

Hoher Wirkungsgrad und tiefe Emissionen

Holzgas-Kombikraftwerk: Chance für die Schweiz

Bild 1: Demonstrationsanlage des Holzgas-Kombikraftwerks in Värnamo (Schweden) [4]



Kombikraftwerke mit Gas- und Dampfturbine sind Stand der Technik zur Nutzung von Erdgas und erreichen Wirkungsgrade von bis zu 60%. Zur Stromerzeugung aus Holz kommen dagegen bis anhin Dampfkraftanlagen mit relativ geringen Wirkungsgraden zum Einsatz. Die grosstechnische Holzvergasung und Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk verspricht auch für Holz bis anhin unerreichte Wirkungsgrade. Infolge der zusätzlichen Umwandlung zu Gas ist der Wirkungsgrad zwar geringer, mit bis zu gegen 45% aber immer noch attraktiv. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Nutzungsart von Energieholz nur geringste Emissionen an Feinstaub verursacht.

PD Dr. Thomas
Nussbaumer*

Die Machbarkeit dieser Technologie wurde in einer Demonstrationsanlage in Schweden gezeigt, so dass die Technik innert weniger Jahre kommerziell umgesetzt werden kann. Da mit zunehmender Leistung höhere Wirkungsgrade und tiefere spezifische Kosten erzielt werden, sollten möglichst grosse Anlagen realisiert werden. Mit dem Zusatzpotenzial an heute nicht genutztem Holz könnte in der Schweiz ein Kraftwerk mit rund 600 MWe (Megawatt elektrische Leistung) betrieben werden. Ab 300 MWe wird jedoch der Vorteil des höheren Wirkungsgrads durch den höheren Transportaufwand kompensiert, weshalb für die Schweiz zwei Kraftwerke mit je 300 MWe oder vier mit je 150 MWe ideal wären. Um das Potenzial schrittweise zu erschliessen, wird ein erstes Kraftwerk mit 150 MWe Holzleistung für einen Viertel des nicht genutzten Holzes vorgeschlagen. Insgesamt könnte das nicht genutzte Holz rund 6,5% des heutigen Stromverbrauchs der Schweiz decken. Sofern in den nächsten Jahren – wie derzeit zur Diskussion gestellt – ein Erdgas-Kraftwerk gebaut wird, bietet sich die Angliederung einer Holzvergasungsanlage an ein Erdgaskraftwerk an. Damit könnten die Grössenvorteile ausgeschöpft und der Holzanteil zur schrittweisen Erschliessung des Potenzials sukzessive erhöht werden.

1 Elektrizitätsversorgung der Schweiz

Der Bund prüft derzeit, wie die Stromversorgung der Schweiz nach Auslaufen von Lieferverträgen mit dem Ausland und nach Abschaltung der Kernkraftwerke ab dem Jahr 2020 gesichert werden kann [1]. Da sich die Schweiz zur Reduktion der CO₂-Emissionen verpflichtet hat, kommt eine Stromerzeugung aus fossilen Brennstof-

fen nur unter der Einschränkung in Frage, dass über die Zielvorgaben hinaus zusätzlich fossiles CO₂ eingespart wird. Potenzial zur CO₂-Einsparung bieten zum Beispiel Energiesparmöglichkeiten in Gebäuden sowie der Ersatz fossiler Wärmeerzeuger in Haushalten und in der Industrie. Entsprechende Massnahmen vorausgesetzt ist der zur Diskussion gestellte Bau eines Erdgaskraftwerks eine prüfenswerte Option.

Holz weist ein noch ungenutztes Potenzial auf, das kurzfristig und mit geringen Risiken erschliessbar ist und zur Substitution fossiler Energieträger beitragen kann. Da Holz jedoch nur einen Teil des schweizerischen Energieverbrauchs decken kann, ist das verfügbare Potenzial so zu nutzen, dass es einen möglichst grossen Beitrag zur Energieversorgung leistet. Dazu kommen drei Anwendungen in Frage, nämlich die Erzeugung von Wärme, Strom oder Treibstoffen.

2 Einsatz von Energieholz: Wieso Strom?

Die Wärmeerzeugung aus Holz ist als bewährte Technik verfügbar. Da die Gewinnung von Energieholz wenig graue Energie benötigt und moderne Holzheizungen nur geringfügig tiefere Wirkungsgrade als Gas- und Ölheizungen erreichen, kann Energieholz fossile Energieträger praktisch im Verhältnis 1 zu 1 ersetzen. 1 MJ Holz ersetzt also rund 1 MJ Erdgas oder Heizöl [2]. Heutige Holzfeuerungen weisen allerdings vergleichsweise hohe Emissionen an Feinstaub und Stickoxiden sowie – vor allem bei unsachgemäsem Betrieb – an weiteren Luftschadstoffen auf. In Zukunft sind deshalb Massnahmen zur Emissionsminderung und insbesondere zur Feinstaubreduktion bei Holzfeuerungen notwendig. Aufgrund der

geplanten Verschärfung der Luftreinhalte-Verordnung wird allerdings für grössere Holzfeuerungen in Zukunft eine Feinstaubabscheidung erforderlich, was die Bedeutung der Staubemissionen grösserer Holzheizungen deutlich verringern wird, während für handbeschickte Feuerungen noch Handlungsbedarf besteht.

Die Stromerzeugung aus Holz hat bis anhin nur eine geringe Bedeutung, weil die derzeit verfügbaren Techniken für kleine und mittlere Leistungen tiefe elektrische Wirkungsgrade und hohe spezifische Investitionskosten aufweisen. So erreichen Anlagen mit Dampfkrafttechnik oder mit Organic Rankine Cycle (ORC) typische Nettowirkungsgrade von lediglich rund 10% bei Leistungen um 1 MWe und von rund 20% bei 5 MWe. Solche Anwendungen sind nur wärmegeführt zur Wärmekraftkopplung (WKK) sinnvoll und meist nur in Holz verarbeitenden Betrieben wirtschaftlich.

Die Herstellung von Treibstoffen aus Holz ist technisch grundsätzlich beherrschbar. Derzeit stehen die Gewinnung von Biodiesel oder die Produktion von Methan zur Diskussion. Beide Verfahren basieren auf einer gross-technischen Vergasung, welche rund 75% Wirkungsgrad erzielt, sowie einer anschliessenden Veredelung, welche zusätzlich rund 25% Verluste verursacht. Je nach Verfahren stehen deshalb im Treibstoff noch rund 50% bis 55% des ursprünglichen Heizwerts zur Verfügung [2]. 1 MJ Holz, das zu Treibstoff umgewandelt wird, ersetzt deshalb nur noch rund 0,5 MJ bis 0,75 MJ fossile Primärenergie, sodass die Treibstoffherstellung einen geringeren Substitutionseffekt erzielt als gute Holzheizungen. Die Holzvergasung und Herstellung von Methan aus Holz substituiert auch weniger Erdgas als die direkte Nutzung von Holzgas in einem Gaskraftwerk, da bei der Verwendung im Kraftwerk die Verluste zur Veredelung zu Methan entfallen.

Derzeit wird Energieholz in erster Linie zur Wärme-erzeugung oder für wärmegeführte WKK-Anlagen genutzt. Da das Potenzial für WKK-Anwendungen jedoch beschränkt ist und ein zunehmender Bedarf an Elektrizität aus erneuerbaren Energien besteht, ist auch die Stromerzeugung in Kraftwerken, welche stromgeführt oder ohne Wärmeauskopplung betrieben werden, zu prüfen. Da Strom physikalisch hochwertiger ist als Wärme, kann zur Bewertung des Substitutionspotenzials angenommen werden, dass der produzierte Strom zum Antrieb dezentraler Wärmepumpen dient, welche aus 1 MJ elektrisch rund 2,5 MJ Nutzwärme entsprechend einer Jahresarbeitszahl von 2,5 erzeugen. Unter dieser Annahme erzielt Strom aus Holz bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 30% einen rechnerischen Heizungswirkungsgrad von 75%. Dieser Wert ist in etwa vergleichbar mit dem Jahresnutzungsgrad guter Holzheizungen. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von über 30% ist die Stromerzeugung aus Holz somit vorteilhaft im Vergleich zu Holzheizungen. Obwohl zusätzlich zur Stromerzeugung eine Abwärmenutzung bei geringfügig reduziertem Strom-Wirkungsgrad möglich ist, wird im vorliegenden Beitrag lediglich die Stromproduktion bewertet. Für ein reales Kraftwerk kann die Energieausnutzung durch geeignete Standortwahl im Umfeld von grösseren Wärmeverbrauchern noch verbessert werden.

3 Technik für Holzkraftwerke

Ein Holzkraftwerk auf Basis der Dampfkrafttechnik erzielt bei einer Leistung von 25 MWe rund 30% elektrischen Wirkungsgrad, wie das Beispiel eines im Jahr 1999

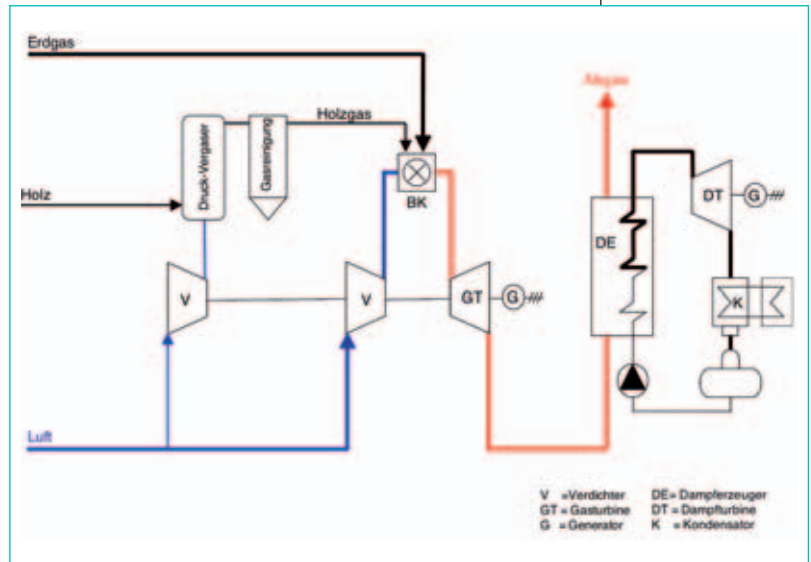


Bild 2: Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes in einer zirkulierenden Wirbelschicht und gemeinsamer Nutzung von Erdgas und gereinigtem Holzgas in einer Gasturbine.

in den Niederlanden in Betrieb genommen Kraftwerks zeigt [3]. Einen Wirkungsgradsprung auf bis über 40% verspricht ein Holzgas-Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine, welches eine vorgeschaltete Holzvergasung voraussetzt und als Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) bezeichnet wird. Diese Technik wurde im Rahmen von Forschungs- und Demonstrationsprojekten bis zur Schwelle der Markteinführung entwickelt. In Schweden existiert eine Demonstrationsanlage, welche über mehrere Jahre und während über 10 000 Stunden mit verschiedenen Biomasse-Brennstoffen betrieben wurde (Bild 1) [4]. Dieses Holzkraftwerk verfügt über eine Druckvergasung bei 20 bis 25 bar in einer zirkulierenden Wirbelschicht und eine Leistung von 6 MWe, wovon 4 MWe von der Gasturbine und 2 MWe von der Dampfturbine produziert werden. Bei einer Wärmeauskopplung von bis zu 9 MW wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 32% bis 37% ausgewiesen. Für ein grösseres Kraftwerk dieser Bauart ist ein Wirkungsgrad von gegen 45% möglich. Die Machbarkeit dieser Technologie wird als grundsätzlich nachgewiesen bewertet, obwohl bis heute kein kommerzielles Kraftwerk dieser Bauart realisiert wurde. Für eine Kommerzialisierung wird eine Mindestgrösse von rund 40 MWe vorgeschlagen. Eine weitere Steigerung der Leistung verspricht allerdings eine nochmalige Verbesserung des Wirkungsgrads und der Wirtschaftlichkeit. Für Holz, das eine geringere Energiedichte als fossile Energieträger aufweist und regional nur begrenzt verfügbar ist, kann die Anlagengrösse allerdings durch die Beschränkung der Transportdistanzen limitiert werden.

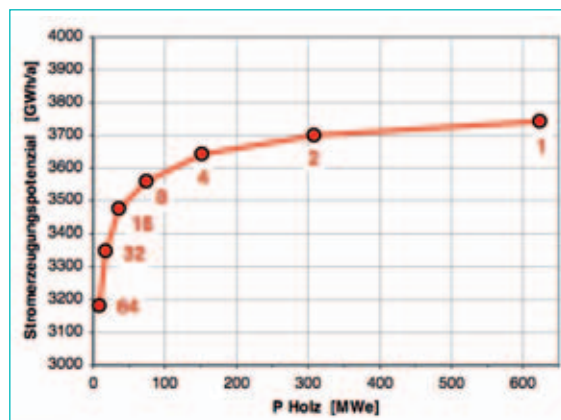


Bild 3: Potenzial zur Stromerzeugung aus Holz in der Schweiz mit bis heute nicht genutztem Zusatzpotenzial an Holz in Funktion der Holzleistung je Kraftwerk. Die Zahlen im Diagramm bezeichnen die Anzahl Kraftwerke zur Nutzung des gesamten Zusatzpotenzials. Eine Aufteilung auf mehr als vier Kraftwerke mit Leistungen von weniger als 150 MWe ist energetisch und ökonomisch unvorteilhaft.

Tabelle 1: Energieholznutzung und Energieholzpotenzial der Schweiz im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch (GEV) und zum Elektrizitätsverbrauch angegeben als Endenergie. Daten gemittelt aus [5], [6] und [7]. 1 PJ=10¹⁵ J.

	Nutzung		Potenzial			Zusatzpotenzial		
	Mio. m ³ /a	PJ/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	GWh/a	Mio. m ³ /a	PJ/a	GWh/a
Waldholz	1,2	10,4	4,1	35,3	9806	2,9	24,9	6926
Restholz	1,1	9,5	1,2	10,3	2854	0,1	0,8	214
Altholz	0,3	2,6	0,8	7,0	1951	0,5	4,4	1231
Holz total	2,6	22,5	6,1	52,6	14611	3,5	30,1	8371
GEV Schweiz 2004		873			242500			
Elektrizität (23,1% GEV)		202			56000			

4 Kombination von Erdgas und Holz

Da die für Erdgas standardmässig eingesetzte Technik des Kombikraftwerks auch für Holzgas geeignet ist, kommt als Alternative zu einer unabhängigen Stromerzeugung aus Erdgas und Holz auch eine kombinierte Nutzung in Frage. Gegenüber zwei separaten Kraftwerken verspricht dies verschiedene Vorteile. Zum einen kann der Wirkungsgrad der Holznutzung wegen der Grössenabhängigkeit durch die Angliederung an ein Erdgaskraftwerk erhöht werden. Zum andern kann die Logistik zur Energieholzbeschaffung vorerst auf eine kurzfristig realisierbare Holzmenge ausgelegt und später allenfalls erhöht werden. Aus Erfahrungen von anderen Anlagen mit kombinierter Nutzung von fossilen Brennstoffen und Biomasse wird vorgeschlagen, dass Holz für die Anwendung in einem Kraftwerk mit Holz und Erdgas etwa 20% der Kraftwerksleistung abdeckt. Eine geringere Holzleistung verursacht unverhältnismässig hohe Kosten, während ein höherer Anteil Holz durch eine spätere Erhöhung der Vergasungskapazität erzielt werden kann, jedoch nicht sofort eingeplant werden muss. Zur

kombinierten Nutzung von Holzgas und Erdgas kommen verschiedene Konzepte in Frage. Gereinigtes Holzgas und Erdgas können entweder in einer Gasturbine genutzt oder in auf beide Brennstoffe je separat ausgelegten Gasturbinen mit einem gemeinsamen Dampfteil eingesetzt werden. Bild 2 zeigt das Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes und gemeinsamer Gasturbine für Holzgas und Erdgas. Ohne Zufuhr von Erdgas entspricht die Anlage einem reinen Holzgas-Kombikraftwerk.

5 Potenzial von Energieholz zur Stromerzeugung

Zum Energieholzpotenzial liegen Erhebungen von Holzenergie Schweiz und von QM Holzheizwerke vor [5, 6], während die gesamten auf der Landesfläche nachwachsenden Biomasse mengen in einer Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie abgeschätzt wurden [7]. Aus einem in [8] beschriebenen Vergleich dieser Erhebungen wird für die vorgestellte Studie ein mittleres Potenzial aus den verschiedenen Abschätzungen angenommen. Zur Bestimmung des Potenzials zur Stromerzeugung aus Holz wird die Differenz zwischen dem gesamten Potenzial abzüglich der heutigen Nutzung bestimmt und gemäss Tabelle 1 als heute nicht genutztes Zusatzpotenzial ausgewiesen.

Das Zusatzpotenzial an Energieholz entspricht rund 8400 GWh Endenergie pro Jahr. Für ein auf dieses Potenzial ausgelegte und während 6000 Stunden pro Jahr betriebenes Kraftwerk ergibt dies eine zugeführte Leistung von 1400 MW. Dies ermöglicht zum Beispiel den Betrieb von zwei Holzgas-Kombikraftwerken mit einer Leistung von je rund 300 MWe und einer Stromproduktion von zusammen 3700 GWh (Bild 3). Für vier Kraftwerke mit 150 MWe resultiert als Folge der tieferen Wirkungsgrade eine geringfügig reduzierte Stromproduktion von 3640 GWh pro Jahr. Beim heutigen Elektrizitätsverbrauch der Schweiz von 56 000 GWh/a könnte das derzeit nicht genutzte Holz somit gut 6,5% der Stromversorgung decken.

Wenn vorab ein Kraftwerk mit 150 MWe Holzleistung für einen Viertel des Zusatzpotenzials gebaut wird, könnte eine spätere Erhöhung der Holznutzung zum Ersatz von Erdgas im bestehenden Kraftwerk, für weitere Kraftwerke oder für zusätzliche Holzheizungen eingesetzt werden.

6 Wirkungsgrad und Investitionskosten

Über den Wirkungsgrad und die Investitionskosten von Kombikraftwerken liegen Angaben aus der Literatur vor [4, 9–15]. Im Fall der Biomasse-Vergasung stützen sich diese unter anderem auf die Demonstrationsanlage in Schweden und sie decken vor allem Leistungen unter 50 MWe ab, während für grössere Leistungen auch Ver-

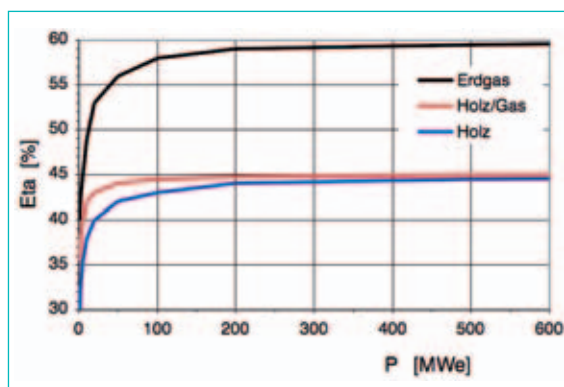


Bild 4: Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Holz in Funktion der elektrischen Holz-Leistung für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas, rot) mit 20% Holzanteil und für ein reines Holzgas-Kombikraftwerk (Holz, blau). Als Vergleich ist der Wirkungsgrad eines reinen Erdgas-Kombikraftwerks als Funktion der Erdgasleistung dargestellt (Erdgas, schwarz). Für die Fälle Holz und Holz/Erdgas bezeichnet die Leistung auf der x-Axe somit die Holzleistung, für den Erdgas-Fall dagegen die Erdgasleistung.

Lesebeispiel: Zur Produktion von 50 MWe aus Holz wird in einem Holzkraftwerk ein Wirkungsgrad von 42,0% erzielt (blaue Kurve 50 MWe). Wenn dagegen Holz an ein Erdgaskraftwerk angegliedert wird, steigt der Wirkungsgrad zur Holzverstromung auf 44,0% (rote Kurve 50 MWe). Der Erdgasteil weist dabei eine Leistung von 200 MWe auf und erzielt einen Wirkungsgrad von 59,0% (schwarze Kurve, 200 MWe).

Bild 5: Spezifische Investitionskosten für ein Holzgas-Kombikraftwerk (Holz) und ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas) mit gleicher Holzleistung im Vergleich zu den Investitionskosten eines Erdgas-Kombikraftwerks. Für die Fälle Holz und Holz/Erdgas bezeichnet die Leistung auf der x-Axe die Holzleistung, für den Erdgas-Fall die Erdgasleistung (Erläuterung, siehe Bild 4).

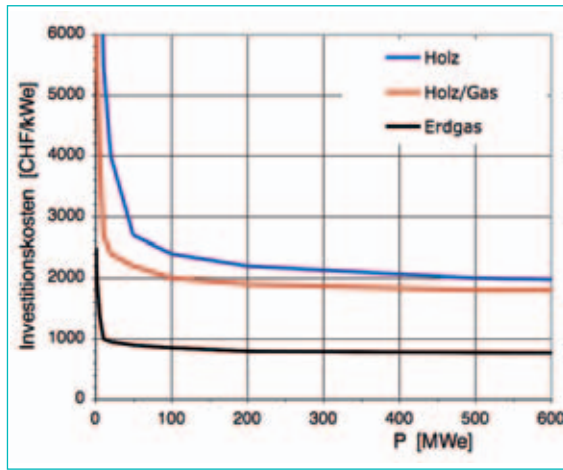


Bild 6: Mittlere Transportdistanz für die Energieholz-dichte der Schweiz in Abhängigkeit der Holz-Kraftwerksleistung. Für den Transport ist eine Rückfahrt des leeren Lastwagens angenommen, sodass die Transportdistanz dem zweifachen Radius des Einzugsgebiets entspricht.

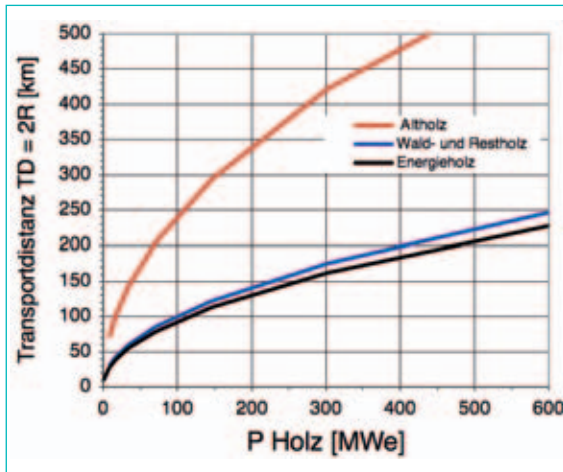
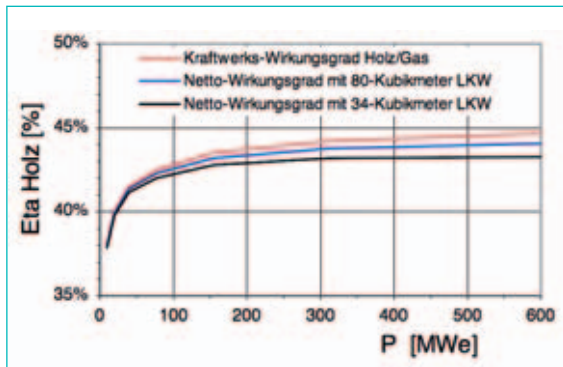


Bild 7: Wirkungsgrad eines Holzgas-Kombikraftwerks in Funktion der elektrischen Leistung sowie Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung des Transportenergieaufwands des Holzes mit 80-Kubikmeter-LKW (Schubboden) und mit 34-Kubikmeter-LKW (Container).



gleichswerte von Kraftwerken mit Kohlevergasung vorliegen. Anhand dieser Daten werden für die vorliegende Studie realistische, im Vergleich zur Literatur tendenziell pessimistische Wirkungsgrad- und Investitionskosten angenommen. Da ein Kraftwerk in der vorgestellten Art bis heute nicht existiert, werden zwei vereinfachende Annahmen getroffen. Bezüglich Wirkungsgrad wird vorausgesetzt, dass der Grössenvorteil für das Holz voll ausgenutzt werden kann, also der Kraftwerksteil mit Zuführung von Holzgas den gleichen Wirkungsgrad wie ein Erdgaskraftwerk erzielt. Bezüglich Kosten wird angenommen, dass die Zusatzkosten für zum Beispiel einen 50-MWe-Holzvergaser plus die Leistungserhöhung des Erdgaskraftwerks von 200 MWe auf 250 MWe gleich hohe spezifische Kosten verursachen wie ein 250-MWe-Holzwerk. Im Weiteren wird für die Berechnungen angenommen, dass geeignete Gasturbinen in den jeweiligen Leistungsklassen verfügbar sind. Für die Realisie-

rung eines Kraftwerks müsste die Anlagenauslegung dagegen auf die im Markt verfügbaren Maschinen angepasst werden.

Mit diesen Annahmen resultieren für ein Holzgas/Erdgas-Kraftwerk ein Wirkungsgrad gemäss Bild 4 sowie spezifische Investitionskosten gemäss Bild 5. Zum Vergleich sind die Resultate für ein reines Holzwerk sowie für ein Erdgaskraftwerk dargestellt. Für Holz und für Holz/Gas bezeichnet die Leistung auf der x-Axe die reine Holz-Leistung (sodass die Differenz der Kurven die Verbesserung durch die Angliederung von Holz an ein Erdgaskraftwerk ausweist), während für Erdgas die Erdgas-Leistung gilt. Der Vergleich der Varianten Holz und Holz/Erdgas zeigt den Vorteil der Angliederung der Holz-nutzung an das Erdgaskraftwerk. So wird zum Beispiel nach Bild 4 zur Produktion von 50 MWe aus Holz durch die Kombination ein Wirkungsgrad von 44,0% anstelle von 42,0% erzielt, was einer Verbesserung um rund 5% entspricht.

7 Transportaufwand und Anlagengrösse

Die Transportdistanz nimmt für Holz mit zunehmender Anlagengrösse zu. Wenn eine gleichmässige Holzverteilung vorausgesetzt wird, steigt die Transportdistanz mit der Wurzel der Anlagenleistung. Bild 6 zeigt die erwartete mittlere Transportdistanz für die Versorgung mit Altholz, mit Wald- und Restholz sowie mit Energieholz als Summe aller Sortimente. Wenn sämtliches zusätzlich verfügbares Energieholz in einem Holzwerk eingesetzt wird, kann eine elektrische Leistung von 628 MWe bei einer Transportdistanz von rund 230 km realisiert werden. Zwei Anlagen mit je 300 MWe ergeben 160 km Transportdistanz und vier Anlagen mit 150 MWe rund 120 km. Da eine leere Rückfahrt vorausgesetzt wird, entspricht der Radius des Einzugsgebiets der Hälfte der Transportdistanz. Wenn die Anlagen nur mit Wald- und Restholz (also ohne Altholz) betrieben werden, ergeben sich nur unerheblich längere Transportdistanzen. Wird dagegen eine Anlage allein auf Altholz ausgelegt, so ergeben sich mehr als zweimal so lange Transportdistanzen.

Zur Beurteilung des Einflusses des Transportaufwands ist in Bild 7 der Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung des Treibstoffverbrauchs bei reinem Strassentransport ausgewiesen. Für den Lastwagentransport ist ein Dieserverbrauch von 40 Litern pro 100 km angenommen und Diesel ist zur Berücksichtigung der grauen Energie mit einem Faktor 1,25 bewertet. Die Grafik zeigt, dass der Energieaufwand für den Transport des Holzes den Netto-Wirkungsgrad zwar reduziert, dass jedoch der dank zunehmender Anlagengrösse höhere Kraftwerk-wirkungsgrad den Transportaufwand bis zu rund 300 MWe kompensiert, sodass zur Nutzung des gesamten Potenzi- als für die Schweiz der Bau von zwei bis vier Kraftwerken optimal wäre. Zur Nutzung des nicht verfügbaren Holzes entspricht dies mittleren Einzugsgebieten mit einem Radius von 80 km respektive 60 km.

8 Wirtschaftlichkeit

Die Stromgestehungskosten werden nach der Annuitätenmethode bestimmt. Für den Kraftwerksteil werden dabei die Annahmen für die Stromangebots-Perspektiven des Bundesamts für Energie eingesetzt, nämlich eine Nutzungsdauer von 30 Jahren, ein Kalkulationszinssatz von 2,5% pro Jahr sowie ein Betrieb mit 6000 Vollbetriebsstunden pro Jahr [1]. Weitere Annahmen sind in [8] ausgeführt.

Bild 8 zeigt die Stromgestehungskosten für die drei Holzbrennstoffe in Abhängigkeit der mit Holz erzeugten Kraftwerksleistung. Aufgrund der abgestuften Brennstoffpreise für Waldholz zu 5 Rp./kWh, Restholz zu 4 Rp./kWh und Altholz zu 2 Rp./kWh ergeben sich in dieser Reihenfolge sinkende Stromgestehungskosten (obwohl für Altholz ein höherer Betriebsaufwand angenommen wurde). Für jeden Brennstoff ist unterschieden zwischen den Stromgestehungskosten für den Fall eines einzelnen Holzgas-Kombikraftwerks, was mit «Holz» gekennzeichnet ist, und denjenigen für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk, was mit «Holz/Erdgas» gekennzeichnet ist.

Die Stromgestehungskosten aus Waldholz betragen zum Beispiel für ein Holzgas-Kraftwerk von 100 MWe rund 15 Rp./kWh, was im Vergleich zu Strom aus den meisten anderen erneuerbaren Energieträgern bereits wirtschaftlich attraktiv ist. Dank des höheren Wirkungsgrads und der tieferen spezifischen Investitionskosten resultieren für das Holzgas/Erdgas-Kraftwerk knapp 1 Rp./kWh tiefere Stromgestehungskosten. Bis zu einer Leistung von 300 MWe sinken die Stromgestehungskosten zudem noch geringfügig ab, da der Transportaufwand durch den Einfluss von Wirkungsgrad und Investitionskosten überkompensiert wird. Für Wald- und Restholz bleiben die Stromgestehungskosten bis zu 600 MWe konstant, während sie für Altholz aufgrund der unverhältnismässig langen Transportdistanzen wieder ansteigen. Bei Berücksichtigung des Transportaufwands sind für das in der Schweiz verfügbare Zusatzpotenzial deshalb Kraftwerke mit einer Holzleistung von 150 MWe bis 300 MWe ideal. Wenn nicht nur heute ungenutztes Holz, sondern auch heute anderweitig eingesetztes Holz zur Stromerzeugung eingesetzt wird, ergeben sich noch deutlich grössere Kraftwerksleistungen.

Für Erdgas ist als Berechnungsbeispiel ein Preis von 7 Rp./kWh angenommen. Die Stromgestehungskosten betragen damit rund 12 bis 13 Rp./kWh und sind geringfügig höher als für Restholz, jedoch etwas tiefer als für Waldholz. Für Erdgas sind die Stromgestehungskosten in Bild 8 einerseits in Funktion der Holzleistung eingetragen (ausgezogene Linie, die Erdgasleistung entspricht dabei dem Vierfachen der Holzleistung), andererseits sind sie in Abhängigkeit der Erdgasleistung eingetragen (gestrichelte Linie). Für andere Gaspreise können die Stromgestehungskosten aus Erdgas abgeschätzt werden, indem berücksichtigt wird, dass die Kapital- und Betriebskosten zusammen rund 1,0 bis 1,5 Rp./kWh betragen, während die Brennstoffkosten dem Erdgaspreis, dividiert durch den Wirkungsgrad von rund 0,6, entsprechen.

9 Emissionen

Die thermische Nutzung biogener Brennstoffe verursacht Emissionen an Feinstaub, Stickoxiden (NO_x), Kohlenwasserstoffen (KW), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sowie bei belastetem Holz an Dibenzo-*p*-Dioxinen und -Furanen (PCDD/F). Ein Vergleich der Emissionswerte mit typischen Werten von Holzfeuerungen zeigt, dass ein Holzgas-Kombikraftwerk in Bezug auf Feinstaub vorteilhaft ist und auch bezüglich aller weiteren Schadstoffe tiefe Werte erzielt.

Feinstaub

Damit ein Holzgas-Kraftwerk zuverlässig betrieben werden kann und die Gasturbine nicht beschädigt wird, darf das als Gasturbinen-Brennstoff eingesetzte Holzgas nur

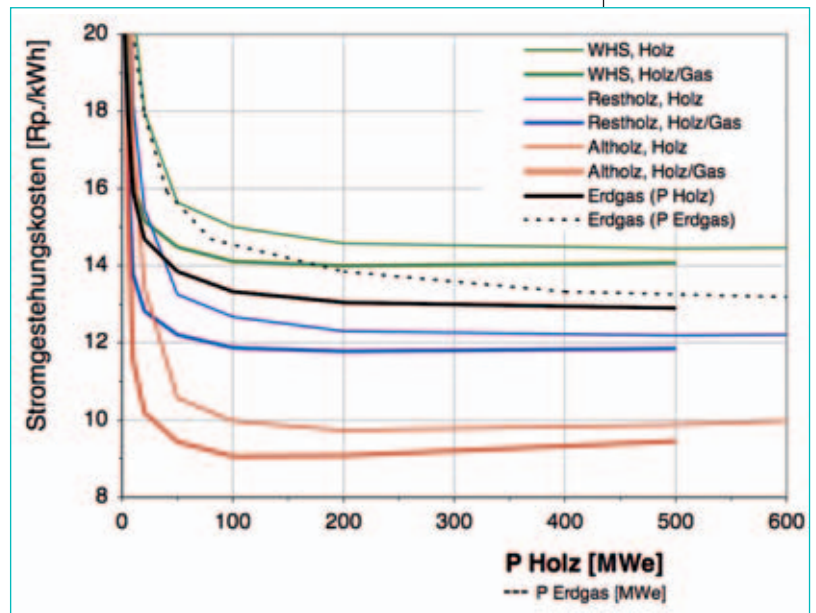


Bild 8: Stromgestehungskosten in Funktion der elektrischen Leistung. Brennstoffpreise: Erdgas 7 Rp./kWh, Waldholz 5 Rp./kWh, Restholz 4 Rp./kWh, Altholz 2 Rp./kWh.

P Holz = Kraftwerksleistung Holz = 20% der Gesamtleistung.

P Erdgas = Kraftwerksleistung Erdgas = 80% der Gesamtleistung.

WHS, Holz = Waldhackschnitzel für reines Holzgas-Kombikraftwerk.

WHS, Holz/Gas = Waldhackschnitzel für Kombikraftwerk mit 20% Holz plus 80% Erdgas. Erdgas (P Holz) = Stromgestehungskosten Erdgas in Funktion der Holzleistung. Erdgas (P Erdgas) = Stromgestehungskosten Erdgas in Funktion der Erdgasleistung (gestrichelt).

sehr geringe Mengen an Partikeln und Alkalimetallen enthalten. Das Rohgas aus der Wirbelschichtvergasung wird dazu in einer Gasreinigung mit Feinstaubabscheidung behandelt. Entsprechend weist auch das Abgas nach Gasturbine nur geringe Konzentrationen an anorganischem Feinstaub auf. Gleichzeitig gewährleistet die annähernd vollständige Verbrennung des Holzgases niedrige Gehalte an organischen Partikeln. Entsprechend weist ein Holzgas-Kombikraftwerk typische Staubemissionen von weniger als 1 mg/m^3 auf [16]. Bei Feuerungsanlagen kann dieser Wert nur mit einer sehr effizienten Feinstaubabscheidung wie zum Beispiel einem Gewebefilter erzielt werden. Übliche industrielle Anlagen mit Elektroabscheidern weisen dagegen rund eine Grössenordnung höhere Staubemissionen auf, während handbeschickte Holzfeuerungen sowie automatische Holzfeuerungen ohne Feinstaubabscheidung rund zwei Grössenordnungen höhere Staubemissionen verursachen. Wenn Holz anstatt in Feuerungen ohne Feinstaubabscheider in einem Holzgas-Kombikraftwerk verwertet wird, kann die Feinstaubbelastung somit auf einen Bruchteil reduziert werden.

Kohlenwasserstoffe und PCDD/F

Aufgrund der guten Verbrennungsbedingungen ist davon auszugehen, dass auch die Emissionen an Kohlenwasserstoffen und PCDD/F auf tiefem Niveau sind. So werden für PCDD/F Emissionen von weniger als $0,01 \text{ ng TE/m}^3$ ausgewiesen [16].

Stickoxide

Ohne Zusatzmassnahmen wird ein Teil des Brennstoffstickstoffs, welcher im Rohgas vorwiegend als Ammoniak (NH_3) vorliegt, in der Brennkammer oxidiert und führt so zu Stickoxidemissionen (NO_x). Für Waldhack-

schnitzel mit einem Stickstoffgehalt von 0,1 bis 0,2 Gew.-% ist mit rund 120 bis 180 mg/m³ (bei 11 Vol.-% O₂) zu rechnen, für Biomasse mit 0,5 bis 1 Gew.-% mit rund 300 bis 500 mg/m³ [4, 16]. Diese Werte sind auf ähnlichem Niveau wie bei Holzfeuerungen. Beim Bau von Kraftwerken in der vorgeschlagenen Leistungsklasse sind jedoch Massnahmen zur NO_x-Minderung möglich. Nebst Ausschöpfung der feuerungstechnischen Möglichkeiten in der Brennkammer bietet sich dank der geringen Gehalte an Staub und weiteren Schadstoffen eine katalytische Entstickung der Abgase an, daneben kommt aber auch eine NH₃-Abscheidung im Rohgas in Frage. Mit einer oder mehrerer dieser Massnahmen sind Emissionswerte an NO_x von deutlich unter 80 mg/m³ möglich.

10 Zusammenfassung

Die technische Machbarkeit der Holzvergasung und Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine wurde im Demonstrationsstadium gezeigt und verspricht mit über 40% die derzeit höchsten Wirkungsgrade zur Stromerzeugung aus Holz bei gleichzeitig sehr geringen Emissionen an Feinstaub und – wenn NO_x-mindernde Massnahmen verlangt werden – auch an Stickoxiden. Die vorgestellte Abschätzung zeigt, dass für die Schweiz bei einem für diese Kraftwerksart typischen Betrieb mit 6000 Vollbetriebsstunden pro Jahr eine Anlagengrösse mit einer Holzleistung zwischen 150 MWe und 300 MWe optimal wäre. Damit könnten 3640 GWh/a bis 3700 GWh/a Strom produziert und gut 6,5% des heutigen Stromverbrauchs gedeckt werden. Bei Holzpreisen von 4 Rp./kWh für Restholz und 5 Rp./kWh für Waldholz ergeben sich Stromgestehungskosten von rund 12,5 Rp./kWh für Restholz und 14,5 Rp./kWh für Waldholz. Zum Vergleich kann in einem 600 MWe Kombikraftwerk mit Erdgas zu 7 Rp./kWh Strom für 12,7 Rp./kWh erzeugt werden. Gleiche Stromgestehungskosten werden mit Wald- oder Restholz zu einem Preis von 4,5 Rp./kWh erzielt.

Als interessante Alternative zu einem reinen Holzkraftwerk kommt auch der Bau eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks in Frage, das dank des Grössenvorteils einen Wirkungsgrad von gegen 45% für Holz und 60% für Erdgas verspricht. Dazu wird ein Anteil des Holzes an der Gesamtleistung von 20% vorgeschlagen. Für eine Holzleistung von 150 MWe könnten die Stromgestehungskosten aus Holz dadurch um knapp 1 Rp./kWh reduziert werden. Gleichzeitig könnte die Versorgungssicherheit erhöht und eine sukzessive Steigerung der Holzleistung ermöglicht werden. Im Vergleich zu einem reinen Erdgaskraftwerk erlaubt die Zuführung von Holzgas eine Minderung der fossilen CO₂-Emissionen ungefähr im Verhältnis zum Holzanteil an der Kraftwerksleistung. Zur Einführung der vorgestellten Technologie und zum Aufbau der Versorgung wird für die Schweiz vorerst der Bau eines Holzkraftwerks mit 150 MWe oder – sofern ein Erdgaskraftwerk realisiert wird – eines Holz/Erdgas-Kraftwerks mit 150 MWe Holzleistung vorgeschlagen. Bei einer gleichmässigen Verteilung des Energieholzes über die Schweiz muss für die Holzversorgung dazu theoretisch ein Einzugsgebiet von rund 60 km Fahrdistanz erschlossen werden. Durch geeignete Standortwahl ist anzustreben, dass ein Teil des Holzbedarfs lokal zum Beispiel als Restholz verfügbar ist und die Kraftwerksabwärme teilweise genutzt werden kann, was eine weitere Verbesserung der Energieausnutzung und der Wirtschaftlichkeit ermöglicht.

Im Vergleich zu einer Nutzung von Energieholz in dezentralen Anlagen verspricht die Verwertung in einem Kraftwerk eine erhebliche Reduktion der Schadstoffemissionen vor allem an Feinstaub, aber auch an Stickoxiden, Schwermetallen, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und polychlorierten Dibenzo-*p*-Dioxinen und Furanen (PCDD/F). Da vor allem einfache und unsachgemäss betriebene handbeschickte Holzfeuerungen unverhältnismässig hohe Feinstaubemissionen verursachen und diese zudem besonders gesundheitsschädlich sind [17], könnte die durch Energieholz verursachte Feinstaubbelastung durch Verlagerung des so genutzten Holzes in Kraftwerke drastisch reduziert werden. ■

11 Literatur

- [1] Bundesamt für Energie: Energieperspektiven 2035/2050. Stand Februar 2005. Bundesamt für Energie. Bern 2005. www.energieperspektiven.ch.
- [2] Nussbaumer, Th.: Holzenergie ja, aber wie: für Wärme, Strom oder Treibstoff, HK Gebäudetechnik, 3 2006, 30–36.
- [3] Remmers, R.: 25 MW-Holzkraftwerk mit stationärer Wirbelschicht in Cujik (NL). 6. Holzenergie-Symposium, 20.10.2000, ETH Zürich. Bundesamt für Energie, 2000, 187–196.
- [4] Stahl, K., Waldheim, L., Morris, M., Johnsson, U., Gardmark, L.: Biomass IGCC at Värnamo, Sweden – Past and Future, GCEP Energy Workshop, 27.4.04, Stanford University, CA, USA, 2004.
- [5] Primas, A., Kessler, F.: Schweizerische Holzenergiestatistik, Folgerhebung für das Jahr 2004, Bundesamt für Energie, Bern 2005.
- [6] Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4: Planungshandbuch, Holzenergie Schweiz, Zürich 2004 und C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2004, ISBN 3-937441-90-5.
- [7] Oetli, B., et al.: Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Bundesamt für Energie, Bern, 2004.
- [8] Nussbaumer, Th.: Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz: Potenzial und Wirtschaftlichkeitsabschätzung, Bundesamt für Energie, Publikation 250049, Zürich 2005. www.energieforschung.ch.
- [9] Abboud, J.: Statement to the United States Senate Appropriations Committee regarding the Department of Energy Turbine R&D Programs, submitted by the Gas Turbine Association (GTA), 2005.
- [10] Bridgwater, T.: Biomass for power and heat, Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham, 2004.
- [11] Cameron, J., Kumar, A., Flynn, P.: Power from biomass: The economics of gasification vs. direct combustion, Second World Biomass Conference, 10–14 May 2004, Eta Florence & WIP Munich 2004, 867–870.
- [12] Craig, K., Mann, M.: Cost and Performance Analysis of Biomass-Based Integrated Gasification Combined-Cycle (BIGCC) Power Systems, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-430-21657, Golden, Colorado 80401-3393, U.S. Department of Energy 1996.
- [13] ECG 2004 (Energy Consulting Group Ltd.): Fossil-thermische Kraftwerke, BFE-Tagung «Zukunft des Elektrizitätsangebots», 2. Juli 2004, Bern.
- [14] Rensfelt, E.: Gasification Survey Report Sweden. In: K. Kwant, H. Knoef (Eds.): Status of Gasification, IEA Bioenergy and Gasnet, 2002.
- [15] Tiangco, V., Sethi, P., Zhang, Z.: Biomass – Strategic value analysis, IEPR Workshop, 1.7.05, California Energy Commission, 2005.
- [16] Stahl, K.: Värnamo Demonstration Plant, Berlings Skogs, Trelleborg (S) 2001.
- [17] Klippel, N., Nussbaumer, T., Hess, A.: Particle emissions from residential wood combustion – Design and operation conditions determine health impacts, 10th ETH Conference on Combustion Generated Particles, ETH Zürich, 21.–23. August 2006.

Verdankung

Die Studie wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie (BfE) durchgeführt.

*PD Dr. sc. techn. Thomas Nussbaumer, Verenum, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich
thomas.nussbaumer@verenum.ch, www.verenum.ch