

# Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk

Konzept, Potenzial und Wirtschaftlichkeit

Thomas Nussbaumer



## Centrale à cycle combiné au bois et au gaz naturel

Une centrale à cycle combiné fonctionnant au gaz naturel représente l'état actuel de la technique de part son rendement élevé. Au contraire, une centrale à vapeur alimentée au bois est d'une efficacité relativement limitée. Pour augmenter le rendement, il faut utiliser le gaz produit par la gazéification du bois dans un cycle combiné (turbine à gaz/turbine à vapeur). Ce principe a été démontré dans une installation à petite échelle. Dans une grande installation, le rendement pourrait passer à environ 45 % pour le bois et 60 % pour le gaz. En Suisse, une centrale au bois de 150 MWe, consommant un quart du bois non utilisé, pourrait être combinée à une centrale au gaz de 600 MWe.

## Combined Cycle Power Plant for Wood and Natural Gas

Power production in combined cycle plants with high efficiencies is well proven for natural gas, while power production from wood in steam plants achieves only limited efficiencies. For wood fuels, Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) with gas turbine and steam turbine has been demonstrated and enables high efficiencies to produce power. Thanks to scale effects, the co-firing of wood gas to a natural gas fired power station is a promising option, thus reaching efficiencies of up to 45 % for wood and 60 % for natural gas. For a first plant in Switzerland, a power station with 150 MWe based on wood to use one quarter of the available wood surplus is proposed and would be suited to be potentially combined with a 600 MWe gas fired power station.

**Die Nutzung von Erdgas in Kombikraftwerken ist Stand der Technik und erreicht hohe Wirkungsgrade, während für Holz bis anhin Dampfkraftanlagen mit relativ geringen Wirkungsgraden eingesetzt werden. Eine effiziente Stromerzeugung aus Holz erlaubt dagegen die Holzvergasung und Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine, was in einer Demonstrationsanlage gezeigt wurde. Besonders interessant wäre ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk, das dank des Grössenvorteils einen Wirkungsgrad von gegen 45 % für Holz und 60 % für Erdgas verspricht. Für die Schweiz wird ein erstes Kraftwerk mit 150 MWe Holzleistung vorgeschlagen, das einen Viertel des heute nicht genutzten Holzes verwerten könnte und zur allfälligen Angliederung an ein 600 MWe Gaskraftwerk geeignet wäre.**

## 1. Erdgas und Holz in 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen verpflichtet hat, kommt eine Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen nur unter der Einschränkung in Frage, dass über die Zielvorgaben hinaus zusätzlich fossiles CO<sub>2</sub> eingespart wird. Potenzial zur CO<sub>2</sub>-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 prüfungswerte 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. Einsatzgebiete von Energieholz

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 wenn die Feuerungen unsachgemäss betrieben werden – an weiteren Luftschadstoffen auf. In Zukunft sind deshalb Massnahmen zur Emissionsminderung und insbesondere zur Feinstaubreduktion bei Holzfeuerungen notwendig. Auf Grund der ab dem Jahr 2007 geplanten Verschärfung der Luftreinhalte-Verordnung wird allerdings für grössere Holzfeuerungen in Zukunft eine Feinstaubabscheidung erforderlich, was die Bedeutung der Staubemissionen grösserer Holz-

heizungen deutlich verringern wird. 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 Netto-Wirkungsgrade 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 holzverarbeitenden 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 grosstechnischen Vergasung, die einen Wirkungsgrad von 75 % 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, so dass 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 Wärmeerzeugung 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, die stromgeführt oder ohne Wärmeauskopplung betrieben werden, zu prüfen. Da Strom physikalisch hochwertiger als Wärme ist, kann zur Bewertung des Substitutionspotenzials angenommen werden, dass der produzierte Strom zum Antrieb dezentraler Wärmepumpen dient, die 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 einer Holzheizung. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von über 30 % ist die Stromerzeugung aus Holz somit vorteilhaft im Vergleich zur Wärmeerzeugung.

## 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 in den Niederlanden in Betrieb genommenen Kraftwerks zeigt [3]. Einen Wirkungsgradsprung auf bis über 40 % verspricht ein Holzgas-Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine, das 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, die über mehrere Jahre und während über 10 000 Stunden mit verschiedenen Biomasse-Brennstoffen betrieben wurde [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 Steige-

nung 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.

**4. Kombination von Erdgas und Holz**

Da die für Erdgas standardmässig eingesetzte Technik des Kombikraftwerks auch für Holzgas geeignet ist, wird als Alternative zu einer unabhängigen Stromerzeugung aus Erdgas und Holz das Konzept einer kombinierten Nutzung vorgeschlagen. 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 vorgeschlagene Anwendung etwa 20% der Kraftwerksleistung abdeckt. Eine geringere Holzleistung verursacht unverhältnismässig hohe Kosten, während ein höherer Anteil Holz allenfalls durch eine spätere Erhöhung der Vergasungskapazität erzielt werden kann, jedoch nicht zwingend 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. In der vorliegenden Studie wird diese Unterscheidung vorerst nicht berücksichtigt und das in *Abbildung 1* gezeigte Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes und gemeinsamer Gasturbine für Holzgas und Erdgas vorausgesetzt.

**5. Energieholzpotenzial**

Zum Energieholzpotenzial liegen Erhebungen von Holzenergie Schweiz und von QM Holzheizwerke vor [5, 6], während die gesamten auf der Landesfläche nachwachsenden

Biomassemengen 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 *Zusatz-Potenzial* ausgewiesen. Das Zusatz-Potenzial

an Energieholz entspricht 8371 GWh Endenergie pro Jahr. Für ein auf dieses Potenzial ausgelegtes und während 6000 Stunden pro Jahr betriebenes Kraftwerk würde eine zugeführte Leistung von 1395 MW resultieren. Dies entspricht einer Leistung von rund 628 MWe und einer Stromproduktion von 3766 GWh pro Jahr. Um dieses Potenzial schrittweise zu erschliessen, bietet sich allerdings die Aufteilung des Potenzials auf zwei oder mehr Kraftwerke an. Wenn vorab ein Kraftwerk auf einen Viertel des Zusatzpotenzials

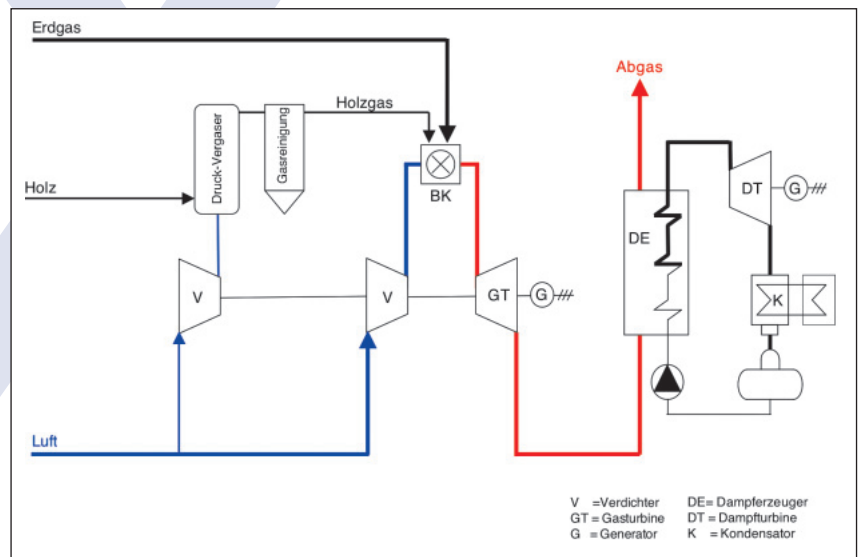
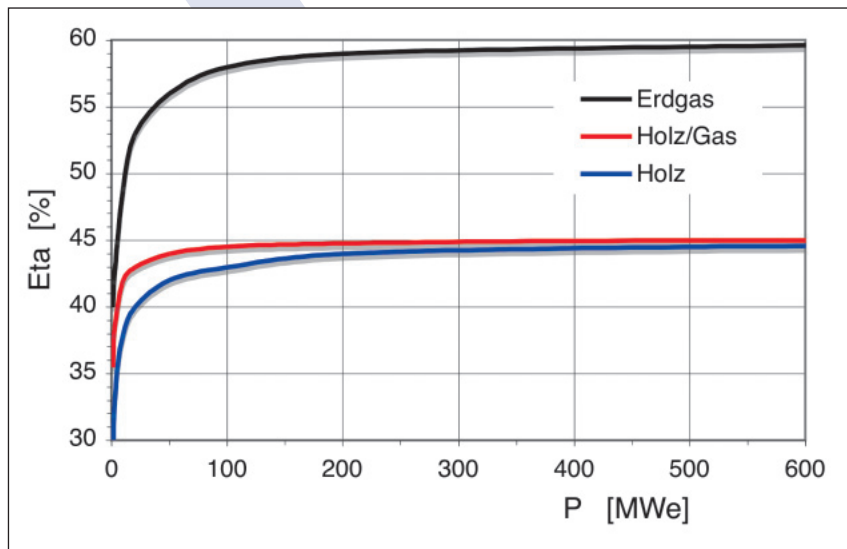


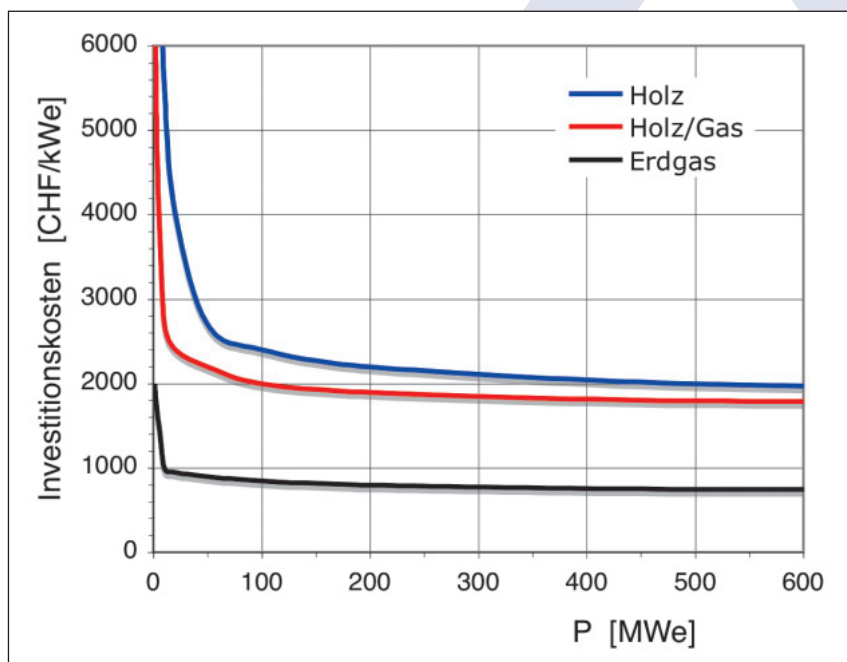
Abb. 1 Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes in einer zirkulierenden Wirbelschicht und gemeinsamer Nutzung von Erdgas und gereinigtem Holzgas in einer Gasturbine.

	Nutzung		Potenzial			Zusatz-Potenzial		
	Mio. m <sup>3</sup>	PJ/a	Mio. m <sup>3</sup> /a	PJ/a	GWh/a	Mio. m <sup>3</sup> /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
<b>Holz Total</b>	<b>2,6</b>	<b>22,5</b>	<b>6,1</b>	<b>52,6</b>	<b>14 611</b>	<b>3,5</b>	<b>30,1</b>	<b>8371</b>
GEV Schweiz 2004		873			242 500			

Tab.1 Energieholznutzung und Energieholzpotenzial der Schweiz. Daten gemittelt aus [5], [6] und [7]. GEV = Gesamtenergieverbrauch. 1 PJ = 10<sup>15</sup> J.



**Abb. 2** 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-Achse somit die Holzleistung, für den Erdgas-Fall dagegen die Erdgasleistung.  
*Lesbeispiel:* 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).



**Abb. 3** 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-Achse die Holzleistung, für den Erdgas-Fall die Erdgasleistung (Erläuterung siehe Abb. 2).

ausgelegt wird, weist dies eine Leistung von 146 MWe oder knapp 150 MWe auf [8]. Die mit der gleichen Holzmenge in vier Kraftwerken erzielbare Stromproduktion sinkt wegen des geringeren Wirkungsgrads um rund 7 % auf jährlich rund 3500 GWh ab. Eine spätere Erhöhung der Holznutzung könnte dann zum Ersatz von Erdgas im bestehenden Kraftwerk, für weitere Kraftwerke oder für dezentrale Wärmeerzeuger eingesetzt werden.

### 6. Wirkungsgrad und Investitionskosten

Über den Wirkungsgrad und die Investitionskosten von Kombikraftwerken liegen zahlreiche Angaben aus der Literatur vor [4, 9–15]. Im Fall der Biomasse-Vergasung stützen sich die Angaben unter anderem auf die Demonstrationsanlage in Schweden und sie decken vor allem Leistungen unter 50 MWe ab, während für grössere Leistungen auch Vergleichswerte 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 Zufeuierung 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 verursacht wie ein 250 MWe Holzkraftwerk. Mit diesen Annahmen resultieren für ein Holzgas/Erdgas-Kraftwerk ein Wirkungsgrad gemäss *Abbildung 2* sowie spezifischen Investitionskosten gemäss *Abbildung 3*. Zum Vergleich sind die Resultate für ein reines Holzkraftwerk sowie für ein Erdgaskraftwerk dargestellt. Für Holz und für Holz/Gas bezeichnet die Leistung auf der x-Achse die reine Holz-Leistung (so dass 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 Holznutzung an das Erdgaskraftwerk. So wird zum Beispiel nach *Abbildung 2* zur Produktion von 50 MWe aus Holz durch die Kombina-

tion ein Wirkungsgrad von 44,0 % anstelle von 42,0 % erzielt, was einer Verbesserung um rund 5 % entspricht.

### 7. Transportaufwand für Holz

Die Transportdistanz nimmt für Holz mit zunehmender Anlagengrösse zu. Wenn eine gleichmässige Holzverteilung vorausgesetzt wird, steigt die Transportdistanz mit der Wurzel der Anlagenleistung. *Abbildung 4* 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 Holzkraftwerk eingesetzt wird, kann eine elektrische Leistung von 628 MWe bei einer Transportdistanz von 229 km realisiert werden. Zwei Anlagen mit je 300 MWe ergeben rund 160 km Transportdistanz und vier Anlagen mit 150 MWe rund 120 km. 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 *Abbildung 5* der «Netto-Wirkungsgrad» unter Berücksichtigung des Treibstoffverbrauchs bei reinem Strassentransport ausgewiesen. Mit einem teilweisen Bahntransport wäre somit ein geringerer Transportenergieaufwand möglich. Für den LKW 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 Kraftwerkswirkungsgrad selbst bei Realisierung eines einzigen Kraftwerks in der Schweiz den Transportaufwand bei weitem überkompensiert.

### 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. *Abbildung 6* zeigt die Stromgestehungskosten

für die drei Holzbrennstoffe in Abhängigkeit der mit Holz erzeugten Kraftwerksleistung. Auf Grund 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,

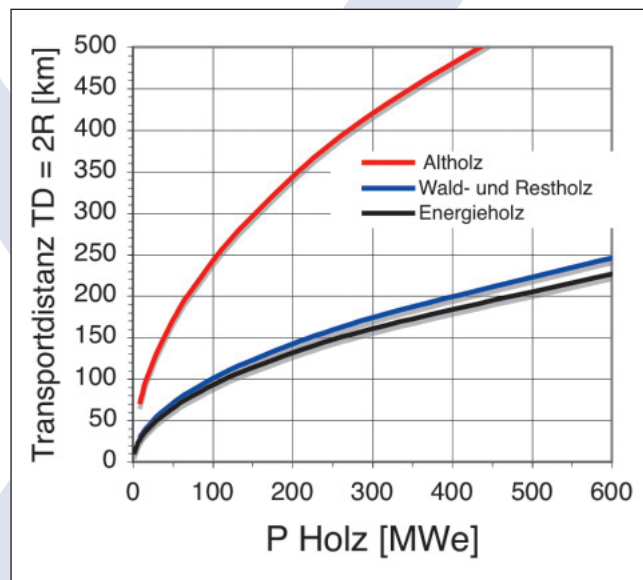


Abb. 4 Mittlere Transportdistanz für die Energieholzdichte der Schweiz in Abhängigkeit der Holz-Kraftwerksleistung.

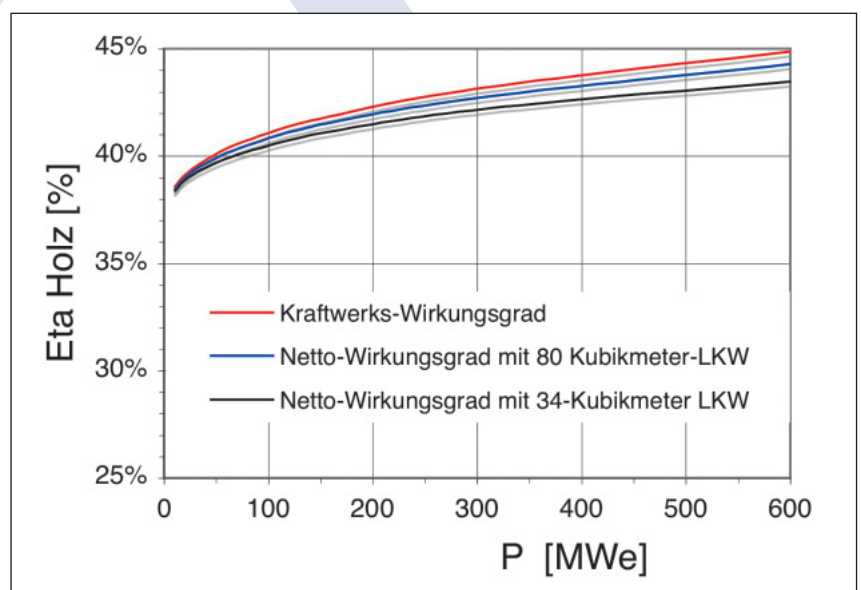
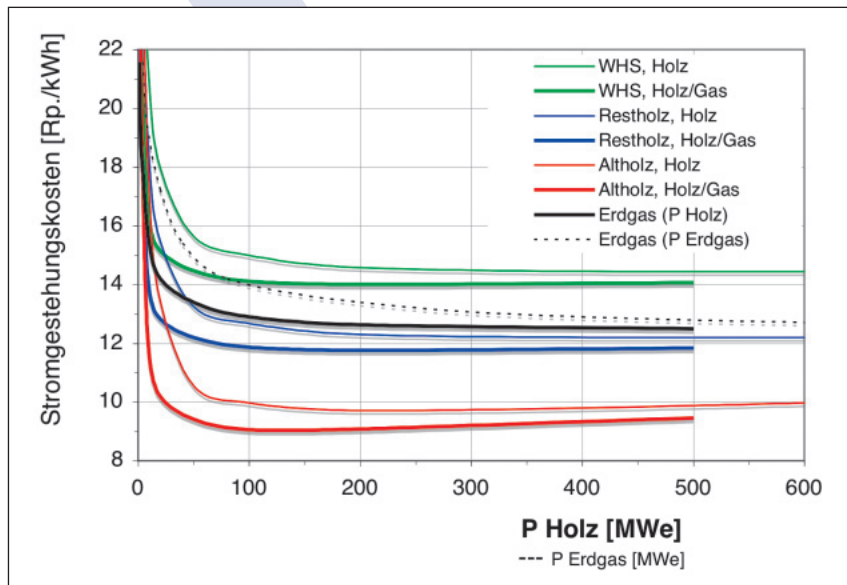


Abb. 5 Wirkungsgrad eines Holzgas-Kombikraftwerks in Funktion der elektrischen Leistung sowie Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung des Transportenergieaufwands des Holzes mit 80 Kubikmeter LKW (LKW mit Schubboden) und mit 34 Kubikmeter LKW (LKW mit Container).



**Abb. 6** 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).

was mit «Holz» gekennzeichnet ist und denjenigen für ein Holzgas/ Erdgas-Kombikraftwerk, was mit «Holz/ Erdgas» gekennzeichnet ist. Die Stromgestehungskosten aus Waldholz betragen demnach für ein Holzgas-Kraftwerk von 100 MWe rund 15 Rp./kWh, was im Vergleich zu Strom aus den meisten anderen erneuerbaren Energieträgern wirtschaftlich attraktiv ist. Dank des höheren Wirkungsgrads und der tieferen spezifischen Investitionskosten resultieren für das Holzgas/Erdgas-Kraftwerk rund 1 Rp./kWh tiefere Stromgestehungskosten. Der zunehmende Transportaufwand bei zunehmender Anlagengrösse wird bis zu rund 150 MWe überkompensiert durch den Einfluss von Wirkungsgrad und Investitionskosten. Für Wald- und Restholz bleiben die Stromgestehungskosten bis zu 600 MWe praktisch konstant,

während sie für Altholz auf Grund der unverhältnismässig langen Transportdistanzen wieder ansteigen. Für das in der Schweiz verfügbare Potenzial erscheinen deshalb Kraftwerke mit einer Holzleistung von 100 MWe bis 600 MWe ideal. Für Erdgas ist als Berechnungsbeispiel ein Preis von 7 Rp./kWh angenommen. Die Stromgestehungskosten betragen damit rund 12 bis 13 Rp./kWh und sind somit geringfügig höher als für Restholz, jedoch etwas tiefer als für Waldholz. Für Erdgas sind die Stromgestehungskosten in *Abbildung 6* 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. Zusammenfassung

Im Beitrag werden das Konzept eines kombinierten Holzgas/Erdgas-Kraftwerks vorgestellt und das Potenzial von Waldholz, Restholz und Altholz für die Schweiz aufgezeigt. Die Anlagentechnik basiert auf einer gross-technischen Wirbelschichtvergasung für Holz und einem für Erdgas und Holzgas ausgelegten Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine, in dem 20 % der Gesamtleistung durch Holz erbracht werden. Während mit Erdgas Wirkungsgrade von rund 60 % erzielt werden können, wird der Wirkungsgrad für Holz durch die Umwandlung zu Holzgas vermindert. Bei einem Vergasungswirkungsgrad von 75 % ist ein Wirkungsgrad von Holz zu Strom von gegen 45 % möglich. Allerdings sind sowohl der Wirkungsgrad als auch die spezifischen Investitionskosten stark von der Anlagengrösse abhängig, so dass die Stromgestehungskosten mit zunehmender Leistung sinken. Die Abschätzungen von Wirkungsgrad und Kosten zeigen folgende Resultate:

- Das heute noch nicht genutzte Energieholzpotenzial der Schweiz ermöglicht den Betrieb eines Holzgas-Kombikraftwerks mit einer Leistung von rund 628 MWe aus Holz während 6000 Vollbetriebsstunden pro Jahr und eine Stromproduktion von 3766 GWh/a. Wenn das Energieholz auf vier Kraftwerke mit je rund 150 MWe aufgeteilt wird, sinkt die Stromproduktion um 7 % auf 3500 GWh pro Jahr. Selbst bei Berücksichtigung des Transportaufwands sollte die Leistung zur Maximierung der Energieeffizienz und der Wirtschaftlichkeit auf eine möglichst geringe Anzahl Kraftwerke aufgeteilt werden. Aus energetischer Betrachtung wäre die Verwertung in einem einzigen Kraftwerk in der Schweiz oder sogar in einem auf weit mehr als auf das schweizerische Holzpotenzial ausgelegten Kraftwerk zu rechtfertigen. Ökonomisch ist allerdings eine Steigerung auf über 150 MWe Holzleistung nicht mehr vorteilhaft, da die Stromgestehungskosten darüber nicht mehr weiter absinken. Um eine sinnvolle Staffelung zu ermöglichen und das wirtschaftliche Risiko zu minimieren

ren wird deshalb für die Schweiz die Realisierung eines ersten Holzkraftwerks mit 150 MWe vorgeschlagen. Im Fall, dass gleichzeitig ein Erdgaskraftwerk realisiert wird, wird die Angliederung des Holzkraftwerks an ein 600 MWe Gaskraftwerk vorgeschlagen, da dadurch höhere Wirkungsgrade und tiefere Stromgestehungskosten erzielt werden. Ein solches Kraftwerk beansprucht einen Viertel des in der Schweiz verfügbaren, heute nicht genutzten Energieholzes. Bei einer gleichmässigen Verteilung des Energieholzes über die Schweiz muss für die Holzversorgung ein Einzugsgebiet von rund 60 km Fahrdistanz erschlossen werden.

- Bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren, einem Kalkulationszinssatz von 2,5 Prozent pro Jahr und einem Kraftwerksbetrieb mit 6000 Vollbetriebsstunden – was den Annahmen für die Stromangebots-Perspektiven 2035 des Bundesamts für Energie entspricht [1] – betragen die Kapital- und Betriebskosten ohne Brennstoffkosten für Wald- oder Restholz bei 150 MWe Holzleistung rund 3 Rp./kWh. Bei Holzpreisen von 4 Rp./kWh für Restholz und 5 Rp./kWh für Waldholz ergeben sich Stromgestehungskosten von rund 12 Rp./kWh für Restholz und 14 Rp./kWh für Waldholz.
- In einem Kombikraftwerk mit einer Erdgasleistung von 600 MWe – entsprechend 150 MWe Holzleistung – kann Strom aus Erdgas zu 7 Rp./kWh für 12,7 Rp./kWh erzeugt werden. Etwa gleiche Stromgestehungskosten weist Wald- und Restholz bei einem Preis von 4,5 Rp./kWh auf. Die Brennstoffkosten machen beim Erdgas dabei über 90 % der Gesamtkosten aus, während sie beim Energieholz weniger als 75 % der Gesamtkosten verursachen.
- Erdgas zu 10 Rp./kWh verursacht Stromgestehungskosten von rund 18 Rp./kWh. Gleiche Stromgestehungskosten können mit Wald- und Restholz zu 6,7 Rp./kWh erzielt werden, was deutlich über dem heutigen Energieholzpreis wäre.
- Bei einem Erdgaspreis von 5 Rp./kWh kommt Erdgas-Strom auf rund 9 Rp./kWh zu stehen. Gleiche Stromgestehungskosten können mit Altholz zu 2 Rp./kWh erzielt werden, während Wald- und Restholz für diesen Fall nicht konkurrenzfähig ist.
- Die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Erdgaskraftwerks können bei einem 20-prozentigen Leistungsanteil durch Holz um ebenfalls rund 20 % verringert werden, da die

graue Energie für den Anlagenbau und den Brennstofftransport die relative CO<sub>2</sub>-Einsparung nur geringfügig beeinflusst [2].

- Im Vergleich zu einer Energieholznutzung in dezentralen Anlagen verspricht die Verwertung in einem Kraftwerk eine erhebliche Reduktion der Schadstoffemissionen an Feinstaub, Stickoxiden, Schwermetallen, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und polychlorierten Dibenzo-*p*-Dioxinen und Furanen (PCDD/F). Für Feinstaub und teilweise auch für weitere Schadstoffe ist dies zum einen technisch bedingt, da die Nutzung von Holzgas in einer Gasturbine eine hohe, durch eine effiziente Rohgasreinigung sicher zu stellende Gasreinheit voraussetzt. Für andere Schadstoffe ist zusätzlich massgebend, dass für Grossanlagen tiefere Emissionsgrenzwerte gelten als für Kleinanlagen. In Bezug auf Feinstaub, welcher derzeit als Hauptproblem der Luftreinhaltung gilt, kann der Unterschied zwischen dezentralen Heizanlagen und einem Holzkraftwerk mehr als einen Faktor 10 ausmachen.

### Verdankung

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie durchgeführt.

### Literaturverzeichnis

- [1] *Bundesamt für Energie* (2005): Energieperspektiven 2035/ 2050, Stand Februar 2005, Bundesamt für Energie, Bern, [www.energieperspektiven.ch](http://www.energieperspektiven.ch).
- [2] *Nussbaumer, Th.* (2005): Vergleich von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz, Brennstoff Wärme Kraft BWK 57, 12.59–61.
- [3] *Remmers, R.* (2000): 25 MW-Holzkraftwerk mit stationärer Wirbelschicht in Cujik (NL). 6. Holzenergie-Symposium, 20.10.2000, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, 187–196.

- [4] *Stahl, K.; Waldheim, L.; Morris, M.; Johnsson, U.; Gardmark, L.* (2004): Biomass IGCC at Värnamo, Sweden – Past and Future, GCEP Energy Workshop, 27.4.04, Stanford University, CA, USA.
- [5] *Primas, A.; Kessler, F.* (2005): Schweizerische Holzenergiestatistik, Folgeerhebung für das Jahr 2004, Bundesamt für Energie, Bern.
- [6] *Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke* (2004): Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4: Planungshandbuch, Holzenergie Schweiz, Zürich, und C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, ISBN 3-937441-90-5.
- [7] *Oetli, B., et al.* (2004): Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Bundesamt für Energie, Bern.
- [8] *Nussbaumer, Th.* (2005): Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz: Potenzial und Wirtschaftlichkeitsabschätzung, Bundesamt für Energie, Publikation 250049, Zürich, [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch).
- [9] *Aboud, J.* (2005): Statement to the United States Senate Appropriations Committee regarding the Department of Energy Turbine R&D Programs, submitted by the Gas Turbine Association (GTA).
- [10] *Bridgwater, T.* (2004): Biomass for power and heat, Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham.
- [11] *Cameron, J.; Kumar, A.; Flynn, P.* (2004): Power from biomass: The economics of gasification vs. direct combustion, Second World Biomass Conference, 10–14 May 2004, Eta Florence & WIP Munich, 867–870.
- [12] *Craig, K.; Mann, M.* (1996): 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.
- [13] *ECG (Energy Consulting Group Ltd.)* (2004): Fossil-thermische Kraftwerke, BFE-Tagung «Zukunft des Elektrizitätsangebots», 2. Juli 2004, Bern.
- [14] *Rensfelt, E.* (2002): Gasification Survey Report Sweden. In: K. Kwant, H. Knoef (Eds.): Status of Gasification, IEA Bioenergy and Gasnet.
- [15] *Tiangco, V.; Sethi, P.; Zhang, Z.* (2005): Biomass – Strategic value analysis, IEPR Workshop, 1.7.05, California Energy Commission.

### Keywords

Kombikraftwerk – Holzvergasung – Gaskraftwerk

### Adresse des Autors

Thomas Nussbaumer, PD Dr.  
Verenum  
Langmauerstrasse 109  
CH-8006 Zürich  
Tel. +41 (0)44 377 70 70  
Fax +41 (0)44 377 70 77  
[thomas.nussbaumer@verenum.ch](mailto:thomas.nussbaumer@verenum.ch)