein weiterer Vorteil dieser Schaltung liegt darin, dass das Gas sowohl räumlich entfernt als auch zeitlich getrennt entnommen werden kann. Über vertragliche Regelungen mit Endkunden kann daher aus dem Erdgasnetz „grünes“ Gas entnommen werden und zu speziellen Konditionen vermarktet werden.

Das Konzept dieses Biomassekraftwerks kann als innovativ bezeichnet werden. Die verwendeten Komponenten sind technisch verfügbar. Die Kombination der Komponenten ist damit nicht als futuristisch anzusehen. Dies führt dazu, dass dieses Konzept kurzfristig umsetzbar ist und nicht erst eine erfolgreiche Entwicklung von Schlüsselkomponenten abgewartet werden muss. Gleichwohl bietet das Konzept Raum für weitere Entwicklungen und wissenschaftliche Untersuchungen. Aus diesem Grund eignet sich dieses Konzept prinzipiell zum Aufbau eines Hochschulkraftwerks.

Quellen:

[Asue05] BHKW-Kenndaten 2005. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Kaiserslautern (Hrsg.). www.asue.de

[BMWi05] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Energieversorgung für Deutschland. Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006

[Kar06] Karl, J.; Dezentrale Energiesysteme - Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt. 2. Auflage, 2006. Oldenbourg Verlag, München, Wien.

Alle Texte und Abbildungen dieser Veröffentlichung sind urheberrechtlich geschützt.
Copyright © 2007, J. Dohmann, Lemgo.

