

Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk

Konzept, Potenzial und Wirtschaftlichkeit der IGCC-Technologie für Deutschland

Von PD Dr. Thomas Nussbaumer*, Zürich

Die großtechnische Holzvergasung zur Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine ermöglicht bis zu über 40 % elektrischen Wirkungsgrad. Neben dem derzeit höchsten Wirkungsgrad zur Stromerzeugung aus Holz werden gleichzeitig sehr tiefe Emissionen an Feinstaub und Stickoxiden erzielt. Die auch als Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) bezeichnete Technologie wurde im Demonstrationsstadium gezeigt, jedoch bis heute noch nicht kommerziell eingesetzt. Im folgenden Beitrag werden das Potenzial und die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung aus Holz in Kombikraftwerken beschrieben und die optimale Anlagengröße unter Berücksichtigung des Transportaufwands abgeschätzt.

Holz weist ein erhebliches noch ungenutztes Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger auf [1]. Zur Verwertung von Energieholz kommen die Erzeugung von Wärme, Strom und Treibstoffen in Frage.

Die Wärmeerzeugung ist als bewährte Technik verfügbar und ermöglicht einen Ersatz fossiler Energieträger im Verhältnis 1 zu 1, d. h. 1 MJ Holz ersetzt rund 1 MJ Erdgas oder Heizöl [2]. Vor allem kleine und mittlere Holzfeuerungen weisen allerdings hohe Emissionen insbesondere an Feinstaub und Stickoxiden auf.

Die Stromerzeugung aus Holz hat bisher nur eine geringe Bedeutung, weil kleine und mittlere Anlagen geringe Wirkungsgrade und hohe Investitionskosten aufweisen. So erreichen Dampfkraftanlagen zwischen 1 MW_{el} und 5 MW_{el} typische Wirkungsgrade von lediglich rund 10 % bis 20 %.

Die Herstellung von Treibstoffen wie Diesel oder Methan aus Holz ist technisch grundsätzlich beherrschbar. Allerdings stehen im durch Vergasung und Produktveredelung erzeugten Treibstoff nur noch 50 % bis 55 % des ursprünglichen Heizwerts zur Verfügung [2]. 1 MJ Holz, das zu Treibstoff umgewandelt wird, ersetzt damit noch rund 0,5 MJ bis 0,75 MJ fossile Primärenergie und somit weniger als in einer effizienten Heizung genutztes Holz.

Methan aus Holz substituiert auch weniger Erdgas als dies Holzgas in einem Kombikraftwerk ermöglicht, da bei Letzterem die Prozessverluste zur Veredelung zu Methan entfallen.

Eine in Bezug auf die CO₂-Reduktion besonders effiziente Nutzung von Holz kann durch den Ersatz von Kohle erzielt werden. Neben der Zufeuerung in Kohlekraftwerken ist dazu auch der Bau spezifischer Holzwerkwerke prüfenswert. Dient der produzierte Strom zur dezentralen Wärmeerzeugung in Wärmepumpen, welche aus 1 MJ Strom 2,5 MJ Nutzwärme erzeugen, so ist die Stromerzeugung bereits ab einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 % bis 35 % energetisch besser als dezentrale Holzheizungen. Bei Berücksichtigung der Schadstoffemissionen fällt die Be-

*PD Dr. sc. techn. Thomas Nussbaumer ist Inhaber des Ingenieurbüros Verenum in Zürich, Privatdozent an der ETH Zürich, Berater des Bundesamts für Energie und Vertreter in der Internationalen Energie Agentur IEA

wertung gar noch deutlicher zu Gunsten von Kraftwerken aus.

Holzpotenzial in Deutschland

Derzeit wird das in Deutschland verfügbare Potenzial an Energieholz von 348 PJ/a zu rund 55% genutzt (vgl. Tabelle), so dass ein noch ungenutztes Zusatzpotenzial von 156 PJ/a ausgewiesen wird [1]. Dieses teilt sich in Waldholz und Altholz auf, während für Restholz bereits eine hundertprozentige Verwertung angenommen wird. In der Zwischenzeit wird Altholz in Deutschland allerdings bereits vermehrt genutzt, während auch für Restholz bei einer gewissen Wertschöpfung voraussichtlich noch ein Zusatzpotenzial erschlossen werden kann.

Das nachfolgend verwendete Zusatzpotenzial dient damit lediglich für eine theoretische Abschätzung des maxima-



Abbildung 1 Deomonstrationsanlage des Holzgas-Kombikraftwerks in Värnamo (Schweden) [4].

len Strompotenzials. Neben Holz weist Stroh ein Zusatzpotenzial von 101 PJ/a auf. Stroh kommt für eine energetische Nutzung in Kraftwerken ebenso in Frage wie Holz, allerdings ist der technische Aufwand wegen der höheren Gehalte an Alkalimetallen und Halogenen höher. Für Deutschland wird zudem mit 400 PJ/a ein Potenzial an Energiepflanzen ausgewiesen, das höher ist als das gesamte Holzpotenzial. Für Energiepflanzen sind allerdings der Energieaufwand für den Anbau sowie weitere Faktoren zu berücksichtigen, weshalb im vorliegenden Beitrag vorerst lediglich das Holzpotenzial bewertet wird.

Potenzial, Nutzung und Zusatzpotenzial (Potenzial abzüglich Nutzung) an Holz, Stroh und Energiepflanzen in Deutschland nach [1]*

	Potenzial PJ/a	Nutzung PJ/a	Zusatzpotenzial PJ/a
Holz	Waldholz	227	87
	Restholz	40	0
	Altholz	81	69
	Total	348	192
Stroh	104	3	101
Energiepflanzen	400	0	400
Gesamtenergieverbrauch		14334	

* 1 PJ = 1015 J

Technik für Holzwerkwerke

Ein heutiges Holzwerkwerk auf Basis der Dampfkrafttechnik erzielt bei einer Leistung von 25 MW_{el} rund 30 % elektrischen Wirkungsgrad [3]. Demgegenüber verspricht ein Holzgas-Kombikraftwerk gleicher Leistung mit Holzvergasung und Gas- und Dampfturbine einen Wirkungsgradsprung auf rund 40 %. Diese Technologie, welche auch als Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) bezeichnet wird, wurde im Rahmen von Forschungs- und Demonstrationsprojekten entwickelt.

In Schweden existiert eine Demonstrationsanlage, welche über mehrere Jahre und während über 10000 Stunden mit verschiedenen Biomasse-Brennstoffen betrieben wurde (vgl. Abbildung 1) [4]. Die Anlage weist eine Druckvergasung bei 20 bis 25 bar in einer zirkulierenden Wirbelschicht auf und leistet insgesamt 6 MW_{el}, wobei zwei Drittel von der Gas- und ein Drittel von der Dampfturbine erbracht 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 bis gegen 45 % möglich. Die Machbarkeit dieser Technologie ist somit grundsätzlich nachgewiesen, wobei für eine Kommerzialisierung eine Leistung von mindestens 40 MW_{el} empfohlen wird.

Kombination von Erdgas und Holz

Als Alternative zu einer unabhängigen Stromerzeugung aus Erdgas und Holz kommt eine kombinierte Nutzung in Frage. Gegenüber zwei separaten Kraftwerken verspricht dies verschiedene Vorteile. Einerseits kann der Wirkungsgrad der Holznutzung wegen der Größenabhängigkeit durch die Angliederung an ein Erdgaskraftwerk erhöht werden, andererseits kann die Logistik zur Energieholzbeschaffung vorerst auf eine kurzfristig realisierbare Holzmenge ausgelegt und später erhöht werden.

Zur kombinierten Nutzung von Holzgas und Erdgas kommen verschiedene Konzepte in Frage. Gereinigtes Holzgas und Erdgas können in einer Gasturbine genutzt oder in auf beide Brennstoffe je separat ausgelegten Gasturbinen mit gemeinsamem Dampfteil eingesetzt werden. Abbildung 2 zeigt das Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes und gemeinsamer Gasturbine für Holzgas und Erdgas, was für Leistungen bis rund 400 MW_{el} in Frage kommt. Ohne Zufuhr von Erdgas entspricht der Aufbau einem reinen IGCC-Kraftwerk für Holz.

Wirkungsgrad und Investitionskosten

Über den Wirkungsgrad und die Investitionskosten von Kombikraftwerken liegen Angaben aus der Literatur vor [4 bis 11]. Die Erfahrungen basieren

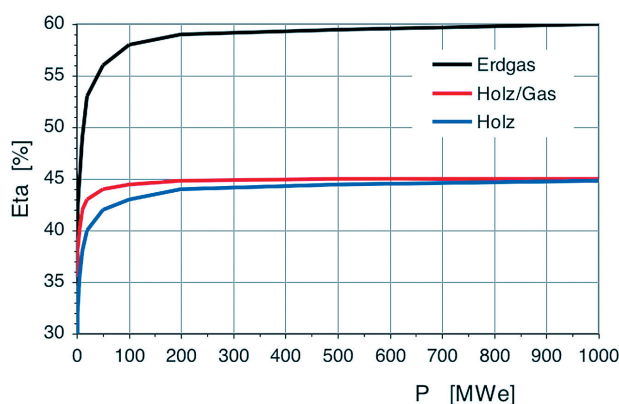


Abbildung 3 Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Holz in Funktion der elektrischen Holzleistung für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas, rot) mit 20% Holzanteil und für ein reines Holzgas-Kombikraftwerk (Holz, blau). Als Vergleich ist der Wirkungsgrad eines reinen Erdgas-Kombikraftwerks als Funktion der Erdgasleistung dargestellt (Erdgas, schwarz).

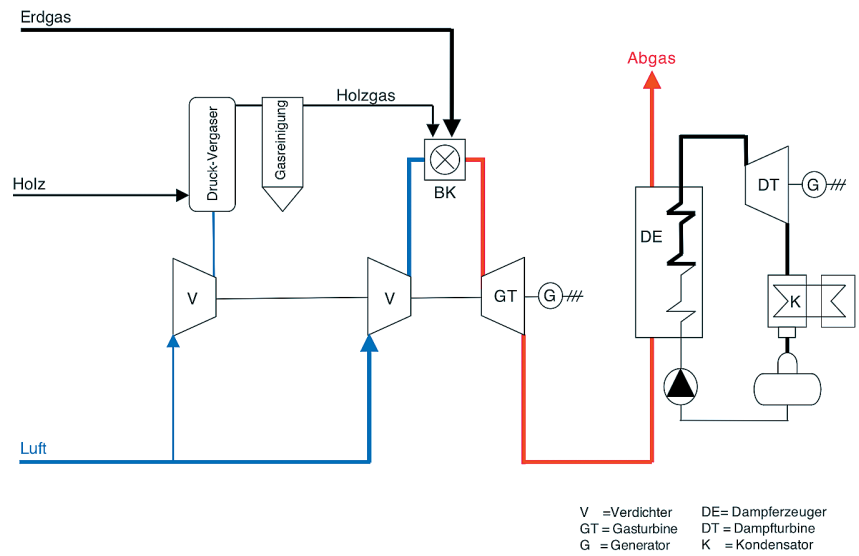


Abbildung 2 Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes in einer zirkulierenden Wirbelschicht und gemeinsamer Nutzung von Erdgas und gereinigtem Holzgas in einer gemeinsamen Gasturbine.

einerseits auf Demonstrationsanlagen mit Biomasse und andererseits auf Kraftwerken mit Kohlevergasung. Anhand dieser Daten werden für die vorliegende Abschätzung tendenziell pessimistische Wirkungsgrad- und Investitionskosten angenommen. Das Vorgehen ist in [12] beschrieben, wo auch das Potenzial für die Schweiz aufgezeigt wird.

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 wird, also der Kraftwerksteil mit Zufeuerung von Holzgas den gleichen Wirkungsgrad wie ein Erdgaskraftwerk erzielt.

Bezüglich Investitionskosten wird eine Mischrechnung angenommen, bei der die Zusatzkosten für den Holzteil allein dem Holz zugerechnet werden. Zudem wird vereinfachend angenommen, dass die Holzvergasung plus die Leistungserhöhung im Vergleich zu einem Erdgaskraftwerk gleich hohe spezifische Kosten verursachen wie ein reines Holzwerkwerk.

Der so ausgewiesene Vergleich zwischen Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk zeigt damit die Bandbreite des zu erwartenden Verbesserungspotenzials durch die kombinierte Nutzung auf. Eine exakte Berechnung für ein kombiniertes Kraftwerk setzt dagegen eine definitive Auslegung der Anlage mit Erhebung exakter Investitionskosten voraus.

Auf Basis der Literaturwerte und den beschriebenen Annahmen resultieren Wirkungsgrade gemäss Abbildung 3, sowie spezifische Investitionskosten gemäss Abbildung 4, für ein Kombikraftwerk mit Holz, mit Holz/Erdgas sowie mit Erdgas. Für Holz und für Holz/Gas bezeichnet die Leistung auf der x-Achse die Holzleistung, so dass die Differenz der Kurven das Verbesserungspotenzial durch die Angliederung von Holz an ein Erdgaskraftwerk ausweist.

Der Vergleich zeigt, dass die Angliederung von Holz an ein Erdgaskraft-

werk für Holzleistungen bis zu rund 200 MW_{el} einen relevanten Vorteil ermöglichen kann. So wird zum Beispiel der Wirkungsgrad zur Produktion von 50 MW_{el} aus Holz von 42,0 % auf 44,0 % erhöht, was einer Verbesserung um rund 5 % entspricht. Für Leistungen über 200 MW_{el} wird der Unterschied zu einem reinen Holzwerkwerk dagegen gering.

Optimale Anlagengröße

Die Distanz für den Holztransport nimmt mit zunehmender Anlagengröße zu. Wenn eine gleichmäßige Holzverteilung und ein gleichmäßiges Transportnetz vorausgesetzt werden, steigt die Transportdistanz mit der Wurzel der Anlagenleistung. Abbildung 5 zeigt die erwartete mittlere Transportdistanz für die Versorgung mit Waldholz, mit Altholz, sowie mit Wald- und Altholz. Eine Holzleistung von 100 MW_{el} verursacht demnach eine Transportdistanz von rund 100 km für Wald- und Altholz entsprechend einem Einzugsgebiet von 50 km.

Um die energetisch optimale Anlagengröße abzuschätzen, zeigt Abbildung 6 den Netto-Wirkungsgrad des Kraftwerks unter Berücksichtigung des Transportaufwands bei reinem Straßen-transport. Für den Lkw ist dabei ein Dieserverbrauch von 40 l pro 100 km angenommen und Diesel ist zur Berücksichtigung der grauen Energie mit einem Faktor 1,25 bewertet.

Die Grafik zeigt, dass der Netto-Wirkungsgrad bis zu einer Holzleistung von 200 MW_{el} ansteigt. Für größere Leistungen bleibt er für Lastwagen mit 80 m³ Ladevolumen nahezu konstant, während er für kleinere Ladevolumina wieder abnimmt.

Strompotenzial in Deutschland

Durch Nutzung des gesamten Zusatzpotenzials an Holz kann je nach Anlagengröße eine Stromproduktion zwi-

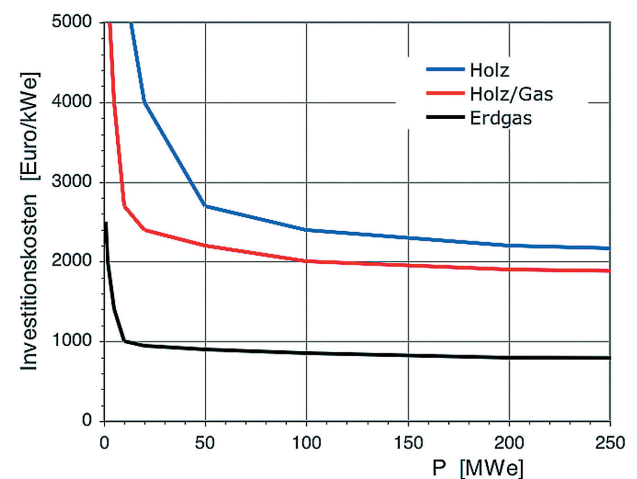


Abbildung 4 Spezifische Investitionskosten des Holzteils für ein Holzgas-Kombikraftwerk (Holz) und ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas) in Funktion der Holzleistung. Zum Vergleich sind die Investitionskosten des Erdgas-Kombikraftwerks in Funktion der Erdgasleistung aufgetragen.

Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk

Fortsetzung von Seite 000

schen rund 17 TWh/a und maximal 19,5 TWh/a erzielt werden (vgl. Abbildung 7). Der Maximalwert gilt für die Aufteilung des Holzes auf vier Kraftwerke zu je 800 MW_{el} oder für eine kleinere Zahl noch größerer Kraftwerke.

Da auf Grund des Transportaufwands Holzleistungen über 200 MW_{el} kaum sinnvoll sind, bietet sich zum Beispiel der Bau von maximal 16 Kraftwerken mit je 200 MW_{el} Holzleistung an. In Holzgas-Kombikraftwerken ermöglicht dies eine Stromproduktion von rund 19 TWh/a, während in Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerken rund 19,5 TWh/a produziert werden könnten.

Wirtschaftlichkeit

Nachfolgend werden die Stromgestehungskosten nach der Annuitätenmethode ausgewiesen, wobei folgende Annahmen getroffen werden:

- ◆ Kalkulatorischer Kapitalzins von 5,0% p.a.
- ◆ Kalkulationsdauer von 30 Jahren.
- ◆ Für das Holzgas/Erdgas-Kraftwerk wird die Gesamtleistung zu 20% mit Holz und zu 80% mit Erdgas gedeckt.
- ◆ Für alle Kraftwerke wird ein Betrieb mit 6000 Vollbetriebsstunden angenommen.
- ◆ Für die Brennstoffpreise gelten folgende Werte: Erdgas 5 CE/kWh, Waldholz 2 CE/kWh, Restholz 1 CE/kWh und Altholz 0,5 CE/kWh**.

Weitere Annahmen wie zum Beispiel die Betriebskosten, welche für Holz höher als für Erdgas und für Altholz höher als für Waldholz angenommen werden, sind in [12] ausgeführt.

Als Resultat der Berechnungen zeigt die Stromgestehungskosten in Funktion der Leistung. Mit den angenommenen Brennstoffpreisen weisen Alt- und Restholz nahezu identische Stromgestehungskosten von rund 6 CE/kWh für Holzgas/Erdgas-Kraftwerke und von 7 CE/kWh für Holzgas-Kraftwerke ab 100 MW_{el} auf. Strom aus Waldholz kann zu 8 CE/kWh bzw. 8,5 bis 9 CE/kWh produziert werden. Die Differenz von 0,5 bis 1 CE/kWh zeigt das Verbesserungspotenzial der Angliederung von Holz an ein Erdgaskraftwerk.

Im Vergleich zu Strom aus anderen erneuerbaren Energieträgern sind die Gestehungskosten von unter 10 CE/kWh wirtschaftlich interessant, wobei im Vergleich zu Solar- und Windstrom zu beachten ist, dass der Strom bedarfsgerecht produziert werden kann und für den Betrieb eine Auslastung von 6000 Vollbetriebsstunden angenommen wurde.

Eine Hochrechnung zeigt, dass Holz zu 3 CE/kWh ungefähr gleiche Stromgestehungskosten wie Erdgas zu 5 CE/kWh ergibt.

Für Erdgas sind die Stromgestehungskosten Abbildung 8 einerseits in Funktion der Holzleistung eingetragene (die Erdgasleistung entspricht dabei dem Vierfachen der Holzleistung), andererseits in Abhängigkeit der Erdgasleistung. Ein Erdgaspreis von 5 CE/kWh verursacht demnach Stromgestehungskosten von rund 10 CE/kWh für Kraftwerke ab 500 MW_{el}. Die Stromgestehungskosten sind dabei unabhängig davon, ob das Kraftwerk nur mit Erdgas oder zu 20% mit Holzgas betrieben wird, da die Kosten für den Erdgasteil separat erfasst wurden.

Für andere Erdgaspreise können die Stromgestehungskosten sofort abgeschätzt werden, indem berücksichtigt wird, dass die Kapital- und Betriebskosten zusammen rund 1,5 bis 2 CE/kWh betragen, während die Brennstoffkosten dem Erdgaspreis dividiert durch den Wirkungsgrad von rund 0,6 entsprechen.

Emissionen

Die thermische Nutzung biogener Brennstoffe verursacht relevante Emissionen an Feinstaub, Stickoxiden (NO_x), Kohlenwasserstoffen (KW), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sowie – vor allem bei belastetem Holz – von Dibenzo-p-Dioxinen und -Furanen (PCDD/F). Ein Vergleich der Emissionswerte mit typi-

schen Werten von Holzfeuerungen zeigt, dass ein Holzgas-Kombikraftwerk vor allem in Bezug auf Feinstaub vorteilhaft ist und auch bezüglich aller weiteren Schadstoffe tiefe Werte erzielt:

Feinstaub

Entscheidend für einen zuverlässigen Betrieb eines Holzgas-Kombikraftwerks ist die Gewährleistung niedriger Gehalte an Partikeln und Alkalimetallen im als Gasturbinen-Brennstoff eingesetzten Holzgas. 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 Staubemissionen von weniger als 1 mg/m³ (bei 11 Vol.-% O₂) auf [14].

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 zehnfach höhere Staubemissionen auf, während automatische Holzfeuerungen ohne Feinstaubabscheidung sowie handbeschickte Holzfeuerungen rund hundertmal höhere Staubemissionen verursachen.

Wenn das Holz, welches heute in Feuerungen ohne Feinstaubabscheider genutzt wird in einem Holzgas-Kombikraftwerk verwertet würde, könnte die Feinstaubbelastung aus der Energieholznutzung somit auf einen Bruchteil reduziert werden.

Kohlenwasserstoffe und PCDD/F

Auf Grund 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 <0,01 ng TE/m³ ausgewiesen [14].

Stickoxide

Ohne Zusatzmaßnahmen wird ein Teil des Brennstoffstickstoffs, welcher im Rohgas vorwiegend als Ammoniak (NH₃) vorliegt, in der Brennkammer oxidiert und führt so zu Stickoxidemissionen (NO_x). Für Waldhackschnitzel 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 Holz mit 0,5 bis 1 Gew.-% mit rund 300 bis 500 mg/m³ [4, 14].

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 mittels SCR-Verfahren an, daneben kommt aber auch eine NH₃-Abscheidung im Rohgas in Frage. Mit einer oder mehrerer dieser NO_x-Minderungsmaßnahmen sind Emissionswerte von deutlich unter 80 mg/m³ möglich.

Fazit

Die technische Machbarkeit der Holzvergasung und Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine wurde im Demonstrationsstadium bereits gezeigt und sie 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

** Zur Erläuterung: In Deutschland waren Waldhackschnitzel mit 35% Wassergehalt im ersten Quartal 2005 zu einem Preis von im Mittel Euro 58.- pro Tonne mit einer Bandbreite zwischen Euro 30.- und 80.- verfügbar [13]. Dies entspricht 1 bis 2,6 CE/kWh bei einem mittleren Preis von 1,9 CE/kWh. Restholz ist – sofern verfügbar – kostengünstiger, während für Altholz teilweise sogar eine Gebühr berechnet wird, was zur Planung aber als unrealistisch betrachtet wird. Im September 2005 musste für Heizöl in Deutschland für grössere Liefermengen rund Euro 60.- pro 100 Liter oder 6,0 CE/kWh bezahlt werden. Erdgas war für Endkunden zu rund 5,0 CE/kWh verfügbar, ist im langfristigen Trend allerdings teurer als Heizöl. Obwohl Erdgas für Grossverbraucher derzeit teilweise erheblich günstiger verfügbar ist, wird für die Kostenrechnung deshalb mit 5,0 CE/kWh gerechnet.

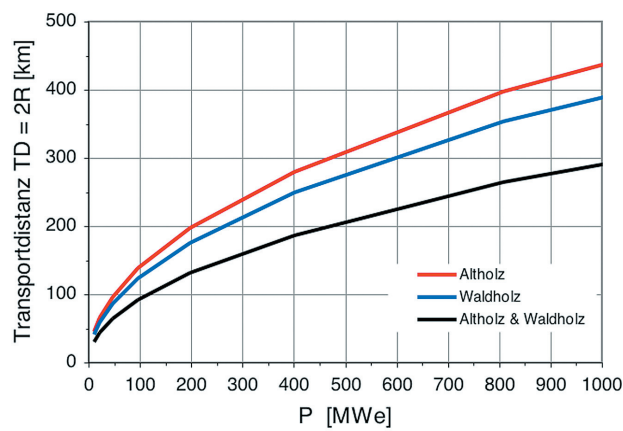


Abbildung 5 Mittlere Transportdistanz für Holz in Abhängigkeit der Holz-Kraftwerksleistung. Die Berechnungen gelten für einen Kraftwerksbetrieb mit 6000 Vollbetriebsstunden pro Jahr.

werden – auch an Stickoxiden. Die vorgestellte Abschätzung zeigt, dass für Deutschland eine Anlagengrösse mit einer Holzleistung von rund 200 MW_{el} optimal ist. Für Leistungen deutlich unter 100 MW_{el} wird der sinkende Anlagenwirkungsgrad relevant, während für Leistungen über 200 MW_{el} der Transportaufwand für den Straßentransport limitierend wird.

Das für Deutschland ausgewiesene Zusatzpotenzial an bisher nicht genutztem Holz würde den Bau von maximal 16 Kraftwerken mit je 200 MW_{el} und einer jährlichen Stromproduktion von rund 19 TWh oder 3,6% der heutigen Stromproduktion ermöglichen. Für die Stromgestehungskosten ist dabei für Waldholz zu 2 CE/kWh mit 8 bis 9 CE/kWh zu rechnen.

Besonders interessant wäre ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk, das dank des Größenvorteils einen Wirkungsgrad von gegen 45% für Holz und 60% für Erdgas verspricht. Dazu wird ein Anteil des Holzes von 20% der Gesamtleistung vorgeschlagen. Für Holzleistungen zwischen 100 MW_{el} und 200 MW_{el} würde die Anbindung von Holz an ein Erdgaskraftwerk die Stromgestehungskosten aus Holz um 0,5 bis 1 CE/kWh reduzieren.

Im Weiteren könnten durch die Kombination die Versorgungssicherheit erhöht und eine sukzessive Steigerung der Holzleistung ermöglicht werden. Im Vergleich zu einem reinen Erdgaskraftwerk erlaubt die Zufuehrung von Holzgas eine Minderung der fossilen CO₂-Emissionen ungefähr im Verhältnis zum Holzanteil an der Kraftwerksleistung. Zur Einführung der Technologie und den Aufbau der Versorgung wäre vorerst der Bau von einem Holzgas-Kraftwerk mit rund 200 MW_{el} und allenfalls einem Holz/Erdgas-Kraftwerk mit 100 MW_{el} bis 200 MWe Holzleistung ideal.

Literatur

- [1] Kaltschmitt, M.: Einleitung und Zielsetzung, Energie aus Biomasse, Springer, Berlin 2001, ISBN 3-540-64855-4/2001, 1–32.
- [2] Nussbaumer, Th.: Energie aus Holz: Welche Anwendung ist sinnvoll? Holz-Zentralblatt, 131. Jg., Nr. 63 (2005), 823-824
- [3] Remmers, R.: 25 MW-Holzgas-Kraftwerk mit stationärer Wirbelschicht in Cuijk (NL). 6. Holzenergie-Symposium, 20.10.2000, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, 2000, 187-196.
- [4] Stahl, K., Waldheim, L., Morris, M., Johnson, U., Gardmark, L.: Biomass IGCC at Värnamo, Sweden - Past and Future, GCEP Energy Workshop, 27.4.04, Stanford University, CA, USA, 2004.
- [5] Abboud, J.: Statement to the United States Senate Appropriations Committee regarding the Department of Energy Turbine R&D Programs, Gas Turbine Association (GTA), 2005.
- [6] Bridgewater, T.: Biomass for power and heat, Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham, 2004.
- [7] 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.

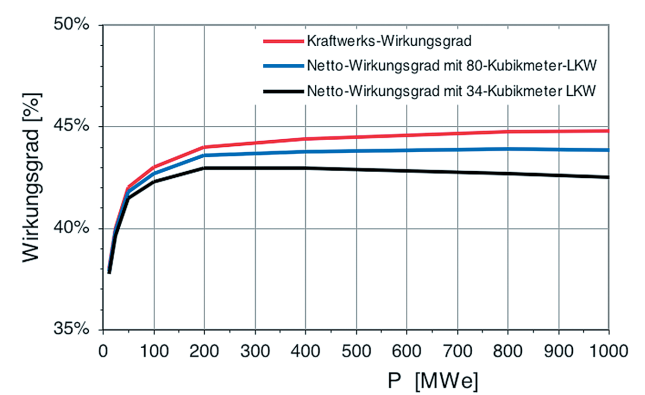


Abbildung 6 Wirkungsgrad eines Holzgas-Kombikraftwerks in Funktion der elektrischen Leistung sowie Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung des Transportenergieaufwands für Lkw mit 80 m³ (Schubboden) und mit 34 m³ (Container).

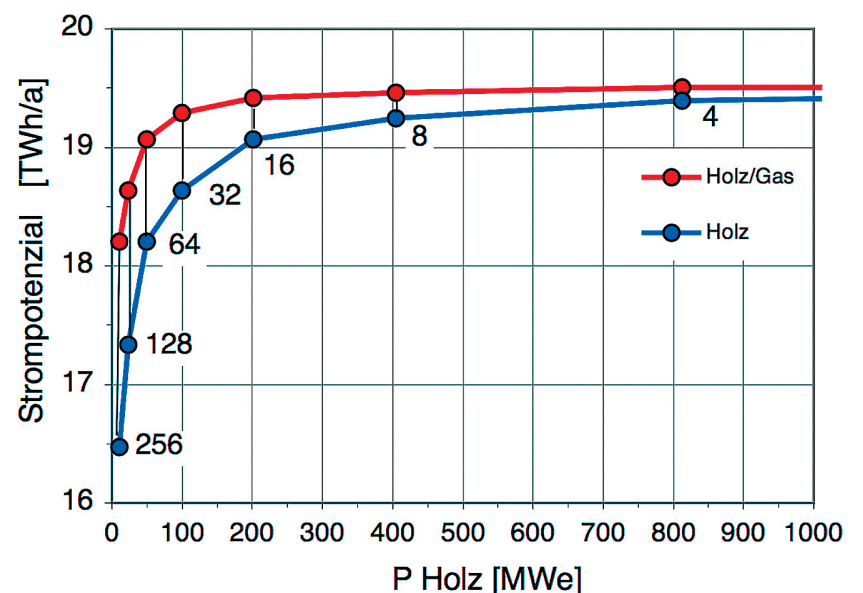


Abbildung 7 Potenzial zur Stromerzeugung aus Holz mit bis heute nicht genutztem Zusatzpotenzial an Holz in Funktion der Holzleistung je Kraftwerk. Die Zahlen im Diagramm bezeichnen die Anzahl Kraftwerke zur Nutzung des gesamten Zusatzpotenzials.

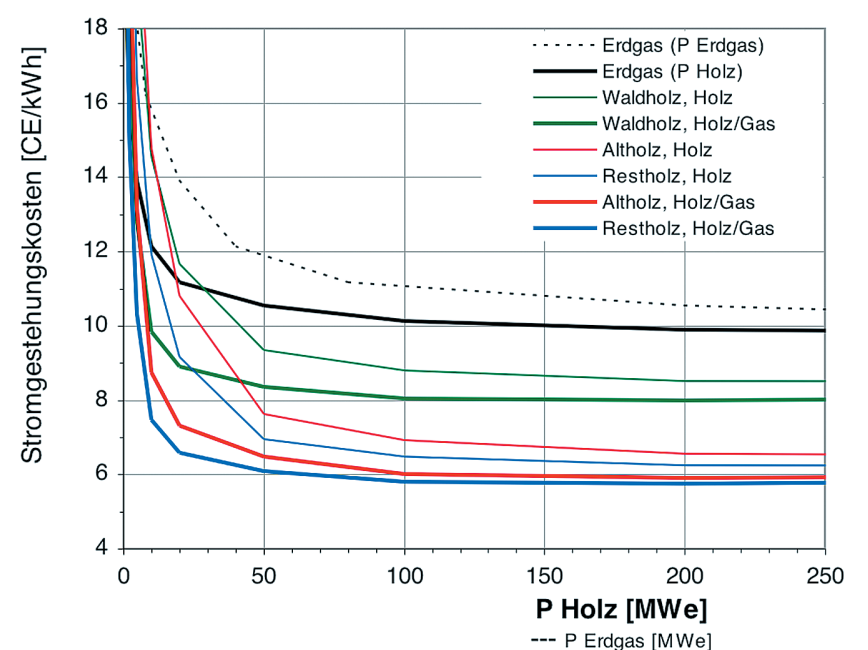


Abbildung 8 Stromgestehungskosten in Funktion der elektrischen Leistung für Brennstoffpreise von 5 CE/kWh für Erdgas, 2 CE/kWh für Waldholz, 1 CE/kWh für Restholz und 0,5 CE/kWh für Altholz. Erläuterungen: P Holz = Kraftwerksleistung Holz = 20% der Gesamtleistung, P Erdgas = Kraftwerksleistung Erdgas = 80% der Gesamtleistung, Waldholz, Holz = Waldholz für reines Holzgas-Kombikraftwerk, Waldholz, Holz/Gas = Waldholz 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.

- [8] Craig, K., Mann, M.: Cost and Performance Analysis of Biomass-Based Integrated Gasification Combined-Cycle (BIGCC) Power Systems, NREL/TP-430-21657, Golden, Colorado 80401-3393, U.S. Department of Energy 1996.
- [9] Energy Consulting Group: Fossil-thermische Kraftwerke, BFE-Tagung „Zukunft des Elektrizitätsangebots“, 2. Juli 2004, Bern.
- [10] Rensfelt, E.: Gasification Survey Report Sweden. In: K. Kwant, H. Knoef (Eds.): Status of Gasification, IEA Bioenergy and Gasnet, 2002.
- [11] Tiango, V., Sethi, P., Zhang, Z.: Biomass -

- Strategic value analysis, IEPR Workshop, 1.7.05, California Energy Commission, 2005.
- [12] Nussbaumer, Th.: Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz: Potenzial und Wirtschaftlichkeitsabschätzung, Bundesamt für Energie, Publikation 250049, Zürich 2005, www.energieforschung.ch.
- [13] Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing und Entwicklungs-Netzwerk e.V.: Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln, www.carmen-ev.de, 2005.
- [14] Stahl, K.: Värnamo Demonstration Plant, Berlings Skogs, Trelleborg (S) 2001.