



Thomas Nussbaumer

Input-Papier für die Stromangebots-Perspektiven 2035  
des Bundesamts für Energie





# Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Kurzfassung .....</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Einleitung.....</b>                           | <b>7</b>  |
| 2.1      | Motivation und Konzept.....                      | 7         |
| 2.2      | Zielsetzung.....                                 | 9         |
| <b>3</b> | <b>Potenzial.....</b>                            | <b>10</b> |
| 3.1      | Biomasseanfall in der Schweiz.....               | 10        |
| 3.2      | Energieholzpotenzial.....                        | 11        |
| 3.3      | Leistungspotenzial für Holzkraftwerke.....       | 13        |
| 3.4      | Stromerzeugungspotenzial aus Zusatz-Holz.....    | 14        |
| <b>4</b> | <b>Annahmen.....</b>                             | <b>15</b> |
| 4.1      | Wirkungsgrad .....                               | 15        |
| 4.2      | Investitionskosten.....                          | 16        |
| 4.3      | Transportdistanz .....                           | 16        |
| 4.4      | Kapital-, Brennstoff- und Betriebskosten.....    | 17        |
| <b>5</b> | <b>Resultate .....</b>                           | <b>19</b> |
| 5.1      | Gültigkeitsbereich und Genauigkeit.....          | 19        |
| 5.2      | Transportdistanz und Transportaufwand.....       | 19        |
| 5.3      | Wirkungsgrad Holz.....                           | 21        |
| 5.4      | Investitionskosten Holz.....                     | 22        |
| 5.5      | Wirkungsgrad und Investitionskosten Erdgas ..... | 23        |
| 5.6      | Vergleich von Holz und Erdgas .....              | 24        |
| 5.7      | Stromgestehungskosten.....                       | 25        |
| 5.8      | Einfluss des Erdgas-Preises .....                | 27        |
| <b>6</b> | <b>Literatur.....</b>                            | <b>29</b> |

# 1 Kurzfassung

Die vorliegende Studie stellt das Konzept der kombinierten Nutzung von Holz und Erdgas in einem Kombikraftwerk vor. Im weiteren werden das Potenzial in Form von Waldholz, Restholz und Altholz für die Schweiz aufgezeigt und die Stromgestehungskosten abgeschätzt. Die Anlagentechnik basiert auf einer grosstechnischen Wirbelschichtvergasung für Holz und einem für Erdgas und Holzgas ausgelegten Kombikraftwerk, in dem 20% der Gesamtleistung durch Holz erbracht werden. Das gereinigte Holzgas soll dazu in einer Gasturbine genutzt und die Abwärme zum Antrieb einer Dampfturbine eingesetzt werden. Während mit Erdgas nach diesem Prinzip 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 erzielbare Wirkungsgrad als auch die spezifischen Investitionskosten stark von der Anlagengrösse abhängig. In der Studie wird der Einfluss der Anlagengrösse auf den Wirkungsgrad und die Stromgestehungskosten aufgezeigt und dabei auch der mit zunehmender Anlagengrösse steigende Transportaufwand berücksichtigt. Im Weiteren wird ein Vergleich zwischen einem reinen Holzgas-Kombikraftwerk und einem kombinierten Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk diskutiert. Die Abschätzungen von Wirkungsgrad und Kosten zeigen folgende Resultate, welche als Grössenordnung für weitere Entscheide dienen sollen:

- Die Kombination eines Erdgas-Kombikraftwerks mit einem Holzgas-Kombikraftwerk verspricht den höchstmöglichen bis anhin realisierten elektrischen Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Holz. Im Vergleich zu zwei unabhängigen Kraftwerken werden für Holz ein höherer Wirkungsgrad und tiefere spezifische Investitionskosten sowie tiefere Stromgestehungskosten erzielt.
- Das heute noch nicht genutzte Energieholzpotenzial der Schweiz ermöglicht den Betrieb eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit einer elektrischen Leistung von rund 628 MWe aus Holz während 6'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr und einer Stromproduktion von 3'766 GWh pro Jahr. Wenn das Energieholz zum Beispiel auf vier Kraftwerke mit je rund 150 MWe aufgeteilt wird, sinkt die Stromproduktion um 7% auf 3'500 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. Theoretisch wäre die Verwertung in einem einzigen Kraftwerk in der Schweiz oder sogar in einem auf weit mehr als das schweizerische Holzpotenzial ausgelegte Kraftwerk zu rechtfertigen. Allerdings sinken die Stromgestehungskosten ab rund 150 MWe Holzleistung kaum mehr ab, weshalb für die Wirtschaftlichkeit und die zeitliche Staffelung zur Einführung der grosstechnischen Holzverstromung eine Anlagengrösse von 150 MWe Holzleistung als optimal empfohlen wird.
- Ein Kraftwerk mit 150 MWe Holz- und 600 MWe Erdgasleistung entspricht einer zugeführten Holzleistung von 360 MW und beansprucht somit einen Viertel des in der Schweiz verfügbaren, heute nach konservativer Schätzung nicht genutzten Energieholzes (eine neuere Erhebung weist noch 1,1 Mio Kubikmeter oder 18% mehr Holz aus, welches ökologisch genutzt werden kann). Bei einer gleichmässigen Verteilung des Energieholzes über die Schweiz muss für die Holzversorgung eines solchen Kraftwerks ein Einzugsgebiet von rund 60 km Fahrdistanz erschlossen werden, was Transportdistanzen mit leerer Rückfahrt von rund 120 km verursacht. Durch geeignete Standortwahl ist noch eine Verkürzung der mittleren Transportdistanzen oder eine teilweise Versorgung

per Bahn anzustreben. Da eine Anlage mit 150 MWe Holzleistung 25% des Holzpotenzials nutzt, bieten sich mehrere Möglichkeiten für eine gleichzeitige oder spätere Verwertung des restlichen Potenzials. So kann entweder nebst der Stromerzeugung auch die Wärmeerzeugung aus Holz weiter gefördert werden, es können aber auch schrittweise weitere Kraftwerke gleicher Leistung realisiert oder der Anteil an Energieholz an der Versorgung eines Erdgas/Holzgas-Kombikraftwerks zu einem späteren Zeitpunkt durch Ausbau der Vergasungsleistung auf 80% bis 100% (letzteres mit dem nach neueren Erhebungen ausgewiesenen Zusatzpotenzial) gesteigert werden.

- Bei einer Abschreibungsdauer von 30 Jahren, einem Kapitalzins von 2,5 Prozent pro Jahr und einem Kraftwerksbetrieb mit 6'000 Vollbetriebsstunden – den Annahmen für die Stromangebots-Perspektiven 2035 des Bundesamts für Energie entspricht – 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 damit 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. Das bis anhin ungenutzte Altholz in der Schweiz entspricht einer Leistung von rund 92 MWe. Wegen der vergleichsweise geringen Menge empfiehlt sich für Altholz entweder die Mitverwertung in einer oder mehreren auf sämtliche Energieholzsortimente ausgelegten Grossanlage oder die Nutzung in einer einzigen auf das gesamte Altholzpotezial ausgelegten Anlage.
- Die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Erdgaskraftwerks können bei einem 20-prozentigen Leistungsanteil durch Holz ebenfalls um 20% verringert werden. Die Berücksichtigung der grauen Energie für den Bau der Anlage sowie des Transportaufwands für die Brennstoffversorgung beeinflusst die relative CO<sub>2</sub>-Einsparung nur geringfügig. Da die graue Energie zum Bau der Anlage bei einer Lebensdauer von 30 Jahren weniger als 1 Prozent der Stromproduktion beträgt [Nussbaumer 2004] und der Dieselverbrauch für ein 100 MWe Holzleistung ebenfalls weniger als 1 Prozent der Stromproduktion ausmacht, beträgt die Netto-CO<sub>2</sub>-Einsparung bei Anrechnung der fossilen grauen Energie für die Holzverstromung immer noch mehr als 19,6%. Unter Berücksichtigung der substituierten grauen Energie für die Gasversorgung ist die Reduktion noch entsprechend höher.
- Im Vergleich zu einer Nutzung des Energieholzes in dezentralen Anlagen verspricht die Verwertung in einem Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk eine deutliche Reduktion der Schadstoffemissionen an Feinstaub, Stickoxiden, Schwermetallen und voraussichtlich auch an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sowie an polychlorierten Dibenzo-*p*-Dioxinen und Furanen

(PCDD/F). Für den Feinstaub und teilweise weitere Schadstoffe ist dies zum Einen technisch bedingt, da die Nutzung von Holzgas in einer Gasturbine eine hohe, durch eine aufwändige Rohgas-Reinigung sicher zu stellende Gasreinheit voraussetzt und auch kondensierbare Kohlenwasserstoffe nur in geringen Konzentrationen zulässig sind. Für andere Schadstoffe ist zum Teil zusätzlich massgebend, dass für Grossanlagen wesentlich tiefere Emissionsvorschriften gelten als für Kleinanlagen. Beim Feinstaub, welcher derzeit als Hauptproblem der Luftreinhaltung gilt, kann der Unterschied zwischen dezentralen Heizanlagen und einem Holzkraftwerk bis zu mehr als einem Faktor 10 ausmachen. Eine gesamtheitliche Bewertung der Schadstoffemissionen ist allerdings nicht Teil der vorliegenden Studie, welche vorab das Potenzial und die Gesamteffizienz bewerten soll. Die Schadstoffemissionen werden zudem durch Technik, Brennstoff und Vorschriften beeinflusst. Nebst der Anlage sind zudem die Schadstoffemissionen für die Versorgung zu bewerten, insbesondere die durch den Brennstofftransport verursachten Feinstaub- und Stickoxidemissionen. Eine definitive Bewertung der Schadstoffemissionen erfordert deshalb eine separate Beurteilung.

## 2 Einleitung

### 2.1 Motivation und Konzept

Zur Stromerzeugung aus Holz kommen heute fast ausschliesslich Dampfkraftanlagen zum Einsatz. Kleine und mittlere Anlagen erzielen allerdings nur bescheidene elektrische Wirkungsgrade von rund 10% netto bei 1 MWe, 20% bei 10 MWe und 30% bei 25 MWe. Als Alternative zur Dampfkrafttechnik bietet sich die Holzvergasung mit Nutzung des Gases in Motoren oder Gasturbinen an. Für Leistungen ab rund 10 MWe kommt dazu der Einsatz von Wirbelschichtvergasern sowie die Nutzung des Gases in einem Holzgas-Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine in Frage, was als Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) bezeichnet wird. Für Biomasse wurde diese Technik im Rahmen von EU-Forschungs- und Demonstrationsprojekten bis zur Schwelle der Markteinführung entwickelt. In Schweden existiert eine Demonstrationsanlage, welche über mehrere Jahre während rund 10'000 Stunden mit verschiedenen Biomasse-Brennstoffen betrieben wurde (Bild 2.2). Von diesen Erfahrungen liegen Daten über Wirkungsgrade und Investitionskosten zu einer Anlagengrösse von rund 6 MWe und 18 MW Brennstoffleistung vor.

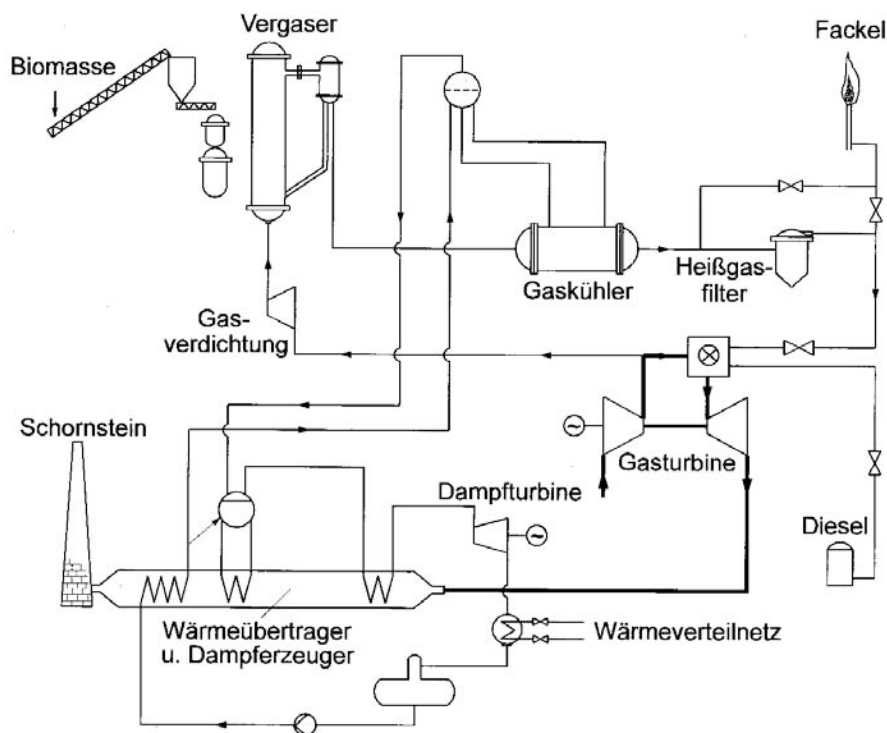


Bild 2.1 Prinzip eines Holzgas-Kombikraftwerks (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle). Der Aufbau zeigt eine Anlage mit Druckvergasung in einer zirkulierenden Wirbelschicht der Demonstrationsanlage in Värnamo (Schweden) mit folgenden Betriebsdaten: Vergasungsdruck: 20 bis 25 bar, elektrische Leistung 6 MWe, davon Gasturbine 4 MWe und Dampfturbine 2 MWe, Fernwärmeauskopplung maximal 9 MW, elektrischer Wirkungsgrad 32% bis 37%. Quellen: [Hofbauer & Kaltschmitt 2001, Stahl & Nehrgard 1996 und 1998, Stahl et al. 2004].

Im Leistungsbereich der Demonstrationsanlage stehen allerdings keine Kraftwerkskomponenten zur Verfügung, sondern zum Beispiel aus dem Flugzeugbau adaptierte Gasturbinen. Für eine Kommerzialisierung dieser Technologie wird wegen der mit der Anlagengrösse zunehmenden Wirkungsgrade und sinkenden spezifischen Investitionskosten eine Mindestgrösse von rund 100 MW zugeführter Leistung entsprechend rund 40 MWe vorgeschlagen. Kombikraftanlagen weisen allerdings bei einer weiteren Steigerung der Leistung um einen Faktor 5 bis 10 ein nochmaliges Potenzial zur Verbesserung des Wirkungsgrads und der Wirtschaftlichkeit auf. Für den Einsatz von Biomasse, welche im Vergleich zu fossilen Energieträgern eine deutlich geringere Energiedichte aufweist, führt allerdings eine Beschränkung der Transportdistanzen und der regional verfügbaren Biomasse zum Wunsch nach limitierten Anlagengrössen. Insbesondere zum Aufbau der Versorgung ist zudem vorteilhaft, wenn ein Holzkraftwerk nicht auf das gesamte Holzpotenzial ausgelegt wird, sondern zumindest in einer Übergangszeit erst ein Teil des Potenzials erschlossen wird.

Obwohl Produktgas aus der Vergasung unterschiedliche Eigenschaften wie Erdgas aufweist, unterscheiden sich Erdgas und gereinigtes Holzgas nur geringfügig im Hinblick auf ihre Eigenschaften als Gasturbinen-Brennstoff. Aus diesem Grund bietet die Kombination eines Holzgaskraftwerks mit einem Erdgaskraftwerk interessante Möglichkeiten im Hinblick auf eine teilweise erneuerbare Stromproduktion mit bis anhin unerreichtem Wirkungsgrad. Aus Erfahrungen von anderen Anlagen mit kombinierter Nutzung von fossilen Brennstoffen und Biomasse wird vorgeschlagen, dass Holz etwa 20% der Gesamtleistung decken soll. Eine deutlich geringere Holzleistung verursacht unverhältnismässig hohe Kosten für den Holzteil des Kraftwerks. Ein wesentlich höherer Anteil Holz ist technisch denkbar, sollte jedoch nicht zu Gunsten der Anlagengrösse eingegangen werden, da dadurch der Grössenvorteil nicht mehr ausgenutzt werden kann. Dagegen ist nach Möglichkeit auch eine spätere Erhöhung der Biomasseleistung durch Ausbau der Vergasungskapazität denkbar.

Zur kombinierten Nutzung von Holzgas und Erdgas in einem Kombikraftwerk kommen zwei Konzepte in Frage. Gereinigtes Holzgas und Erdgas können entweder in einer einzigen Gasturbine genutzt oder in auf beide Brennstoffe je separat ausgelegten Gasturbinen eingesetzt werden, welche einen gemeinsamen Dampfkraftteil aufweisen. Die definitive Wahl des Konzepts setzt eine ökonomische Optimierung voraus und sie kann durch Fragen der Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit beeinflusst werden. In der vorliegenden Konzeptstudie wird diese Unterscheidung nicht weiter berücksichtigt, sondern vorab das in Bild 2.2 gezeigte Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes und gemeinsamer Gasturbine für Holzgas und Erdgas vorausgesetzt.

In der vorliegenden Studie wird vorerst nur das Potenzial an Energieholz berücksichtigt, da Holz als Brennstoff zur Vergasung grundsätzlich geeignet ist, während für andere biogene Brennstoffe Einschränkungen zu berücksichtigen sind. Im Weiteren wird nicht unterschieden, ob Erdgas und Holzgas in der gleichen Gasturbine oder in zwei separaten Gasturbinen genutzt werden, da dies für die Potenzialabschätzung unerheblich ist. Zudem wird vorausgesetzt, dass der Holzbrennstoff durch Kraftwerksabwärme getrocknet wird, da für den Betrieb der Vergasungsanlage trockenes Holz erforderlich ist. Aus diesem Grund wird vorerst keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Energieholzsortimenten durchgeführt. Weil im Falle eines Kraftwerksbetriebs zudem selbst bei Ausführung mit Wärmeauskopplung ein wärmegeführter Betrieb nicht als realistisch angesehen wird, werden die Abwärmennutzung nicht bewertet. Im Weiteren werden die Wirkungsgradangaben wie im deutschen Sprachraum



üblich auf den Heizwert des getrockneten Brennstoffs bezogen, obwohl die Nachteile der Verwendung feuchter Brennstoffe dadurch gerade nicht erfasst werden und ein Bezug auf Brennwert physikalisch sinnvoller wäre.

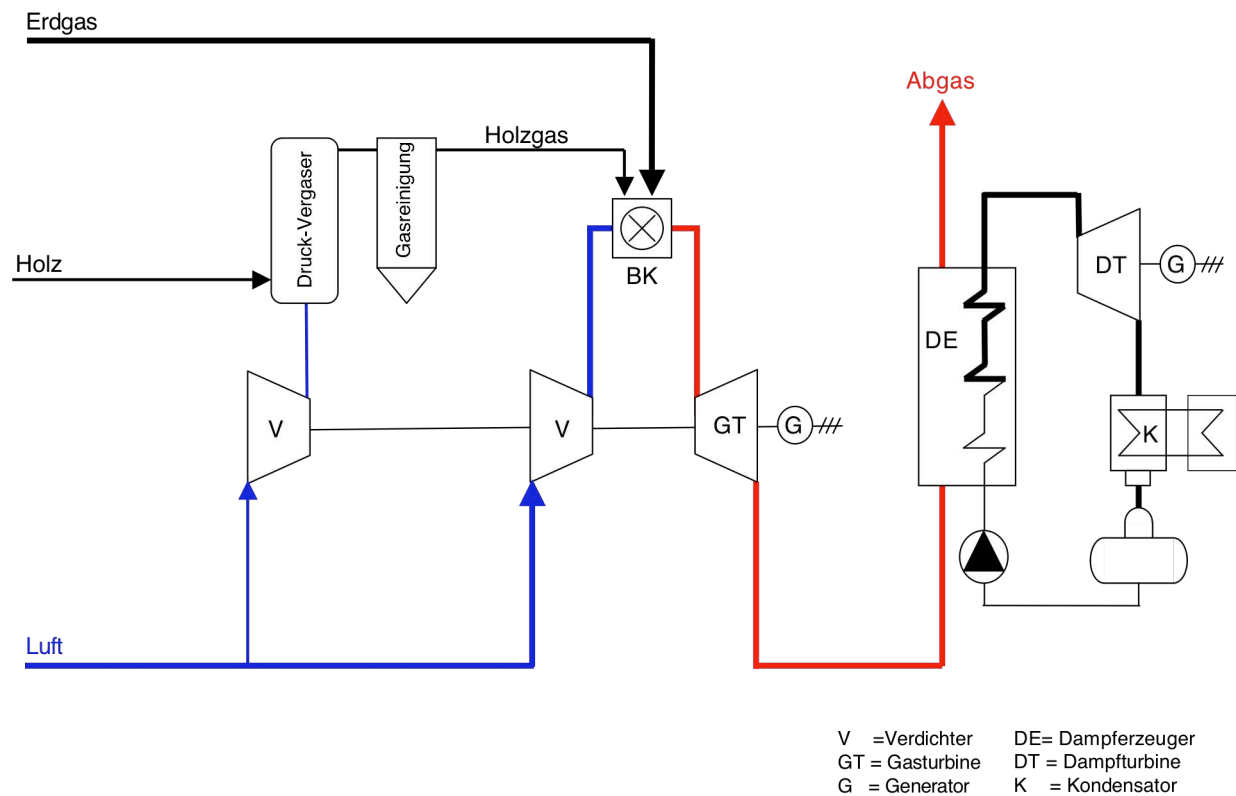


Bild 2.2 Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes in einer zirkulierenden Wirbelschicht und Nutzung des gereinigten Holzgases in der Gasturbinenbrennkammer zusammen mit Erdgas.

## 2.2 Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Konzeptstudie ist eine Abschätzung des Potenzials zur Nutzung von Energieholz in einem Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk in der Schweiz sowie eine Grobschätzung der Wirtschaftlichkeit, welche als Basis zur Entscheidung dient, ob das Konzept weiter verfolgt werden soll. Die Studie dient als Input-Papier für die Stromangebots-Perspektiven bis zum Jahr 2035 des Bundesamts für Energie.

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Szenarien des Bundes zu ermöglichen, werden für die Wirtschaftlichkeitsberechnung die Annahmen für volkswirtschaftliche Perspektiven des Bundesamts für Energie wie folgt eingesetzt: Der Betrieb von Kombikraftwerken mit Gas- und Dampfturbine erfolgt mit 6'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr, die Abschreibungsdauer des Kraftwerks beträgt 30 Jahre und die Kapitalverzinsung erfolgt mit 2,5% pro Jahr.

## 3 Potenzial

### 3.1 Biomasseanfall in der Schweiz

Die Fläche der Schweiz beträgt 4'128'442 ha oder 41'284 Quadratkilometer [Swisstopo 2003] mit folgender Aufteilung der Nutzungsart:

Wald 25,5 %, Landwirtschaft 48,9 %, Wasser 3,7 %, Sonstige 21,9 %.

Die Nord-Süd-Ausdehnung beträgt 221 km, die Ost-West-Ausdehnung 349 km.

Wenn die Schweiz vereinfachend durch eine Kreisfläche mit gleichmässig verteiltem Anfall an Holz und Biomasse beschrieben wird, beträgt der entsprechende Durchmesser 229 km. Für eine Quadratfläche ergibt sich eine Kantenlänge von 203 km. Die Beschreibung als Quadrat führt zu einer Unterschätzung der (Transport)-Distanzen, während die Distanzen als Luftlinien für einen Kreis in der Größenordnung korrekt abgeschätzt werden. Die realen Transportdistanzen auf der Strasse sind entsprechend länger, was vereinfachend mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt wird.

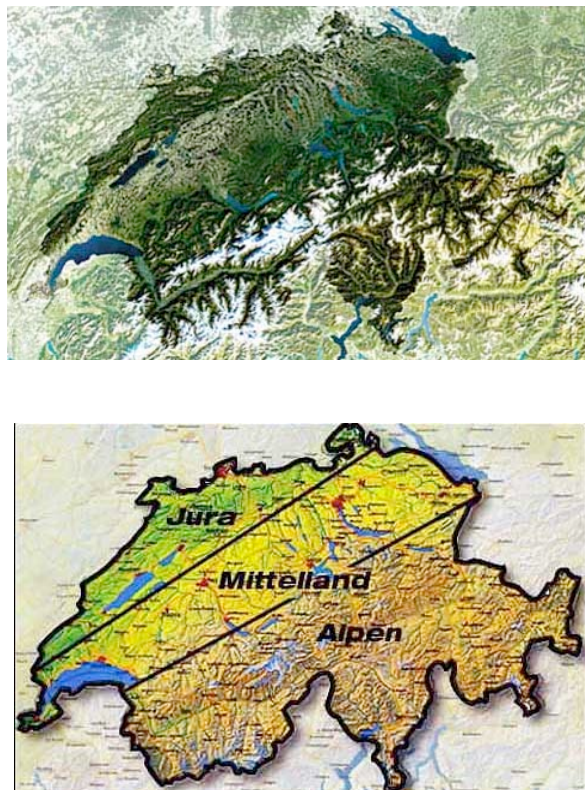


Bild 3.3 Die Schweiz in einer Satellitenaufnahme und nach Regionen [Swissworld 2005].

## 3.2 Energieholzpotenzial

Das Energieholzpotenzial der Schweiz umfasst Waldholz, Restholz und Altholz. Waldholz und Restholz sind nur begrenzt mit Schadstoffen belastet und setzen vergleichbare Techniken zur Aufbereitung und Nutzung voraus. Zur Abschätzung des Energiepotenzials werden deshalb Waldholz und Restholz zusammen gefasst. Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit sind die beiden Brennstoffsortimente dagegen zu unterscheiden, weil zur Bereitstellung von zusätzlichem, heute nicht genutztem Waldholz eine kostendeckende Sammlung und Aufbereitung vorausgesetzt werden muss. Restholz kann dagegen teilweise zu günstigeren Konditionen beschafft werden, da es in den Holz verarbeitenden Betrieben zum Teil im Überfluss anfällt. Altholz ist charakterisiert durch die Belastung mit Fremdteilen, Schwermetallen, organisch gebundenem Chlor (PVC) und weiteren Schadstoffen, weshalb bei der Aufbereitung und thermischen Verwertung höhere Anforderungen einzuhalten sind und Altholz deshalb als separate Brennstoffkategorie bewertet wird.

Zum Energieholzpotenzial liegen einerseits Erhebungen aus der Branche von Holzenergie Schweiz und von QM Holzheizwerke vor. Zum anderen wurde vor kurzem eine Studie über die gesamten Biomassepotenziale der Schweiz erarbeitet, bei der die auf der Landesfläche nachwachsenden Biomasse mengen abgeschätzt wurden (Studie von Infras et al. im Auftrag des Bundesamts für Energie [Oettli et al. 2004]). Tabelle 3.1 zeigt eine Gegenüberstellung beider Potenzialabschätzungen sowie der genutzten Holzmengen im Jahr 2002. Auf Grund der beiden Schätzungen wird für die vorliegende Studie ein mittleres Potenzial angenommen.

Im folgenden wird die Differenz von „Potenzial Studie Gaskraftwerk“ und der aktuellen Energieholznutzung („Nutzung 2002“) gebildet. Dies entspricht dem heute nicht genutzten Zusatz-Potenzial, welches in der Folge zur Stromerzeugung bewertet wird.

Tabelle 3.1 Energieholznutzung und Energieholzpotenzial der Schweiz. Daten nach [Holzenergie Schweiz 2005], QM Holzheizwerke 2004 [Good et al. 2004] sowie Potenzial nach Öko-Szenario 2040 gemäss Infrac-Studie [Oettli et al. 2004]. Die Daten von Holzenergie Schweiz basieren auf der Holzenergiestatistik 2004 [Primas & Kessler 2004]. Die Angabe zum Gesamtenergieverbrauch (GEV) basiert auf der Gesamtenergiestatistik [Bundesamt für Energie 2004].

Als Basis für die vorliegende Studie wird das Mittel aus dem „Potenzial QM“ und dem „Potenzial Infrac“ angenommen und in der Tabelle als „Potenzial Studie Gaskraftwerk“ bezeichnet. Gegenüber dem von Infrac ausgewiesenen, ökologisch nutzbaren Potenzial im Jahr 2040 ist damit noch eine erhebliche Reserve unberücksichtigt. Das in der letzten Spalte aufgeführte „Zusatz-Potenzial Studie Gaskraftwerk“ beschreibt die Differenz zwischen „Potenzial Studie Gaskraftwerk“ und „Nutzung 2002“ und dient als Basis für alle folgenden Berechnungen.

Annahme Energieinhalt von Holz im Mittel: 8,64 PJ = 2'400 GWh/Mio m<sup>3</sup>. 1 PJ (Petajoule) = 10<sup>15</sup> J. Eingabedaten aus Literatur rot, daraus berechnete Daten blau.

|                 | <b>Nutzung<br/>2002</b>    |             | <b>Potenzial<br/>QM</b> |             | <b>Potenzial<br/>Infrac</b> |             | <b>Potenzial<br/>Studie Gaskraftwerk</b> |             |               | <b>Zusatz-Potenzial<br/>Studie Gaskraftwerk</b> |             |              |
|-----------------|----------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|--|-------------|---------------|---|-------------|--------------|
|                 | [Holzenergie Schweiz 2005] |             | [Good et al. 2004]      |             | [Oettli et al. 2004]        |             | [Diese Studie]                           |             |               | [Diese Studie]                                  |             |              |
|                 | Mio m <sup>3</sup> /a      | PJ/a        | Mio m <sup>3</sup> /a   | PJ/a        | Mio m <sup>3</sup> /a       | 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        | 2.5                     | 21.6        | 5.7                         | 49.0        | 4.1                                      | 35.3        | 9 806         | 2.9   | 24.9        | 6 926        |
| Restholz        | 1.1                        | 9.5         | 1.8                     | 15.6        | 0.6                         | 5.0         | 1.2                                      | 10.3        | 2 854         | 0.1   | 0.8         | 214          |
| Altholz         | 0.3                        | 2.6         | 0.7                     | 6.0         | 0.9                         | 8.0         | 0.8                                      | 7.0         | 1 951         | 0.5   | 4.4         | 1 231        |
| <b>Holz</b>     | <b>2.6</b>                 | <b>22.5</b> | <b>5.0</b>              | <b>43.2</b> | <b>7.2</b>                  | <b>62.0</b> | <b>6.1</b>                               | <b>52.6</b> | <b>14 611</b> | <b>3.5</b>                                      | <b>30.1</b> | <b>8 371</b> |
| Andere Biomasse |                            | 23.2        |                         | 35.0        |                             | 65.0        |  | 50.0        | 13 893        |   | 26.8        | 7 443        |
| Total Biomasse  |                            | 45.7        |                         | 78.2        |                             | 127.0       |  | 102.6       | 28 504        |   | 56.9        | 15 814       |
| GEV 2004        |                            | 873         |                         |             |                             |             |  | 242 500     |               |   |             |              |

### 3.3 Leistungspotenzial für Holzkraftwerke

Das in der Schweiz verfügbare Zusatz-Potenzial an heute noch nicht genutztem Holz entspricht der in Tabelle 3.2 ausgewiesenen zugeführten Leistung in Form von Heizwert für ein Kraftwerk mit 6'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr. Der Anteil Zusatz-Potenzial beschreibt dabei den effektiv durch ein Kraftwerk der erwähnten Grösse genutzten Anteil. Wenn also zum Beispiel ein Kraftwerk mit 349 MW zugeführter Leistung realisiert wird, so muss zu dessen Versorgung ein Viertel des in der Schweiz bis anhin ungenutzten Holzes eingesetzt werden.

Tabelle 3.2 Leistungspotenzial (Endenergie = bei Kraftwerk als Heizwert zugeführte Leistung) an heute noch nicht genutztem Energieholz der Schweiz bei Betrieb von 1 bis 64 Holzgas-Kombikraftwerken mit 6'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr.

| Anzahl Kraftwerke       |    | 1    | 2   | 4   | 8     | 16   | 32   | 64   |
|-------------------------|----|------|-----|-----|-------|------|------|------|
| Anteil Zusatz-Potenzial |    | 100% | 50% | 25% | 12,5% | 6,3% | 3,1% | 1,6% |
| Waldholz                | MW | 1154 | 577 | 289 | 144   | 72   | 36   | 18   |
| Restholz                | MW | 36   | 18  | 9   | 4     | 2    | 1    | 1    |
| Altholz                 | MW | 205  | 103 | 51  | 26    | 13   | 6    | 3    |
| Total je Anlage         | MW | 1395 | 698 | 349 | 174   | 87   | 44   | 22   |

Sofern dieses Energieholz in Holzgas-Kombikraftwerken genutzt wird, kann damit folgende elektrische Nutzleistung während 6'000 Stunden pro Jahr erzeugt werden (wobei die Wirkungsgrade gemäss Kapitel 5.3 und für die maximale Leistung somit rund 45% Wirkungsgrad angenommen sind):

Tabelle 3.3 Leistungspotenzial an heute noch nicht genutztem Energieholz der Schweiz bei Betrieb von 1 bis 64 Holzgas-Kombikraftwerken mit 6'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr.

| Anzahl Kraftwerke       |                 | 1    | 2   | 4   | 8     | 16   | 32   | 64   |
|-------------------------|-----------------|------|-----|-----|-------|------|------|------|
| Anteil Zusatz-Potenzial |                 | 100% | 50% | 25% | 12,5% | 6,3% | 3,1% | 1,6% |
| Waldholz                | MW <sub>e</sub> | 519  | 249 | 121 | 59    | 29   | 14   | 7    |
| Restholz                | MW <sub>e</sub> | 16   | 8   | 4   | 2     | 1    | 0    | 0    |
| Altholz                 | MW <sub>e</sub> | 92   | 44  | 21  | 10    | 5    | 3    | 1    |
| Total je Anlage         | MW <sub>e</sub> | 628  | 301 | 146 | 71    | 35   | 17   | 8    |
| Total aller Anlagen     | MW <sub>e</sub> | 628  | 603 | 583 | 568   | 555  | 546  | 538  |

Da der elektrische Wirkungsgrad von der Anlagengrösse abhängt, nimmt das Total der Nutzleistung mit zunehmender Anzahl Kraftwerke ab. Aus energetischer Sicht empfiehlt sich daher eine möglichst geringe Anzahl Kraftwerke mit möglichst grosser Leistung. Die maximale Wertschöpfung wird in einem einzigen Kraftwerk erzielt. Allerdings muss nebst dem Kraftwerkswirkungsgrad auch der Transportenergieaufwand berücksichtigt werden, was nachfolgend diskutiert wird.

### 3.4 Stromerzeugungspotenzial aus Zusatz-Holz

Bei Nutzung in einem Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk weist das noch nicht genutzte Energieholz ein Stromerzeugungspotenzial von rund 3'766 GWh pro Jahr auf (Tabelle 3.4). Wenn das Energieholz auf zwei Anlagen verteilt wird, sinkt das Stromerzeugungspotenzial infolge der geringeren Anlagenwirkungsgrade um 4% auf 3'618 GWh pro Jahr ab. Bei einer Aufteilung auf vier Anlagen beträgt die Einbusse 7%, während bei vier Anlagen bereits 10% der Elektrizitätsproduktion durch höhere Verluste aufgezehrt werden. Bild 3.4 zeigt das Stromerzeugungspotenzial in Abhängigkeit der Kraftwerksleistung und der zugehörigen Anzahl Kraftwerke für die Schweiz.

Tabelle 3.4 Stromerzeugungspotenzial aus heute noch nicht genutztem Energieholz der Schweiz bei Betrieb von 1 bis 64 Holzgas-Kombikraftwerken mit 6'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr.

| Anzahl Kraftwerke   |       | 1    | 2    | 4    | 8    | 16   | 32   | 64   |
|---------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Waldholz            | GWh/a | 3116 | 1497 | 724  | 352  | 172  | 85   | 42   |
| Restholz            | GWh/a | 96   | 46   | 22   | 11   | 5    | 3    | 1    |
| Altholz             | GWh/a | 554  | 266  | 129  | 63   | 31   | 15   | 7    |
| Total je Anlage     | GWh/a | 3766 | 1809 | 875  | 426  | 208  | 102  | 50   |
| Total aller Anlagen | GWh/a | 3766 | 3618 | 3500 | 3407 | 3333 | 3274 | 3227 |

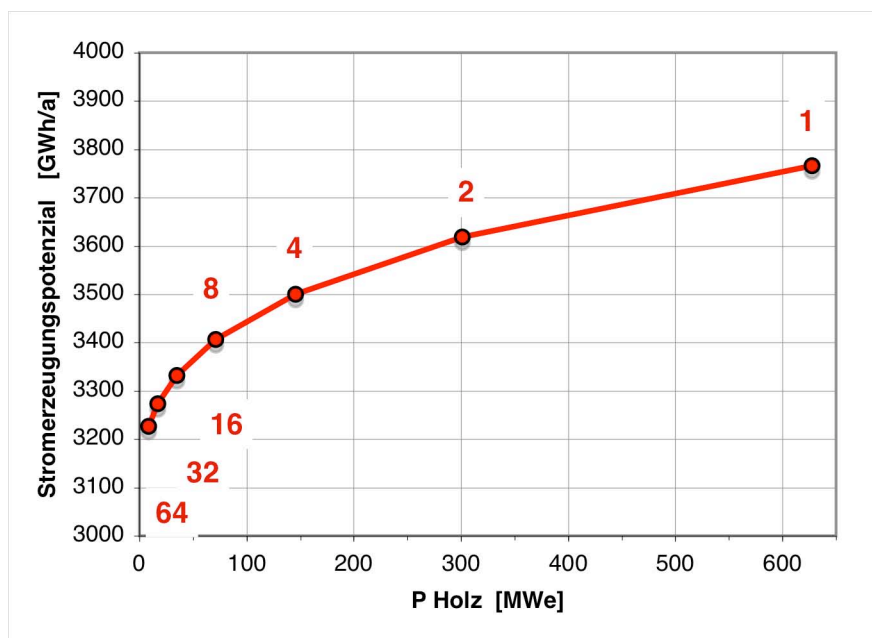


Bild 3.4 Stromerzeugungspotenzial bei Verwertung des heute noch nicht genutzten Energieholzes zur Stromerzeugung in Holzgas-Erdgas-Kombikraftwerken in Funktion der Kraftwerksleistung. Die Zahlen im Diagramm bezeichnen die Anzahl Kraftwerke in der Schweiz. Mit zunehmender Leistung sinkt die Anzahl Kraftwerke, während die Stromproduktion als Folge des höheren Wirkungsgrads ansteigt.

## 4 Annahmen

### 4.1 Wirkungsgrad

Über den Wirkungsgrad und die Investitionskosten von Holzgas-Kombikraftwerken liegen Angaben aus der Literatur vor, welche sich unter anderem auf die Demonstrationsanlage in Schweden abstützen. Für mit Biomasse betriebene Anlagen liegen vor allem Daten über vergleichsweise kleine Leistungen vor, während zu Grossanlagen auch Vergleichswerte von fossilen Kraftwerken mit Kohlevergasung vorliegen. Anhand dieser Daten werden für die vorliegende Studie realistische Wirkungsgrad- und Investitionskosten angenommen. Ausgewählte Quellen sind: [Abboud 2005, Bridgwater 2004, Cameron et al. 2004, Craig & Mann 1996, ECG 2004, Rensfelt 2002, Stahl & Neergard 1996 und 1998, Stahl et al. 2004, Stuber 2005, Tiangco et al. 2005]. Nachfolgend sind einige ausgewählte Daten aus den zitierten Quellen illustriert, anhand derer die Wirkungsgrade und Investitionskosten abgeschätzt werden. Die Kostenangaben wurden von USD, EUR und SEK auf CHF umgerechnet, wobei die Umrechnungskurse zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Daten berücksichtigt wurden.

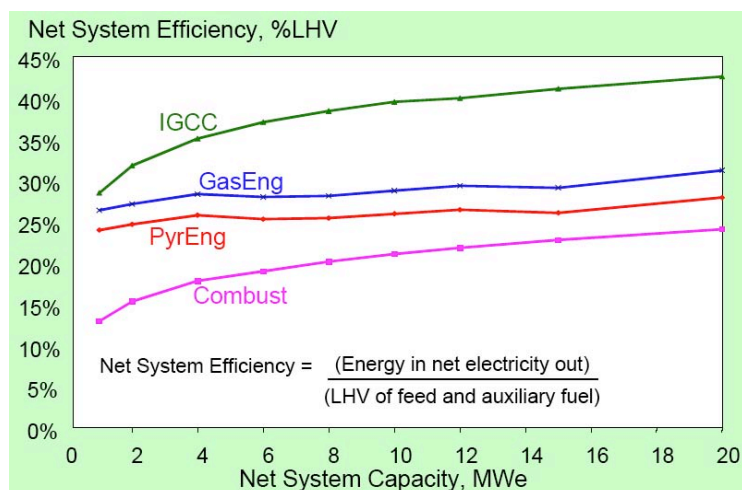


Bild 4.5 Wirkungsgrad von Holzgas-Kombikraftwerken (IGCC) nach [Bridgwater 2004].

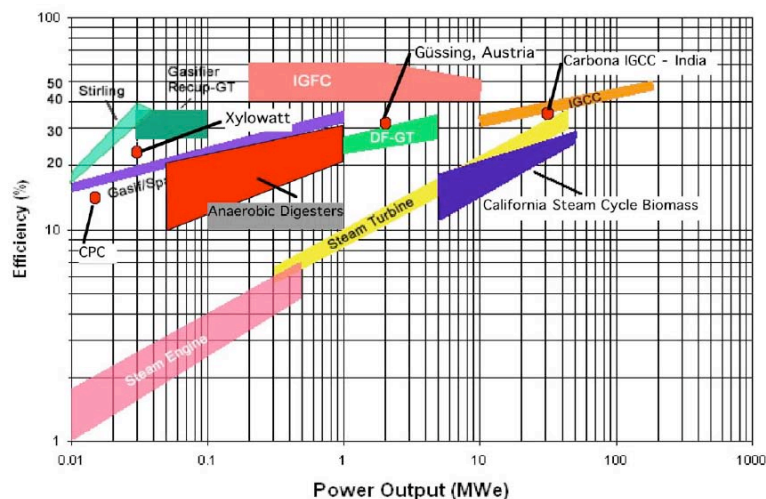


Bild 4.6 Wirkungsgrad von Holzgas-Kombikraftwerken (IGCC) nach [Tiangco 2005].



## 4.2 Investitionskosten

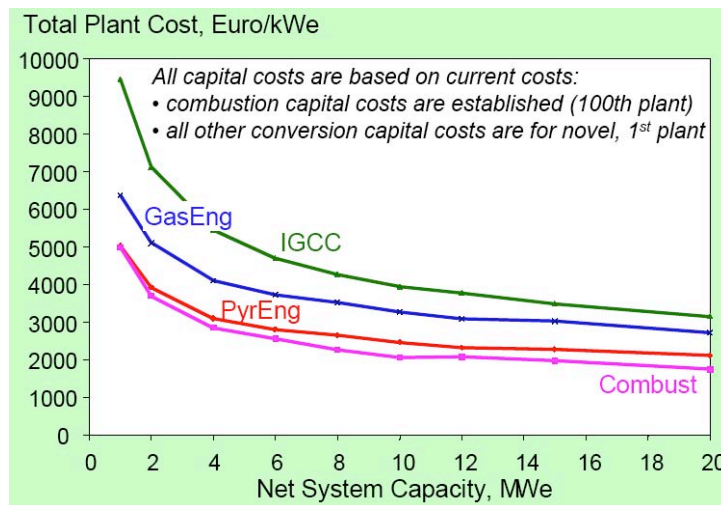


Bild 4.7 Investitionskosten von Holzgas-Kombikraftwerken (IGCC) nach [Bridgwater 2004].

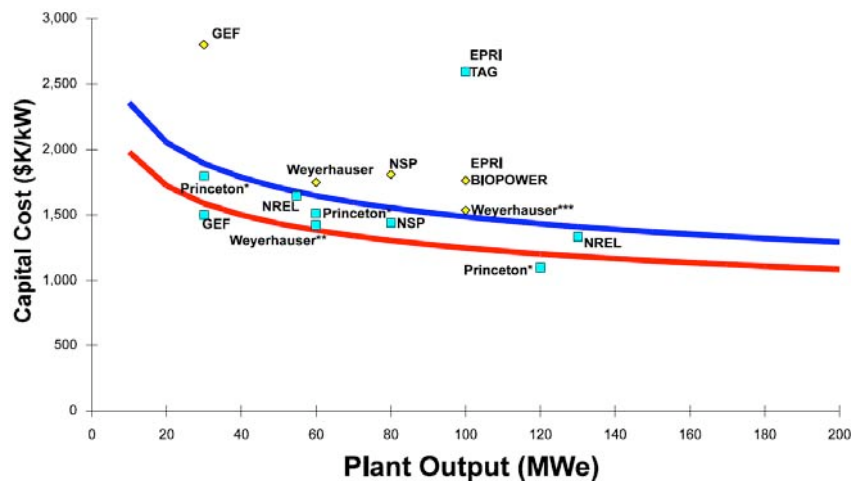


Bild 4.8 Investitionskosten von Holzgas-Kombikraftwerken (IGCC) nach [Craig & Mann 1996].

## 4.3 Transportdistanz

Zur Bestimmung der Transportdistanz (TD) wird angenommen, dass die Energieholzsortimente gleichmässig über die Landesfläche verteilt sind. Für den Transport wird die Schweiz zudem durch eine Kreisfläche mit Radius  $R$  und Durchmesser  $D$  approximiert. Die mittlere Distanz als Luftlinie beträgt dabei zwei Drittel des betrachteten Radius. Für den Landweg wird eine um 50% längere Fahrdistanz angenommen, was einem Korrekturfaktor von 1,5 entspricht, so dass die mittlere Fahrdistanz in eine Richtung gerade dem Radius entspricht. Im Weiteren wird eine leere Rückfahrt angenommen, so dass die effektive Fahrdistanz dem Kreisdurchmesser entspricht. Somit gilt die Annahme  $TD = D = 2R$ .



## 4.4 Kapital-, Brennstoff- und Betriebskosten

Die Stromgestehungskosten werden mit der Annuitätenmethode abgeschätzt. Als Standardfall für Kapitalkosten, Betriebsdauer des Kraftwerks und Brennstoffpreise gelten die Bedingungen nach Tabelle 4.1. Für den Kraftwerksteil werden dabei die in der Zielsetzung erwähnten Annahmen für die Stromangebots-Perspektiven des Bundesamts für Energie eingesetzt, nämlich eine Abschreibungsdauer von 30 Jahren, ein Kapitalzins von 2,5% pro Jahr sowie ein Betrieb mit 6'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr. Für den Transport werden der gleiche Kapitalzins, jedoch eine für Fahrzeuge realistischere Abschreibungsdauer von 10 Jahren eingesetzt.

Tabelle 4.1 Annahmen für den Referenzfall.

|                    | Kraftwerk |                      | LKW     |       |
|--------------------|-----------|----------------------|---------|-------|
| Abschreibungsdauer | 30        | a                    | 10      | a     |
| Kapitalzinssatz    | 2.5       | % / a                | 2.5     | % / a |
| → Annuität         | 0.04778   | –                    | 0.11426 | –     |
| Anteil Holz        | 20%       | von $P_{\text{tot}}$ |         |       |
| Betriebsdauer      | 6'000     | h / a                |         |       |

|          | Preis<br>p<br>Rp./kWh | Investition<br>I<br>[–] x I | Betrieb<br>fix<br>[CHF/a] | Betrieb<br>var<br>[% I / a] | Transport<br>fix<br>[CHF/Fahrt] | Transport<br>var<br>[Rp./km] |
|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Erdgas   | 7.00                  | 1 (Gas)                     | 100'000                   | 1.0%                        | 0                               | 0                            |
| Waldholz | 5.00                  | 1 (Holz)                    | 500'000                   | 2.5%                        | 100                             | 249                          |
| Restholz | 4.00                  | 1                           | 500'000                   | 2.5%                        | 100                             | 249                          |
| Altholz  | 2.00                  | 1.1                         | 1'000'000                 | 5.0%                        | 100                             | 249                          |

Erläuterungen zu Tabelle 4.1:

#### *Abschreibungsdauer und Kapitalzins Kraftwerk*

Annahmen für Stromangebots-Perspektiven 2035 des Bundesamts für Energie

#### *Brennstoffpreise*

Die angegebenen Brennstoffpreise orientieren sich an der heutigen Situation, wobei einige Anpassungen vorgenommen sind. Es wird vorausgesetzt, dass sich der Erdgaspreis dem Ölpreis anpassen wird und mittelfristig mindestens 40% mehr als der Preis für Waldholz betragen wird. Waldholz ist derzeit im Mittel für rund 4 bis 4,5 Rp./kWh verfügbar. Wenn allerdings das noch nicht genutzte Potenzial aus dem Wald erschlossen werden soll, muss dazu mindestens eine kostendeckende Beschaffung möglich sein, weshalb mit rund 10% höheren Preisen gerechnet wird. Restholz ist derzeit typischerweise ab 2 Rp./kWh verfügbar. Um jedoch langfristig die entsprechenden Mengen sicher zu stellen, ist mit einem höheren Preis zu rechnen, welcher sich knapp dem Waldholzpreis anpassen wird. Altholz ist derzeit weitgehend zum Nulltarif franko Anlage verfügbar. Allerdings ist auch hier davon auszugehen, dass Altholz bei einer entsprechenden Nachfrage einen relevanten Preis über Null erzielen wird, wie dies zum Beispiel in Deutschland nach Realisierung von Altholzkraftwerken eingetreten ist. Wegen des höheren Bearbeitungsaufwands wird Altholz allerdings auch langfristig deutlich günstiger als Waldholz verfügbar sein.

#### *Betriebsaufwand*

Für den Betrieb eines Holzkraftwerks wird ein Mindestbestand von fünf Bedienungspersonen vorausgesetzt, was mit einem fixen Betriebskostenaufwand berücksichtigt ist. Im Weiteren wird ein variabler Kostensatz in Abhängigkeit des Investitionsvolumens vorausgesetzt. Da Altholz aufwändiger zu verarbeiten ist, werden für Altholz höhere Kostensätze angenommen. Ebenso wird für Altholz eine um 10% teurere Anlage vorausgesetzt.

#### *Transportkosten*

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird der Einsatz von auf Hackschnitzel ausgelegten Lastwagen mit Schubboden und einer Ladekapazität von 80 Kubikmeter vorausgesetzt.

Dieselpreis CHF 1,75 pro Liter, Verbrauch 40 Liter pro 100 Kilometer, Kosten LKW CHF 400'000.–, Fahrzeit 1'800 Stunden pro Jahr, mittlere Geschwindigkeit (da vergleichsweise lange Distanzen) 50 km/h, Lohnkosten Chauffeur CHF 100'000.– pro Jahr, Service und Unterhalt CHF 12'000.– pro Jahr. Mit den in der Tabelle aufgeführten Annahmen für die Annuität ergibt dies Kilometerkosten von CHF 2,49. Um den vor allem bei kurzen Distanzen entscheidenden Zeitaufwand für die Beladung zu berücksichtigen, wird eine zusätzliche Pauschale von CHF 100.– für jeden ausgeführten Transport berechnet. Mit den geschilderten Annahmen kann die Brennstoffversorgung somit durch den Kraftwerksbetreiber oder durch Beizug von externen Transportfirmen sichergestellt werden.

Zur Abschätzung des Transportenergieverbrauchs wird als Variante der Einsatz von heute in der Schweiz üblichen Lastwagen mit Container mit 34 Kubikmeter Ladevolumen aufgezeigt. Diese Variante dient allerdings lediglich zur Veranschaulichung des Einflusses der Ladekapazität, da bei einem kommerziellen Kraftwerksbetrieb der Einsatz von auf den spezifischen Verwendungszweck ausgelegten Fahrzeugen vorausgesetzt werden kann. Für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung wird die Variante der kleineren Ladekapazität deshalb nicht untersucht.

## 5 Resultate

### 5.1 Gültigkeitsbereich und Genauigkeit

Da sich ein Teil der Kostenerhebungen auf bis heute nicht grosstechnisch realisierte Anlagen bezieht, sind sämtliche Angaben mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet. Zudem beziehen sich die Kostenangaben auf internationale Erfahrungen, weshalb allfällige nationale oder regionale Besonderheiten nicht berücksichtigt sind. Auf Grund der heute verfügbaren Anlagekomponenten und der Erfahrungen mit thermischen Kraftwerken wird zudem die Realisierung von Kombikraftwerken für Holzgas, Holzgas/Erdgas oder Erdgas erst ab Leistungen von mindestens 20 bis 50 MWe als realistisch bewertet. Für kleinere Leistungen erfolgt in der vorliegenden Studie eine zum Teil extrapolierte Bewertung von Kosten und Wirkungsgraden, weshalb alle Angaben für Leistungen unter 10 MWe nur qualitativen Charakter haben und zur Illustration des Einflusses der Leistungsgrösse dienen.

### 5.2 Transportdistanz und Transportaufwand

Die Transportdistanz nimmt mit zunehmender Anlagengrösse zu, steigt jedoch gemäss Bild 5.9 wegen der quadratisch wachsenden Fläche nur mit der Wurzel der Anlagenleistung. Wenn sämtliches zusätzlich verfügbares Energieholz in einem Holzkraftwerk eingesetzt wird, kann gemäss Tabelle 3.3 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 geringfügig längere Transportdistanzen. Wird dagegen eine Anlage allein auf Altholz ausgelegt, so ergeben sich erheblich rund zweieinhalb Mal so lange Transportdistanzen.

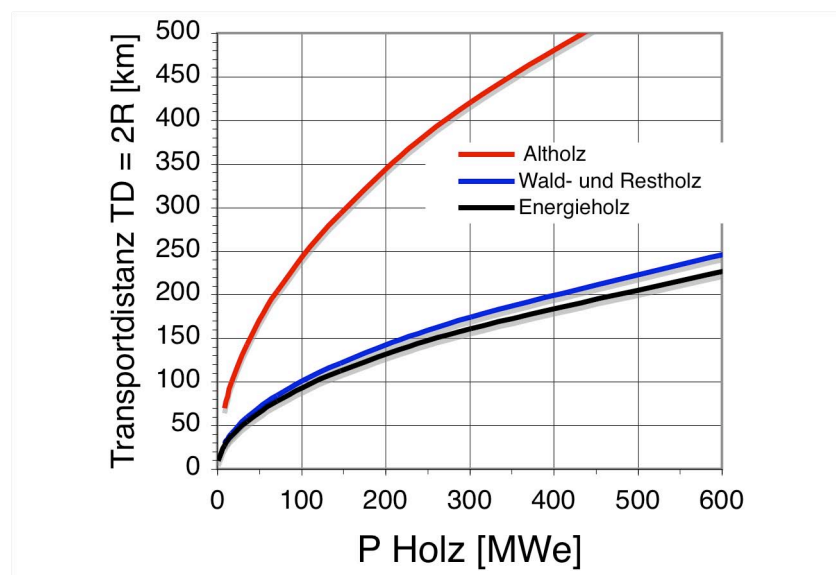


Bild 5.9 Mittlere Transportdistanz für die Energieholzdichte der Schweiz in Abhängigkeit der Holzkraftwerksleistung für folgende drei Szenarien:  
1. „Energieholz“ = Betrieb des Kraftwerks mit sämtlichem zusätzlich verfügbaren Energieholz, d.h. Waldholz, Restholz und Altholz,  
2. „Wald- und Restholz“ = Betrieb des Kraftwerks nur mit Wald- und Restholz,  
3. „Altholz“ = Betrieb des Kraftwerks nur mit Altholz.

Zur Beurteilung des Einflusses des Transportaufwands ist in Bild 5.10 ein „Netto-Wirkungsgrad“ unter Berücksichtigung des Treibstoffverbrauchs für den Transport auf der Strasse ausgewiesen. Bei einem teilweisen Bahntransport ist somit ein geringerer Transportenergieaufwand möglich. Für den LKW ist ein Dieselverbrauch von 40 Liter pro 100 km angenommen und Diesel ist zur Berücksichtigung der grauen Energie zudem mit einem Faktor 1,25 bewertet [Kasser et al. 1999]. Die Verhältnisse gelten für die Versorgungsdichte an zusätzlich verfügbarem Energieholz in der Schweiz, also Waldholz, Restholz und Altholz. Wenn das Kraftwerk nur mit Wald- und Restholz betrieben wird, sinken die Netto-Wirkungsgrade geringfügig, jedoch in der Grafik nicht wahrnehmbar ab. Für ein lediglich mit Altholz betriebenes Kraftwerk sinken die Netto-Wirkungsgrade dagegen erheblich ab, weil Altholz nur einen geringen Anteil des gesamten Energieholzes ausmacht, wie aus Bild 5.9 hervorgeht.

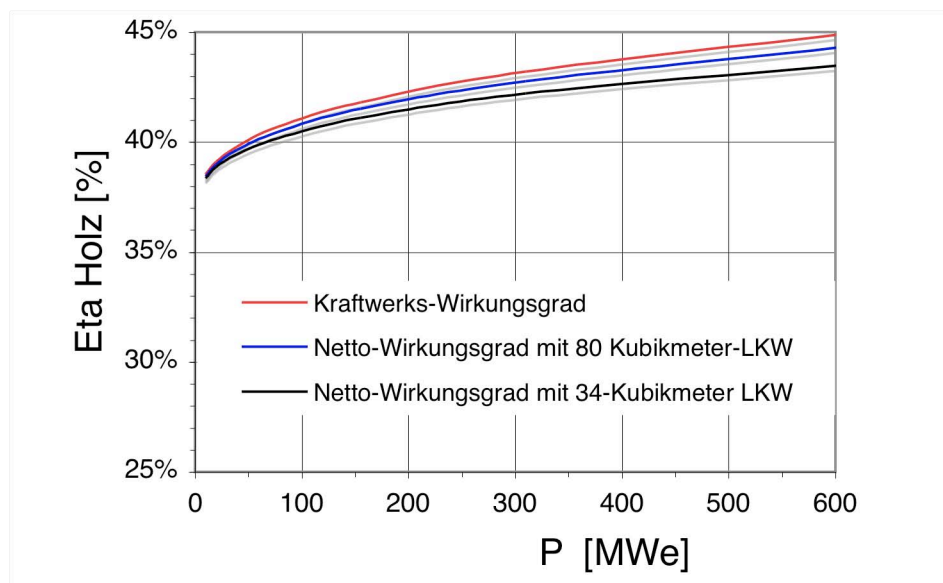


Bild 5.10 Wirkungsgrad eines Holzgas-Kombikraftwerks in Funktion der elektrischen Leistung sowie Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung des Transportenergieaufwands des Holzes mit 80 Kubikmeter LKW (LKW mit Schubboden) und mit 34 Kubikmeter LKW (LKW mit Container).

## 5.3 Wirkungsgrad Holz

Für ein reines Holzgas-Kombikraftwerk wird ein Wirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert des getrockneten Brennstoffs) gemäss den in Kapitel 4.1 ausgeführten Literaturwerten angenommen. Für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk wird vorausgesetzt, dass für das Holz der gleiche Wirkungsgrad wie in einem reinen Holzgas-Kombikraftwerk gleicher Leistung erzielt wird. Diese Annahme ist als erste Näherung gerechtfertigt, da der Vergasungswirkungsgrad ab einer bestimmten Anlagengrösse kaum mehr gesteigert und mit gegen 75% vorausgesetzt werden kann, während der Kraftwerksteil (Gas- und Dampfturbine) im betrachteten Leistungsbereich eine starke Leistungsabhängigkeit aufweist. Die Annahme der Ausschöpfung des vollen Grössenvorteils ist zwar tendenziell optimistisch, da eine für zwei Brennstoffe ausgelegte Gasturbine oder die Aufteilung auf zwei separate Gasturbinen eine geringfügige Wirkungsgradreduktion zur Folge haben können, die Abweichung zu den effektiv erzielbaren Werten wird jedoch als gering angenommen.

Bild 5.11 zeigt die unter der geschilderten Annahme erzielbaren Wirkungsgrade für die Holznutzung in einem Holzgas-Kombikraftwerk („Holz“) im Vergleich zu einem Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk („Holz/Gas“). Durch die Angliederung der Holznutzung an das Erdgaskraftwerk kann somit eine erhebliche Steigerung des Holzwirkungsgrads erwartet werden, auch wenn die reale Anlage voraussichtlich geringfügig unter der optimistischen Annahme „Holz/Gas“ sein kann.

Für das Beispiel von 50 MWe aus Holz wird ein Wirkungsgrad von 44,0% anstelle von 42,0% erzielt, was einer Verbesserung um rund 5% entspricht. Der Vorteil ist vor allem bei Leistungen unter 150 MWe von Bedeutung, während bei noch grösseren Leistungen eine asymptotische Annäherung beider Kraftwerkstypen an einen Maximalwert erreicht wird.

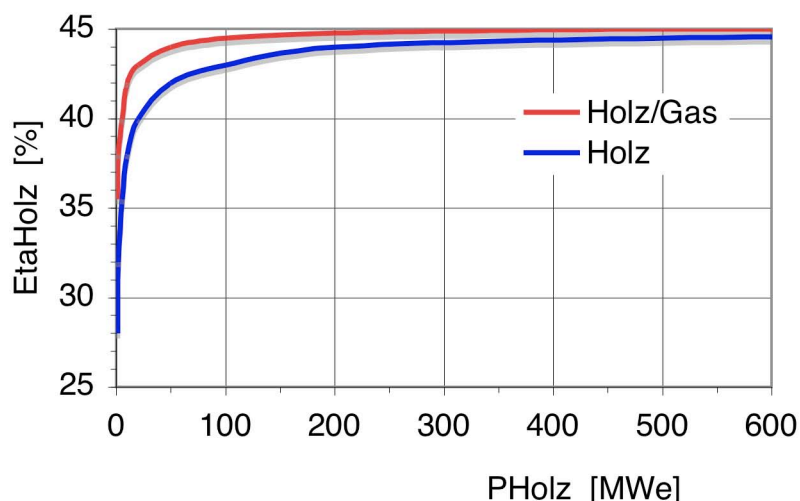


Bild 5.11 Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Holz in Funktion der elektrischen Holz-Leistung für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas, rot) mit 20% Holzanteil und für ein reines Holzgas-Kombikraftwerk (Holz, blau). Die gesamte Kraftwerksleistung ist somit im Fall des Holzkraftwerks gleich der angegebenen Leistung, für den Fall des Holz/Gas-Kraftwerks beträgt die Gesamtleistung dagegen das Fünffache der angegebenen Holzleistung. Die **Differenz** zwischen den zwei Kurven entspricht dem für die Holznutzung erzielbaren **Gewinn** durch die Angliederung der Holznutzung an ein Erdgaskraftwerk. Beispiel: Ein Holzkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 50 MWe erzielt einen Wirkungsgrad von 42,0%. Wenn die Holznutzung an ein Erdgaskraftwerk angegliedert wird, wird für die Stromerzeugung aus Holz ein Wirkungsgrad von 44,0% erzielt. Durch die Angliederung können somit rund 5% Holz eingespart oder rund 5% mehr Strom produziert werden.

## 5.4 Investitionskosten Holz

Der Vorteil der Angliederung des Holzkraftwerks an ein Erdgaskraftwerk zeigt sich auch in den deutlich reduzierten spezifischen Investitionskosten nach Bild 5.12, wobei für die Kosten eine analoge Annahme wie für den Wirkungsgrad getroffen wird. Die Schätzung der Investitionskosten beruht somit auf der Annahme, dass zum Beispiel die Zusatzaufwendungen für einen 50 MWe Holzvergaser mit Gasreinigung sowie die Leistungserhöhung des Erdgaskraftwerks von 200 MWe auf 250 MWe die gleichen spezifischen Kosten verursacht wie ein 250 MWe Holzkraftwerk inklusive Gas- und Dampfturbine. Je nach definitivem Anlagenkonzept ist davon auszugehen, dass die spezifischen Investitionskosten des Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit der geschilderten Annahme geringfügig unterschätzt werden und die effektiven Kosten somit etwas über der Kurve „Holz/Gas“ zu stehen kommen.

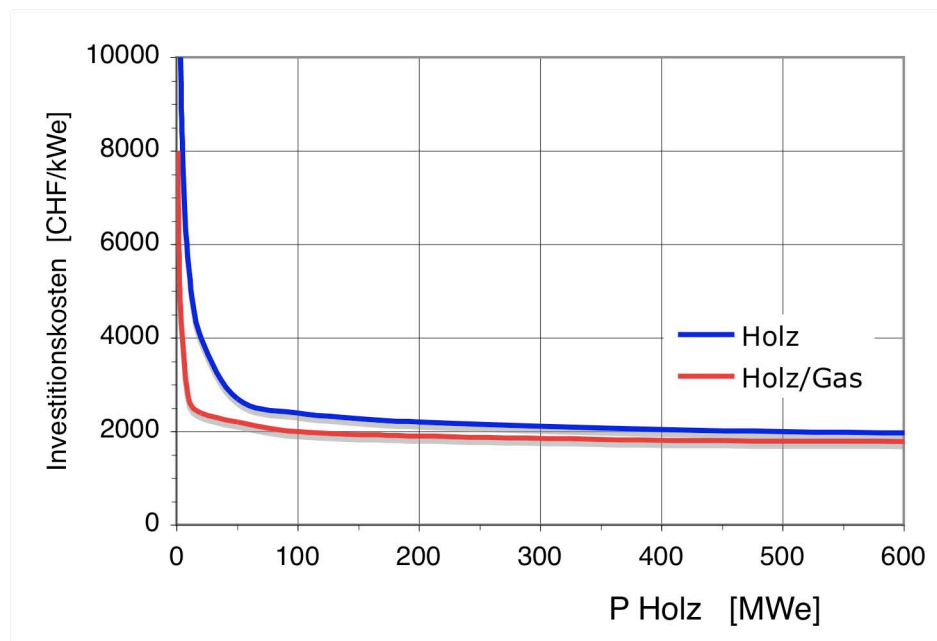


Bild 5.12 Spezifische Investitionskosten für ein Holzgas-Kombikraftwerk (Holz) und für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas) mit gleicher Holzleistung, jedoch fünffacher Gesamtleistung. Die **Differenz** zwischen den zwei Kurven entspricht der für die Holznutzung erzielbaren **Verbesserung** durch die Angliederung der Holznutzung an ein Erdgaskraftwerk.

## 5.5 Wirkungsgrad und Investitionskosten Erdgas

Die Wirkungsgrade und die Investitionskosten für das Erdgas-Kombikraftwerk werden als von der Kombination mit einer Holz-Zugabe unabhängig angenommen, da die Mehrkosten für den Holz-Kraftwerksteil beim Holz berücksichtigt sind. Bild 5.13 zeigt den Wirkungsgrad und Bild 5.14 die spezifischen Investitionskosten eines reinen Erdgas-Kombikraftwerks in Funktion der Leistung.

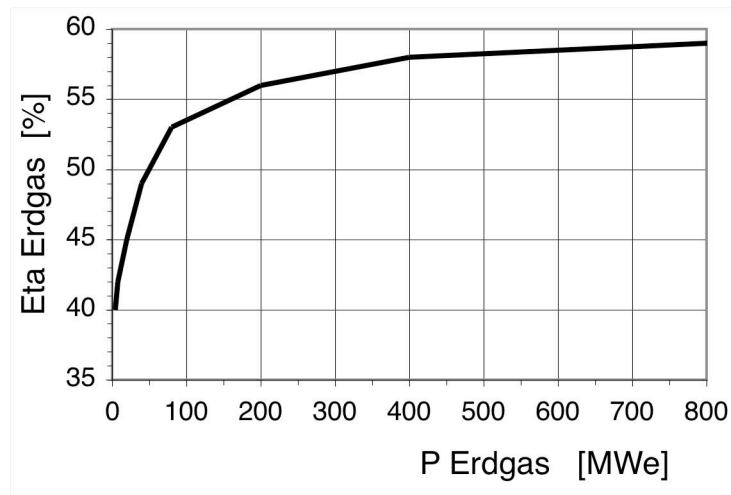


Bild 5.13 Wirkungsgrad eines Erdgas-Kombikraftwerks in Funktion der elektrischen Leistung.

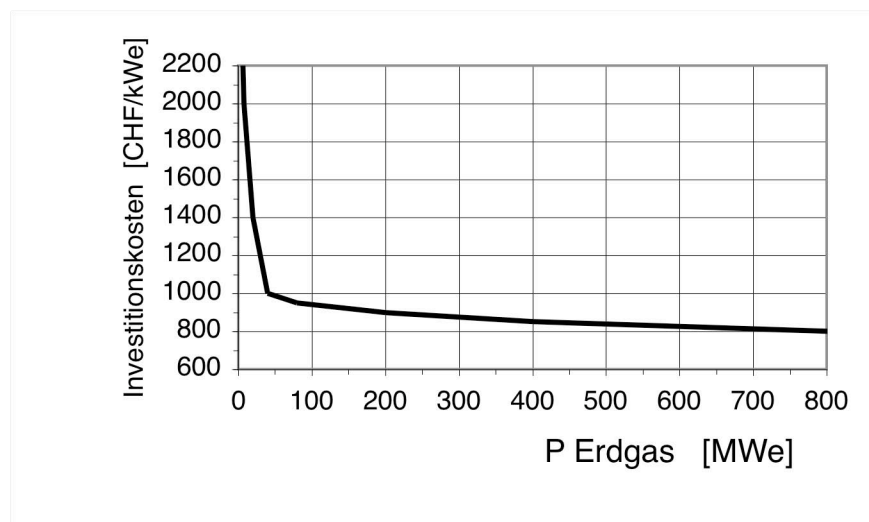


Bild 5.14 Spezifische Investitionskosten für ein Erdgas-Kombikraftwerk in Funktion der Leistung.

## 5.6 Vergleich von Holz und Erdgas

Bild 5.15 zeigt den Wirkungsgrad und Bild 5.16 die spezifischen Investitionskosten von Kombikraftwerken mit Holzgas, Holzgas/Erdgas und Erdgas in Funktion der Leistung. Für Holz und für Holz/Gas bezeichnet die Leistung die reine Holz-Leistung, während für Erdgas die Erdgas-Leistung angegeben ist. Entsprechend der Annahme eines Vergasungswirkungsgrades von Holz von 75% im gesamten betrachteten Leistungsbereich, weist Erdgas einen um einen Drittel höheren Wirkungsgrad auf. Für Anlagenleistungen ab 100 MWe weist der Holzteil eines Holzgas/Erdgas-Kraftwerks rund zweieinhalb Mal so hohe spezifische Investitionskosten auf wie ein Erdgas-Kraftwerk. Ein separates Holzgas-Kraftwerk weist allerdings rund dreimal so hohe Investitionskosten auf. Bei Leistungen weit unter 50 MWe haben die Angaben für ein Erdgas-Kombikraftwerk nur qualitativen Charakter, da in dieser Leistungsklasse kaum mehr Kombikraftwerke, sondern allenfalls Gasmotoren-Blockheizkraftwerke zum Einsatz kommen. Für Holzgas-Kombikraftwerke steigen die spezifischen Investitionskosten auf Werte bis über Fr. 10'000.– pro kWe an, weshalb im Leistungsbereich unter 20 MWe reine Holzgas-Kombikraftwerke nicht konkurrenzfähig sind.

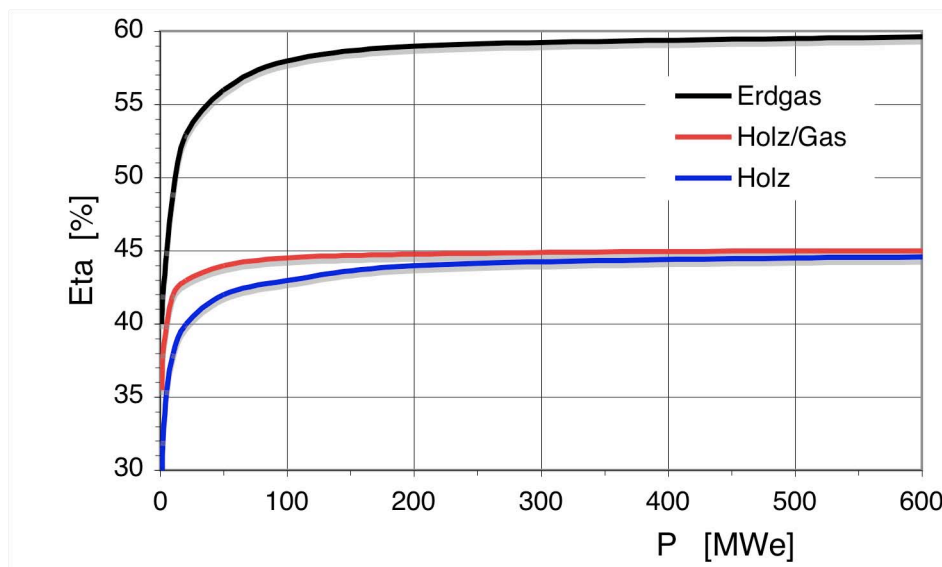


Bild 5.15 Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Holz in Funktion der elektrischen Holz-Leistung für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas, rot) mit 20% Holzanteil und für ein reines Holzgas-Kombikraftwerk (Holz, blau). Die gesamte Kraftwerksleistung ist somit im Fall des Holzkraftwerks gleich der angegebenen Leistung, für den Fall des Holz/Gas-Kraftwerks beträgt die Gesamtleistung dagegen das Fünffache der angegebenen Leistung. Die **Differenz** zwischen den Kurven „Holz“ und „Holz/Gas“ entspricht der für die Holznutzung erzielbaren **Verbesserung** durch die Angliederung der Holznutzung an ein Erdgaskraftwerk.

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 nur die Holzleistung, für den Erdgas-Fall dagegen die Erdgasleistung.



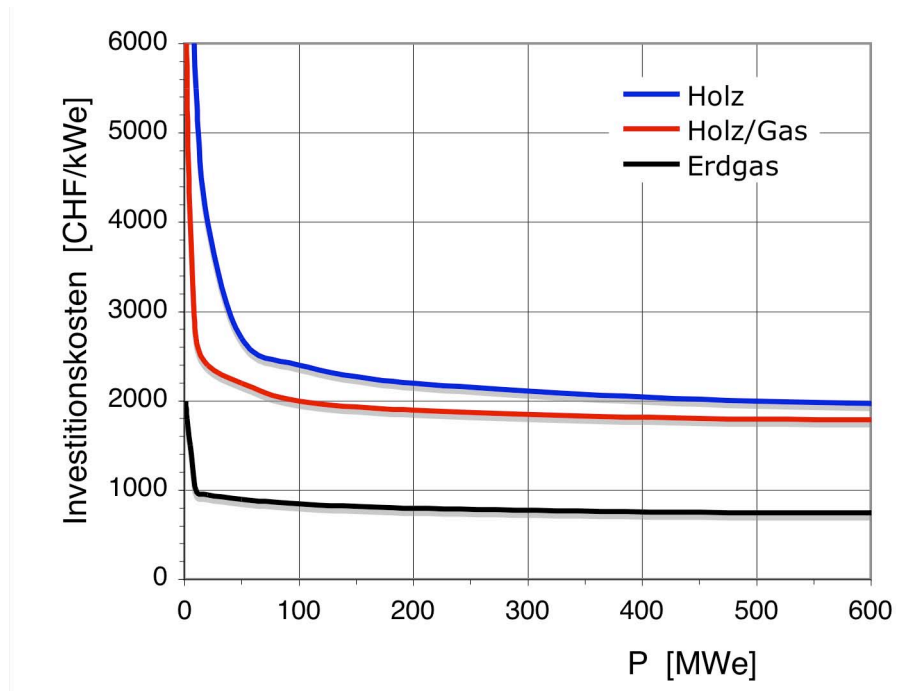


Bild 5.16 Spezifische Investitionskosten für ein Holzgas-Kombikraftwerk (Holz) und ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas) mit gleicher Holzleistung im Vergleich zu den Investitionskosten eines Erdgas-Kombikraftwerks. Für die Fälle Holz und Holz/Erdgas bezeichnet die Leistung auf der x-Axe somit nur die Holzleistung, für den Erdgas-Fall dagegen die Erdgasleistung.

## 5.7 Stromgestehungskosten

Bild 5.17 zeigt die Stromgestehungskosten für die drei Holzbrennstoffe in Abhängigkeit der mit Holz erzeugten Kraftwerksleistung. Auf Grund der abgestuften Brennstoffpreise für Waldholz, Restholz und Altholz ergeben sich auch in dieser Reihenfolge sinkende Stromgestehungskosten. Allerdings ist zu beachten, dass Waldholz zum Preis von Altholz deutliche tiefere Stromgestehungskosten ermöglichen würde. 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. Dank des höheren Wirkungsgrads und der tieferen spezifischen Investitionskosten resultieren für das Holz/Erdgas-Kraftwerk erheblich tiefere Stromgestehungskosten.

Die zunehmende Transportdistanz bei zunehmender Anlagengrösse wird bis zu rund 150 MWe überkompensiert durch den Einfluss von Wirkungsgrad und Investitionskosten. Das Optimum für das in der Schweiz verfügbare Potenzial sind deshalb Kraftwerke mit mindestens 100 MWe Holzleistung. 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.

Mit den angenommenen Brennstoffpreisen entsprechen die Stromgestehungskosten für Erdgas ungefähr denjenigen von Restholz. Bei Erdgas sind die Stromgestehungskosten einerseits in Funktion der Holzleistung eingetragen (ausgezogene Linie). Die Erdgasleistung entspricht allerdings dem Vierfachen der Holzleistung, weshalb die gleichen Daten zudem als gestrichelte Linie in Abhängigkeit der Erdgasleistung eingetragen sind.

Für Wald- und Restholz ergeben sich für Anlagen ab 150 MWe Stromgestehungskosten ohne Brennstoffkosten von rund 3 Rp./kWh.

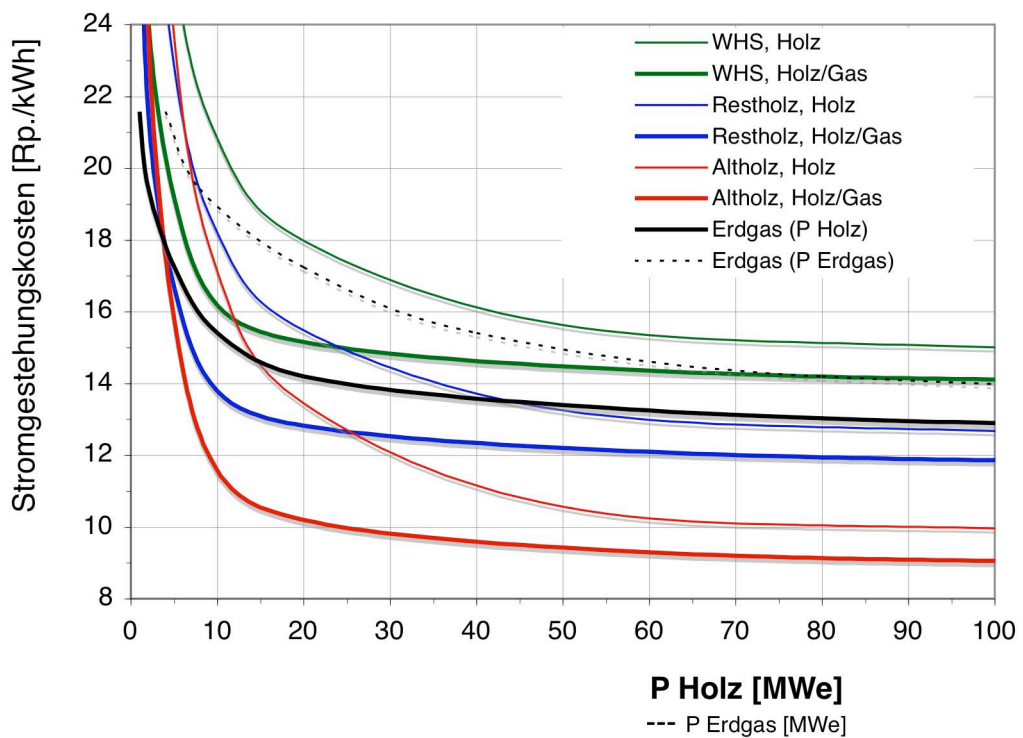
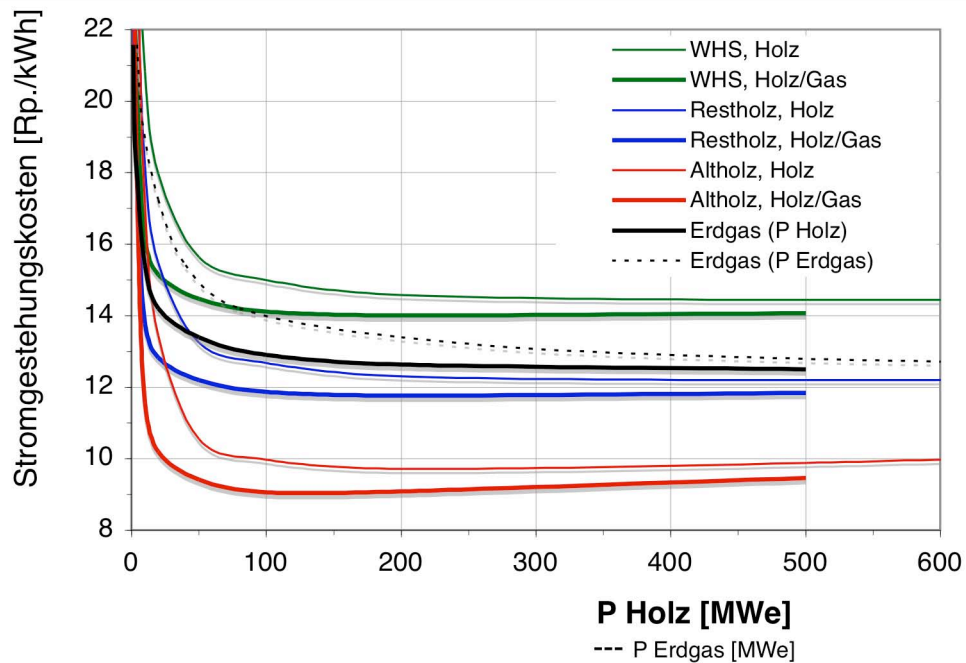


Bild 5.17 Stromgestehungskosten in Funktion der elektrischen Leistung aus Holz. Brennstoffpreise: Erdgas 7 Rp./kWh, Waldholz 5 Rp./kWh, Restholz 4 Rp./kWh, Altholz 2 Rp./kWh.  
 $P_{\text{Holz}}$  = Kraftwerksleistung Holz = 20% der Gesamtleistung.  
 WHS, Holz = Waldhackschnitzel für reines Holzgas-Kombikraftwerk  
 WHS, Holz/Gas = Waldhackschnitzel für Kombikraftwerk mit 20% Holz plus 80% Erdgas  
 Erdgas (P Holz) = Stromgestehungskosten aus Erdgas in Funktion der Holzleistung  $P_{\text{Holz}}$ .  
 Erdgas (P Erdgas) = Stromgestehungskosten aus Erdgas in Funktion der Erdgasleistung (gestrichelt).

## 5.8 Einfluss des Erdgas-Preises

Bild 5.19 zeigt die Stromgestehungskosten bei einem Erdgaspreis von 10 Rp./kWh bei sonst unveränderten Annahmen. Bei 10 Rp./kWh kommt Erdgas-Strom auf rund 18 Rp./kWh zu stehen, wobei die Brennstoffkosten zu rund 95% zu den Erzeugungskosten beitragen. Identische Stromgestehungskosten werden in einem reinen Holzgas-Kombikraftwerk mit Waldholz von 20 MWe erzielt. Bei grösseren Anlagenleistungen oder dem Einsatz von Restholz und Altholz oder der Angliederung des Waldholzkraftwerks an ein Erdgaskraftwerk ist Strom aus Holz deutlich kostengünstiger als Strom aus Erdgas.

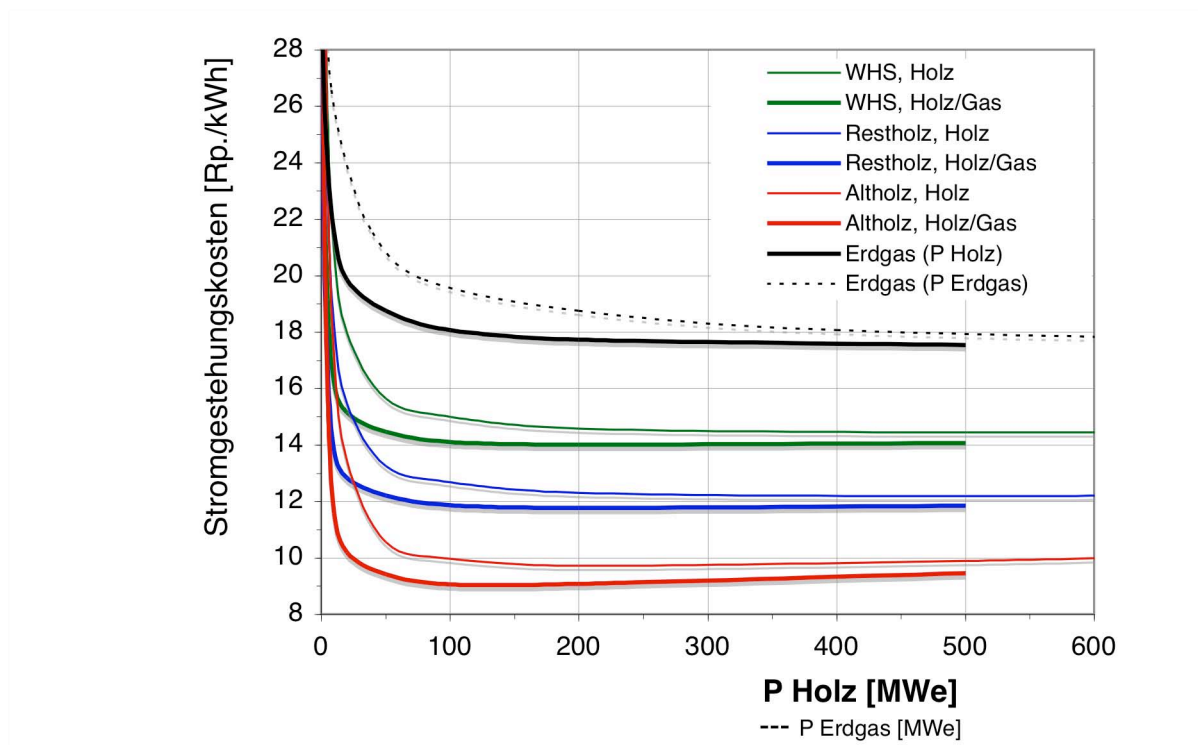


Bild 5.18 Stromgestehungskosten in Funktion der elektrischen Leistung, Alle Annahmen und Bezeichnungen wie in Bild 5.17, ausser Erdgaspreis = 10 Rp./kWh.

Bild 5.19 zeigt die Stromgestehungskosten bei einem Erdgaspreis von 5 Rp./kWh bei sonst unveränderten Annahmen. Bei 5 Rp./kWh kommt Erdgas-Strom auf rund 9 Rp./kWh zu stehen, wobei der Anteil der Brennstoffkosten zwar auf unter 90% sinkt, aber die Stromerzeugungskosten immer noch hauptsächlich bestimmt. Wenn Holzgas in einem Erdgas-Kombikraftwerk mitgenutzt wird, ist Holzstrom erst bei einem Endenergiepreis für Holz von unter 2 Rp./kWh konkurrenzfähig, dann allerdings bereits ab Holzleistungen von rund 20 MWe. Zu diesem Holzpreis ist allerdings lediglich die Versorgung mit einer begrenzten Menge Altholz oder die lokale Restholznutzung in einem Holz verarbeitenden Betrieb denkbar.

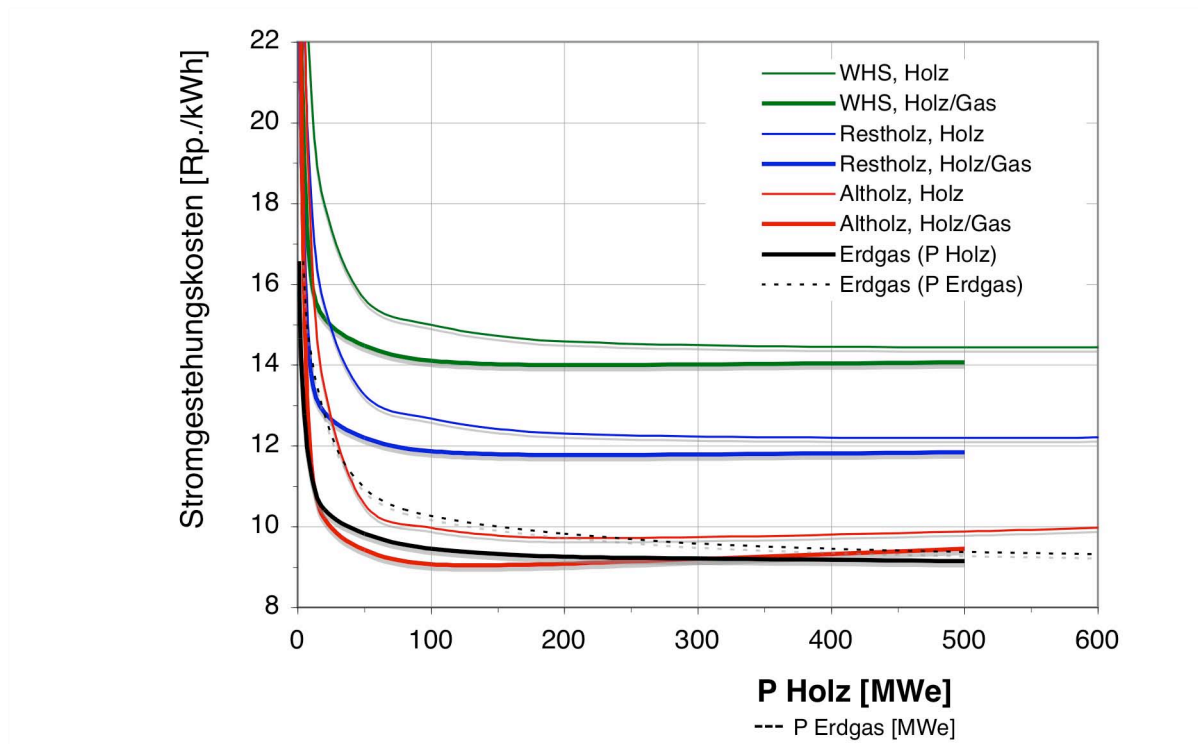


Bild 5.19 Stromgestehungskosten in Funktion der elektrischen Leistung. Alle Annahmen und Bezeichnungen wie in Bild 5.17, ausser Erdgaspreis = 5 Rp./kWh.

## 6 Literatur

- 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
- Bridgwater, T.: *Biomass for power and heat*, Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham, 2004
- Bundesamt für Energie: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2004*, Bern 2005
- 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
- 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
- ECG 2004 (Energy Consulting Group Ltd.): Fossil-thermische Kraftwerke, *BFE-Tagung „Zukunft des Elektrizitätsangebots“*, 2. Juli 2004, Bern
- Good, J. et al.: *QM Holzheizwerke*, Holzenergie Schweiz 2004
- Hofbauer, H., Kaltschmitt, M.: Vergasung, *Energie aus Biomasse*, Berlin 2001, ISBN 3-540-64853-4 2001, 427–472
- Holzenergie Schweiz: *www.holzenergie.ch*, 2005
- Kasser, U., Pöll, M., Graffe, K.: *Ökologische Bewertung mit Hilfe der grauen Energie*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 307, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 1999
- Nussbaumer, T.: Erntefaktor von Energiesystemen mit Holzverbrennung, *8. Holzenergie-Symposium*, Bundesamt für Energie, Bern 2004, ISBN 3-908705-10-X, 7–27
- Oettli, B., et al.: *Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz* (Studie Infras et al.), Bundesamt für Energie, Bern, 2004
- Primas, A., Kessler, F.: *Schweizerische Holzenergiestatistik, Folgeerhebung für das Jahr 2004*, Bundesamt für Energie, Bern 2005
- Rensfelt, E.: Gasification Survey Report Sweden. In: K. Kwant, H. Knoef (Eds.): *Status of Gasification*, IEA Bioenergy and Gasnet, 2002
- Stahl, K., Neergaard, M.: Experiences from the Värnamo IGCC demonstration plant, Power Production from Biomass III, Espoo (Finland) 14–15.9.1998, *VTT Symposium 192*, 73–86
- Stahl, K., Neergard, M.: Das Kombi-Kraftwerk mit integrierter Biomasse-Vergasung in Värnamo/Schweden, *VGB Kraftwerkstechnik* 76, Heft 4, 327 – 330, 1996
- 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
- Stuber, P.: Wirkungsgrade und Kosten von Erdgas-Kombikraftwerken, *persönliche Mitteilung*, Alstom Baden 2005
- Swisstopo: *GG25 swisstopo*, Stand 2003
- Swissworld: *www.swissworld.org*, 2005
- Tiangco, V., Sethi, P., Zhang, Z.: Biomass – Strategic value analysis, *IEPR Workshop*, 1.7.05, California Energy Commission, 2005