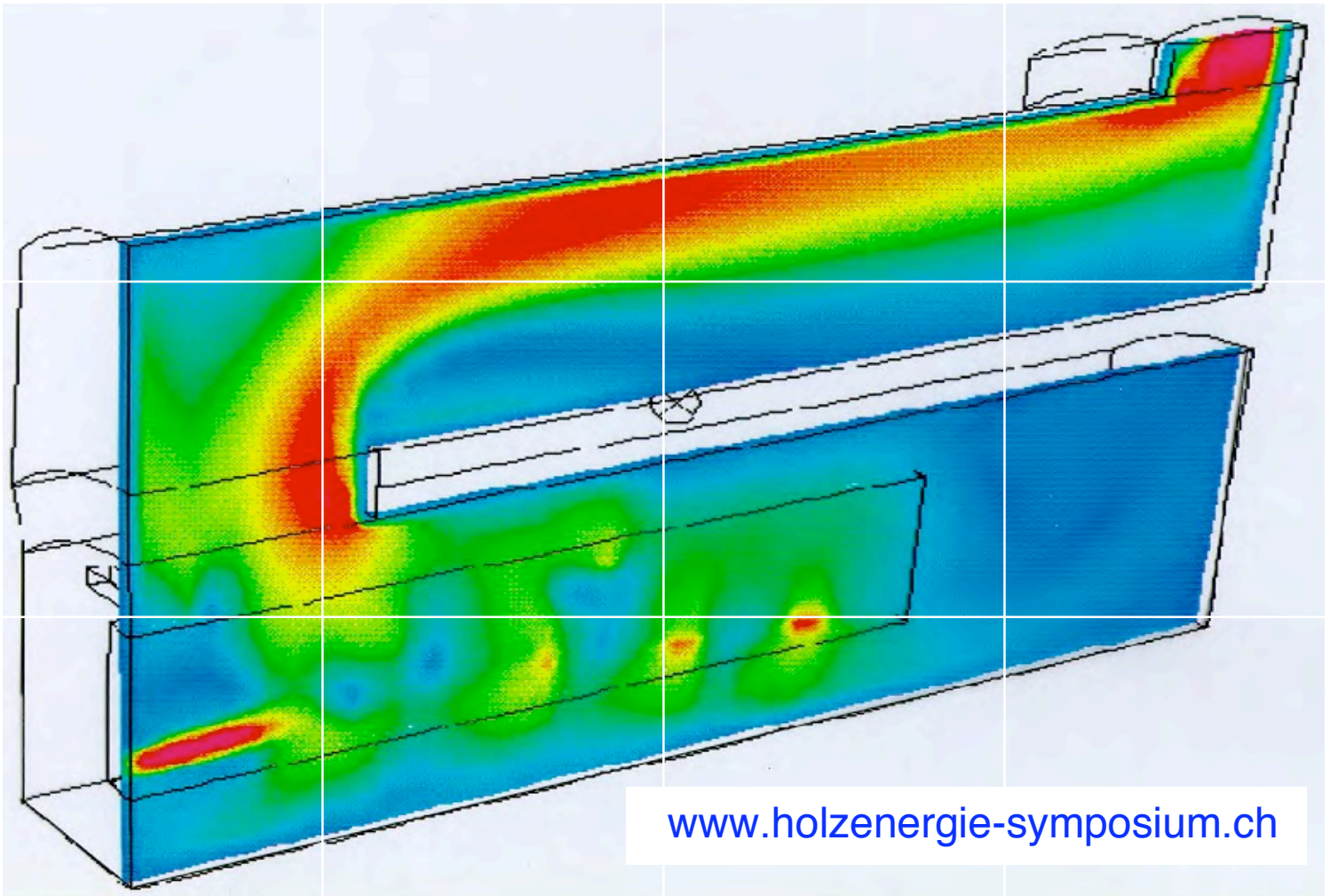


Thomas Nussbaumer (Hrsg.)

# 9. Holzenergie-Symposium

Feinstaubminderung und Stromerzeugung  
im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung

20. Oktober 2006, ETH Zürich



**verenum**



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Energie**

Thomas Nussbaumer (Hrsg.):

Feinstaubminderung und Stromerzeugung im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung. 9. Holzenergie-Symposium, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, Zürich 2006, Verenum, Zürich und Bundesamt für Energie, Bern, ISBN 3-908705-14-2

Bezugsquellen:

Holzenergie-Symposium, c/o TEMAS AG, Egnacherstrasse 69, CH – 9320 Arbon  
Telefon 071 446 50 30, Fax 071 446 50 82, Email [info@holzenergie-symposium.ch](mailto:info@holzenergie-symposium.ch)

Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – 8006 Zürich, [www.verenum.ch](http://www.verenum.ch)

Weitere Informationen: [www.holzenergie-symposium.ch](http://www.holzenergie-symposium.ch)

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Ulrich Jansen: Aktionsplan Feinstaub des Bundes im Bereich Holzfeuerungen und verschärfte Emissionsgrenzwerte	7
2 Fritz Zürcher: FairFeuern – Aktionsplan zur Verhinderung erhöhter Emissionen und illegaler Abfallverbrennung	13
3 Norbert Klippel: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieseleruss	21
4 Michael Oser: Praxiserfahrungen mit Low-Particle-Feuerungen für Holzpellets	41
5 Ruedi Frey: Grundlagen und Techniken zur Feinstaubabscheidung und Einfluss von Partikeleigenschaften und Betriebsart	49
6 Reiner Bär: Praxiserfahrungen mit elektrischen Abscheidern für Holzfeuerungen ab 200 kW	63
7 Roland Schmid: Rohrelektroabscheider für Holzfeuerungen ab 200 kW: Entwicklung und Praxiserfahrung	71
8 Peter Rüegg: Klein-Elektroabscheider für Holzfeuerungen: Stand der Entwicklung und Praxiserfahrungen	79
9 Morten Berntsen: Small scale electrostatic precipitator for residential wood combustion – Elektroabscheider für häusliche Holzfeuerungen	95
10 Christian Gaegauf: Flammlose Verbrennung zur NO <sub>x</sub> -Minderung: Konzept und Anwendung für automatische Holzfeuerung	105
11 Herbert Ortner: Technik moderner Pelletskessel mit Brennwerttechnik	115
12 Thomas Nussbaumer: Potenzial und Wirtschaftlichkeit der Holzenergie sowie Stromerzeugung in Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk	123
13 Hermann Unsinn: 7 MWe-Holzheizkraftwerk in Kufstein: Konzept, Wirkungsgrad, Kosten und Praxiserfahrungen	161
14 Gerd Eisenbeiss: Sichere Energieversorgung für Europa – Welche Optionen haben wir und welche Rolle spielt die Biomasse?	179
Autorenverzeichnis	203



# Potenzial und Wirtschaftlichkeit der Holzenergie für Wärme und Wärmekraftkopplung sowie Stromerzeugung in Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk

---

Thomas Nussbaumer, Verenum, Zürich

## Zusammenfassung

Für eine verstärkte Energieholznutzung sollte eine maximale Substitution fossiler Energieträger mit minimalen Emissionen insbesondere an Feinstaub angestrebt werden. Im vorliegenden Beitrag werden dazu folgende Nutzungsmöglichkeiten verglichen:

1. Wärmeerzeugung in automatischen Holzheizungen von 100 kW bis 1 MW
2. Wärmekraftkopplung (WKK) in Anlagen von 0,5 MWe bis 5 MWe und
3. Holzgas-Kombikraftwerke von 50 MWe bis 600 MWe, wobei für die Schweiz eine Leistung von rund 150 MWe ideal wäre und als Option auch die Angliederung an ein Erdgas-Kraftwerk mit Zufeuerung von Holzgas beschrieben wird.

Für reine Heizanwendungen wird der Einfluss einer Feinstaubabscheidung mit Elektroabscheidern und Gewebefiltern aufgezeigt. Beim Einsatz in WKK-Anlagen und Kraftwerken wird die Feinstaubabscheidung dagegen vorausgesetzt. Für alle drei Techniken wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Die Heizanwendung wird mit Heizöl und die Kraftwerksanwendung mit Erdgas verglichen. Daraus geht hervor, dass alle drei Anwendungen für Holz wirtschaftlich attraktiv sein können, wobei für WKK-Anlagen und Kraftwerke längere Betriebsdauern als für Heisanlagen vorausgesetzt werden. Für wärmegeführte WKK-Anlagen sind Anwendungen mit Prozesswärmebedarf ideal, während für Kraftwerke dank des hohen elektrischen Wirkungsgrads ein stromgeführter Betrieb mit lediglich teilweiser Abwärmenutzung in Frage kommt.

Zur Verminderung der Feinstaubbelastung sollten künftige automatische Holzheizungen mit Feinstaubabscheidern ausgerüstet werden. Die Zusatzkosten werden ab 200 kW, sicher aber ab 400 kW als verhältnismässig betrachtet. Für kleinere Leistungen ist auch der Einsatz von optimierten Pelletfeuerungen denkbar. Wegen der mit der Anlagengrösse steigenden elektrischen Wirkungsgrade sind WKK-Anwendungen auf Basis heutiger Technologie vor allem für mittlere Leistungen interessant, also eher ab 5 MWe als ab 0,5 MWe.

Sofern Holz in relevantem Mass zur Stromerzeugung beitragen soll, sind allerdings Kraftwerke mit Leistungen um 150 MWe vorteilhaft, welche elektrische Wirkungsgrade bis gegen 45% ermöglichen. Der mit der Anlagengrösse steigende Transportaufwand wird durch die Wirkungsgradzunahme des Kraftwerks dabei überkompensiert. Ein Holz-Kraftwerk mit 150 MWe könnte jährlich rund 900 GWh erneuerbaren Strom produzieren. Das Ziel von EnergieSchweiz, bis im Jahr 2010 zusätzlich 500 GWh elektrische Energie oder rund 1% des gegenwärtigen Stromverbrauchs aus neuen erneuerbaren Quellen zu produzieren, könnte mit einem Holz-Kraftwerk von rund 85 MWe erreicht werden.

# 1 Einleitung

In der Schweiz wird rund eine Verdopplung der heutigen Energieholznutzung angestrebt. Zur Festlegung der Nutzungsvarianten sollten dabei zwei Ziele verfolgt werden: Erstens sollte eine maximale Substitution fossiler Energieträger angestrebt werden und zweitens sollte die zusätzliche Holznutzung eine möglichst geringe Umweltbelastung verursachen. Besonders zu beachten sind dabei die Luftschadstoffe, darunter vorab die Emissionen an Feinstaub, zweitens auch die Emissionen an Stickoxiden und in dritter Linie auch an Schwermetallen und polychlorierten Dibenzo-*p*-Dioxinen und Furanen.

Holz deckt derzeit rund 2,6% des Gesamtenergieverbrauchs der Schweiz auf Endenergie-Basis (Basisjahr 2004 [1])<sup>1</sup>. Zur Reduktion fossiler CO<sub>2</sub>-Emissionen wird vom Bund und den Kantonen noch rund eine Verdopplung der Energieholznutzung angestrebt. Eine Potenzialabschätzung im Auftrag des Bundesamts für Energie weist aus, dass auch unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Randbedingungen mehr als eine Verdopplung entsprechend einem Anteil von rund 7,1% des heutigen Gesamtenergieverbrauch möglich ist (Erhebungsjahr 2004 [2]). Demgegenüber entsprechen die Schätzungen von QM Holzheizwerke und Holzenergie Schweiz 4,9% des heutigen Verbrauchs [3, 4]. Im vorliegenden Beitrag wird ein mittleres Potenzial von 6,0% angenommen (Tabelle 1).

Tabelle 1 Nutzung und Potenzial an Energieholz in der Schweiz im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch (GEV) angegeben als Endenergie [1]. Daten zu Energieholz gemittelt aus [2], [3] und [4]. 1 PJ = 10<sup>15</sup> J.

	Nutzung			Potenzial			Zusatzpotenzial		
	Mio m <sup>3</sup> /a	PJ/a	GWh/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	2 880	4.1	35.3	9 806	2.9	24.9	6 926
Restholz	1.1	9.5	2 640	1.2	10.3	2 854	0.1	0.8	214
Altholz	0.3	2.6	720	0.8	7.0	1 951	0.5	4.4	1 231
<b>Holz Total</b>	<b>2.6</b>	<b>22.5</b>	<b>6 240</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>
GEV Schweiz 04		873	242 500						
davon Elektrizität		202	56 000						
<b>Holz/GEV</b>		<b>2.6%</b>			<b>6.0%</b>			<b>3.5%</b>	

Bei einer vermehrten Holznutzung ist allerdings zu beachten, dass die Holzfeuerungen heute überproportional zur Feinstaubbelastung beitragen und dass die Feinstaubemissionen zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte in den kommenden Jahren reduziert werden müssen. Eine vermehrte Energieholznutzung steht deshalb im Widerspruch zu den Zielen der Luftrein-

<sup>1</sup> Als Basisjahr dienen die Angaben der Gesamtenergiestatistik von 2004, da auch die Potenzialabschätzung aus den Jahren vor 2005 stammen und für Holz in der Gesamtenergiestatistik seit 2005 stark abweichende Angaben (3,4% des GEV statt 2,6% des GEV) verwendet werden, welche mehr auf eine angepasste Erhebung als auf den realen Zuwachs zurückzuführen ist.

haltepolitik, sofern es nicht gelingt, die Feinstaubemissionen aus bestehenden Holzfeuerungen deutlich zu vermindern und Kapazitätserweiterungen nur in emissionsarmen Anlagen vorzunehmen. Eine besondere Herausforderung sind dabei handbeschickte Holzfeuerungen, vor allem weil diese bei nicht idealem Betrieb um ein mehrfaches höhere Emissionen als bei optimalem Betrieb verursachen können, weil zudem ein unsachgemässer Betrieb in der Praxis bis heute nicht sicher verhindert werden kann, und weil zudem Feinstaub aus schlecht betriebenen Holzfeuerungen besonders gesundheitsschädlich ist. Für eine vermehrte Energieholznutzung steht deshalb der Einsatz von automatischen Feuerungsanlagen im Vordergrund. Für automatische Holzfeuerungen bietet sich zur Feinstaubreduktion der Einsatz von Elektroabscheidern oder Gewebefiltern an. Damit können die Emissionen im Vergleich zu heutigen Anwendungen um rund eine Grössenordnung reduziert werden: Wenn heute von typischen Staubemissionen in der Grössenordnung von  $100 \text{ mg/m}^3$  (bei 11 bzw. 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) auszugehen ist, sind nach Feinstaubabscheidern mittlere Emissionen von weniger als  $10 \text{ mg/m}^3$  möglich. Die Einsatzmöglichkeiten und Kosten von Feinstaubabscheidern im Leistungsbereich von 100 kW bis 1 MW wurden deshalb in einer Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt und des Amtes für Umwelt Kanton Thurgau untersucht und werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt [5].

Nebst reinen Heizanwendungen kommen auch Anlagen zur Wärmekraftkopplung (WKK) in Frage. Die Wirtschaftlichkeit sowohl von Heizanwendungen als auch von Anlagen zur Wärmekraftkopplung mit Holz wurde in einer Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie untersucht und mit der Biogasgewinnung sowie der Treibstoffherstellung verglichen [6]. Im vorliegenden Beitrag werden daraus die Wirtschaftlichkeitsdaten zur Wärmekraftkopplung mit Holz zusammengefasst [7].

International werden Holz und andere biogene Energieträger auch zur Stromerzeugung in thermischen Kraftwerken eingesetzt. Die Zufeuerung von Biomasse in Kohlekraftwerken gilt gar als wirtschaftlichste Technik zur Substitution von fossilem  $\text{CO}_2$ , weshalb vor allem die Zufeuerung eine stark zunehmende Bedeutung erlangt [8, 9]. Je nach Anlagengrösse und Kraftwerkstechnik werden durch Zufeuerung in konventionellen Kohlekraftwerken Netto-Wirkungsgrade von gegen 40% erreicht. So wurde beispielsweise in den Niederlanden ein Kohlekraftwerk zur Mitverbrennung eines Grossteils des im Inland anfallenden Altholzes ausgerüstet (Bild 1). Bei rund 42% Kraftwerkwirkungsgrad resultieren mit Berücksichtigung des Aufwands zur Altholzaufbereitung zu trockenem Holzstaub rund 40% Netto-Wirkungsgrad für Altholz. Dank effizienter Feinstaubabscheidung und katalytischer Abgasentstickung weisen solche Kraftwerke tiefere Stickoxid- und Feinstaubemissionen auf als automatische Holzheizanlagen. Im Weiteren werden auch tiefe Emissionen an Schwermetallen und polychlorierten Dibenzo-*p*-Dioxinen und Furanen (PCDD/F) sicher gestellt. Die Zufeuerung von Altholz im erwähnten Kraftwerk wurde allerdings zwischenzeitlich eingestellt. Im Aufbau sind jedoch Anlagen zur indirekten Zufeuerungen von Holzgas aus grosstechnischen Vergasungsanlagen mit Durchsatz von mehr als 100'000 Jahrestonnen Holz [9].

In der Schweiz stand der Einsatz thermischer Kraftwerke bis vor Kurzem nicht zur Diskussion. Da nach Abschaltung der Kernkraftwerke und nach dem Auslaufen von Stromlieferverträgen mit dem Ausland ab dem Jahr 2020 eine Stromlücke absehbar ist, stellt sich allerdings die Frage, wie die Stromversorgung der Schweiz für die Zukunft gesichert werden kann. Als Basis dazu werden vom Bund verschiedene Szenarien zur Stromerzeugung

untersucht und dabei auch der Bau von Erdgaskraftwerken geprüft [10]. Mit diesem Vorschlag stehen als für die Schweiz ganz neue Situation auch thermische Kraftwerke zur Diskussion. Wenn der Bau fossil befeuerter Kraftwerke geprüft wird, sollte vor einer Entscheidung abgeklärt werden, welches Potenzial die Nutzung von Holz in Kraftwerken aufweist, da dadurch Erdgas für Anwendungen als Chemierohstoff und als mit tieferen Emissionen und höherem Wirkungsgrad als Benzin nutzbarer Fahrzeugtreibstoff eingespart werden könnte. Dies sind beides Anwendungen, bei denen eine Substitution durch Holz zwar technisch möglich, jedoch teurer und ineffizienter wäre als die Substitution von Erdgas zur Stromerzeugung. Aus diesem Grund wurden das Potenzial und die Kosten der Stromerzeugung in Holzkraftwerken in der Schweiz in einer Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie untersucht und zur Erzielung maximaler Wirkungsgrade der Einsatz in Holzgas-Kombikraftwerken vorausgesetzt [11]. Ergänzend dazu wurden das Potenzial und die Kosten für Deutschland separat dargestellt [12]. Als Option zu rein biogen befeuerten Kraftwerken wurde dabei auch die Zufeuerung von Holzgas in einem Erdgas-Kombikraftwerk untersucht. Die Angliederung einer großtechnischen Holzvergasungsanlage an ein Erdgaskraftwerk bietet dabei den Vorteil, dass der Holzanteil schrittweise erhöht und somit die Holzversorgung sukzessive aufgebaut und erweitert werden könnte. Im vorliegenden Beitrag werden die Resultate zur Stromerzeugung aus Holz in Kombikraftwerken für den Fall Schweiz zusammengefasst.



Bild 1 Kohlekraftwerk mit 635 MWe in (Gelderland-13 in Nijmegen, NL) mit Zufeuerung von Altholz (Abbruchholz, 60'000 t/a zum Ersatz von 45'000 t/a Kohle und 110'000 t CO<sub>2</sub>/a) zur Deckung von 3% bis 5% des Brennstoffbedarfs. Foto links: T. Nussbaumer, rechts: [9].

## 2 Vorgehen und Annahmen

Die Wärme- und Stromgestehungskosten werden nach der Annuitätenmethode bestimmt. Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich werden typische Energiepreise im Sommer 2006 und Randbedingungen für die Finanzierung gemäss Vorgaben des Bundes angenommen. Nachfolgend werden die wichtigsten Annahmen zusammengefasst, detaillierte Angaben sind in [5], [7] und [11] aufgeführt:

- Als Referenz wird für Holz ein Endenergiepreis von 5 Rp./kWh angenommen, für Heizöl von 8 Rp./kWh oder rund Fr. 80.– pro 100 Liter sowie für Erdgas von 7 Rp./kWh. Der Einfluss des Brennstoffpreises wird mit höheren und tieferen Werten aufgezeigt.
- Die Kapitalkosten werden für Wärme- und WKK-Anlagen mit einem Kalkulationszinssatz von 5,0 % p.a. bestimmt, wobei für die Technik eine Kalkulationsdauer von 15 Jahren und für das Gebäude (inklusive Silo) von 30 Jahren angenommen wird [5].
- Für Kraftwerke gelten gemäss Stromangebots-Perspektiven des Bundesamts für Energie ein Kalkulationsszinssatz von 2,5% p.a. und für die gesamte Investition eine Kalkulationsdauer von 30 Jahren [10].
- Für Heizanlagen wird als Referenzfall ein Betrieb mit 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr angenommen, für WKK-Anlagen von 4000 und für das Kraftwerk von 6000. In den Studien wird zudem der Einfluss der Betriebsdauer aufgezeigt.
- Die Investitions- und Betriebskosten der Wärmeerzeugung ohne Feinstaubabscheidung basieren auf einer Erhebung an über 30 Praxisanlagen sowie auf Erfahrungen von der Planung automatischer Holzheizwerke [13, 4]. Bild 2 zeigt die spezifischen Investitionskosten. Die detaillierten Annahmen sind in [7] ausgeführt und gelten für den Fall eines Neubaus bei korrekter Planung der Anlage auf ebenem und erschlossenem Grundstück.
- Die Investitions- und Betriebskosten zu den Feinstaubabscheidern basieren auf Informationen von ausgeführten Anlagen sowie auf Offertanfragen bei den Firmen Aerob-Beth (D), Eltecna (CH), Ionitec (A), Scheuch (A) und Trion (CH) [5]. Bei den Offertangaben wurden die nicht enthaltenen Zusatzkosten für Planung und Peripherie-Aggregate abgeschätzt. Im Weiteren wurden Angaben zu solchen Feinstaubabscheidern verwendet, von denen Praxiserfahrungen vorliegen, nämlich zu Platten-Elektroabscheider von Aerob-Beth und Ionitec sowie zu Gewebefiltern von Scheuch. Für die Betriebskosten des Gewebefilters wurde gemäss Herstellerangabe eine Lebensdauer der Filterschläuche von 5 Jahren vorausgesetzt.
- Für Heizanlagen wird ein Jahresnutzungsgrad von 80% für Holz und von 85% für Heizöl angenommen. Der elektrische Wirkungsgrad für WKK-Anlagen und Kraftwerke wird als von der Anlagengrösse abhängige Grösse ausgewiesen. Für das Holzgas-Kombikraftwerk wird zudem der Transportenergieaufwand für Lkw-Transport berücksichtigt.
- Für WKK-Anlagen erfolgt einerseits eine ungewichtete Bestimmung der Gestehungskosten für Wärme und Strom. Dabei werden für Wärme und Strom identische Gestehungskosten ausgewiesen, womit der Strom indirekt über zu teure Wärme querfinanziert wird.

Andererseits wird eine gewichtete Bestimmung der Wärme- und Stromgestehungskosten ausgewiesen. Dazu wird Strom mit einem Faktor 2,5 im Vergleich zu Wärme bewertet. Die so ausgewiesenen Stromgestehungskosten betragen also das 2,5-fache der zugehörigen Wärme-gestehungskosten.

- Über den Wirkungsgrad und die Investitionskosten von Kombikraftwerken liegen Angaben aus der Literatur vor [14–21]. Im Fall der Biomasse-Vergasung stützen sich diese unter anderem auf eine 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 im Vergleich zur Literatur tendenziell pessimistische Wirkungsgrad- und Investitionskosten angenommen. Da bis heute allerdings kein kommerzielles Kraftwerk dieser Art existiert, sind weitere Annahmen notwendig und die Daten mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet [11].

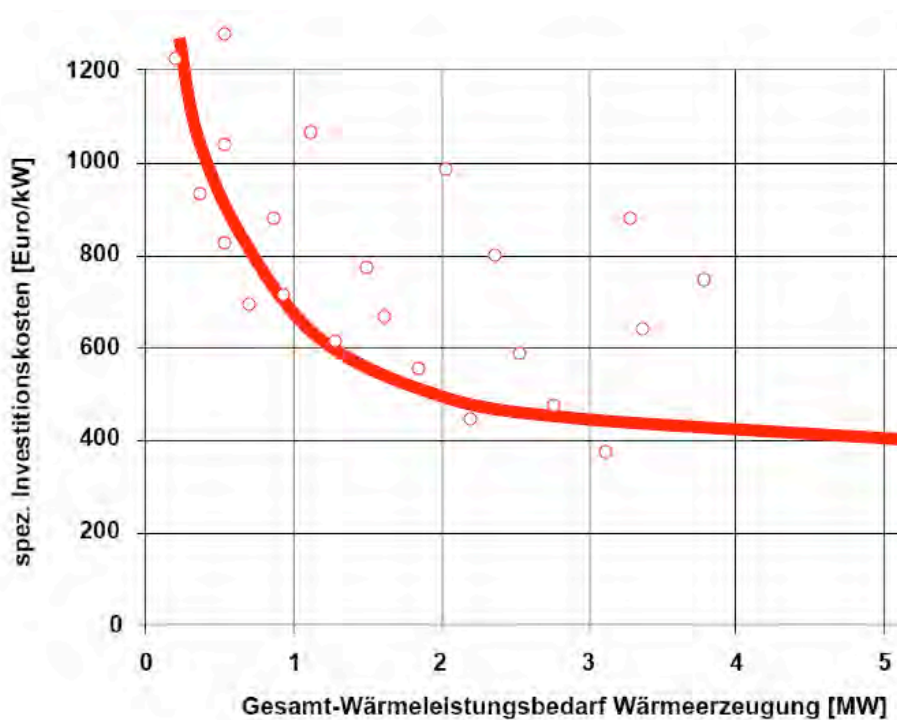


Bild 2 Spezifische Investitionskosten für Technik und Gebäude von Holzheizwerken ohne Fernwärmenetz und ohne Feinstaubabscheider bei Neubau auf erschlossenem Bauland in der Ebene in Funktion der Leistung. Berücksichtigt sind die gesamten Investitionskosten für Technik und Gebäude (Heizkessel, Heizraum, Kamin, hydraulische Einbindung, Steuerung und Brennstofflagerung mit Austragung). Die Linie zeigt die bei korrekter Planung und Ausführung erreichbaren Werte [4], die Punkte illustrieren exemplarisch die typische Streubreite von während der letzten zehn Jahre realisierten Anlagen.

### 3 Wärmeerzeuger mit und ohne Feinstaubabscheidung

#### 3.1 Technik

Im Leistungsbereich bis 2 MW kommen zur Feinstaubabscheidung bei automatischen Holzfeuerungen in erster Linie Trocken-Elektroabscheider und Gewebefilter zum Einsatz (Bild 3). Elektroabscheider werden auch als Elektrofilter bezeichnet. Da die Abscheidung jedoch nicht durch Filtration erfolgt, wird im Beitrag der Begriff Elektroabscheider verwendet. Für beide Anwendungen können Multizyklone als Vorabscheider zur Verringerung der Staubfracht eingesetzt werden. Bei Gewebefiltern dienen sie zudem zum Schutz vor Funken, während bei Elektroabscheidern Zyklone eingesetzt werden, wenn unverbrannte Grobpartikel grösser  $5\ \mu\text{m}$  im Abgas enthalten sind, da diese im Elektroabscheider nur unzureichend abgeschieden werden. Nasswäscher und Anlagen zur Abgaskondensation weisen für Partikel aus Holzfeuerungen nur beschränkte Abscheidegrade auf und kommen zur Staubabscheidung meist nur in Kombination mit einem nachgeschalteten Nass-Elektroabscheider zum Einsatz.

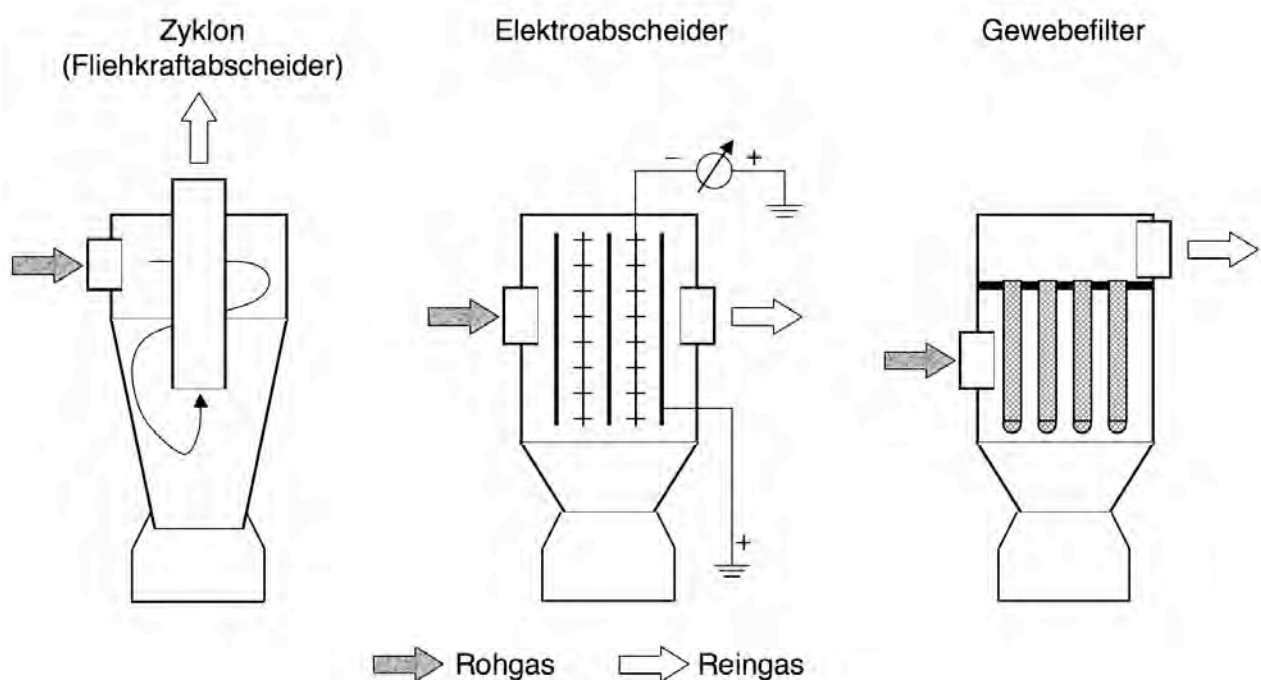


Bild 3 Funktionsprinzip von Zyklon, Elektroabscheider und Gewebefilter.

Elektroabscheider erzielen sehr hohe Abscheidegrade für Partikel über 1  $\mu\text{m}$  sowie für Feinstäube kleiner 0,1  $\mu\text{m}$ , während der Abscheidegrad für Korngrößen zwischen rund 0,2  $\mu\text{m}$  und 0,8  $\mu\text{m}$  ein Minimum aufweist. Der Gesamtabseidegrad ist abhängig von der Spannung und der Gasverweilzeit im Abscheider respektive der spezifischen Abscheidefläche. Bei gegebenem Gasvolumenstrom kann die Abscheidung somit durch Vergrößerung der Abscheidefläche erhöht werden. Für Feinstaub aus Holzfeuerungen werden typische Abscheidegrade in der Größenordnung von 95% erzielt, während für weit über 99% Abscheidung sehr grosse Abscheideflächen erforderlich wären. Elektroabscheider weisen nur geringe Druckverluste auf, so dass in der Regel der konventionelle Abgasventilator ausreicht. Elektroabscheider sind zudem unempfindlich gegenüber Funken.

Elektroabscheider werden in Platten- oder Röhrenbauweise ausgeführt. Für automatische Holzfeuerungen sind Platten-Elektroabscheider als etablierte Technik verfügbar, welche mit Klopfleinrichtungen periodisch abgereinigt werden. Als Alternative werden Rohrelektroabscheider angeboten, bei denen die Abreinigung durch mechanische Bürsten erfolgt. Eine Sonderbauform bilden Nass-Elektroabscheider, bei welchen die Abreinigung durch einen Flüssigkeitsfilm erfolgt. Bei Trocken-Elektroabscheidern ist eine Taupunktunterschreitung unerwünscht, da sie zu einem Kurzschluss führen kann. Zur Verhinderung von Störungen wird bei Platten-Elektroabscheidern meist eine elektrische Beheizung der aus dem Gasstrom zurückversetzten Isolatoren eingesetzt. Um die Ablagerung klebriger Stäube zu verhindern, besteht zudem die Möglichkeit, die Hochspannung bei Unterschreitung des Taupunkts auszuschalten.



Bild 4 Elektroabscheider für Leistungen unter 1 MW (Aerob-Beth, D).

Bei Gewebefiltern erfolgt die Abscheidung über eine einzige Filtrationsstufe, über welche in der Regel ein Abscheidegrad von über 99% erzielt wird. Die Durchströmung der Filtrationsstufe führt zu einem grossen Druckverlust, weshalb der Einsatz eines Gewebefilters eine erhöhte Ventilatorleistung mit entsprechendem Energieverbrauch erfordert. Die Staubschicht muss periodisch abgereinigt werden, was mit Druckluft erfolgt und einen zusätzlichen Energieverbrauch verursacht. Die Problematik der Taupunktunterschreitung ist bei Gewebefiltern besonders kritisch, da bereits eine einmalige Unterschreitung durch Aufbau einer klebrigen Schicht zu einer Zerstörung des Filtermaterials führen und hohe Kosten verursachen kann. Zur Vermeidung von Taupunktunterschreitungen werden Gewebefilter für Holzfeuerungen deshalb oft mit einem geregelten Bypass ausgerüstet. Die Freigabetemperatur wird zum Beispiel bei einem Brennstoffwassergehalt von 10% auf 120°C festgelegt oder bei 50% Wassergehalt auf 140°C erhöht. Der Bypassbetrieb kann die Gesamtemissionen in der Praxis deshalb entsprechend erhöhen. Obwohl auch Gewebefilter für Brennstoffwassergehalte von bis zu 50% offeriert werden, wird für Gewebefilter dennoch grundsätzlich der Einsatz von trockenen Brennstoffen empfohlen. Zudem ist besonders auf einen möglichst stationären Betrieb der Feuerungsanlage mit langen Laufzeiten und wenig Anfahrszyklen zu achten. In Gewebefiltern können auch gasförmige Schadstoffe wie SO<sub>2</sub> und HCl sowie polychlorierte Dibenzo-*p*-Dioxine und Furane (PCDD/F) abgeschieden werden. Für saure Verbindungen wie HCl wird bereits durch die basische Holzasche eine gewisse Abscheidung erzielt, während für eine effiziente Abscheidung Kalk zugegeben werden kann. Eine Kalkzugabe wird teilweise auch zum Aufbau einer schützenden Schicht auf dem Filter vor Inbetriebnahme der Feuerung vorgenommen, was als Precoating bezeichnet wird. Zur Abscheidung von PCDD/F dient dagegen Herdofenkoks als Sorptionsmittel.

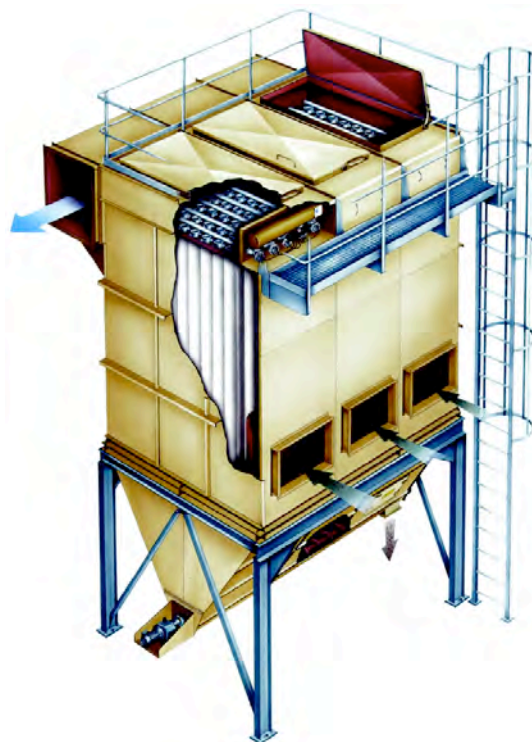


Bild 5 Gewebefilter für Leistungen unter 1 MW (Scheuch, A).

Bei einer breiten Einführung von Elektroabscheidern und Gewebefiltern bei automatischen Holzfeuerungen sind folgende Massnahmen zu beachten:

- Da tiefe Temperaturen zur Freigabe der Feinstaubabscheider vor allem beim Anfahren und bei Teillastbetrieb auftreten, ist ein möglichst stationärer Betrieb der Feuerungsanlagen sicher zu stellen.
- Die Betriebsarten mit Bypass oder ausgeschalteter Hochspannung sind auf ein Minimum zu beschränken. Für die Genehmigung sollte eine Mindestverfügbarkeit für die Feinstaubabscheidung verlangt und deren Einhaltung kontrolliert werden.
- Im Weiteren sollten auch die Abreinigung der Feinstaubabscheider und allenfalls der Kessel für den Grenzwert berücksichtigt und während der Abnahmemessung erfasst werden.

Durch diese Massnahmen werden die Anforderungen an die Planung und den Betrieb automatischer Holzfeuerungen erhöht und vor allem für kleinere Anlagen der Betriebsaufwand vergrössert. Erfahrungen von drei Anlagen zeigen jedoch, dass auch für Leistungen unter 1 MW ein zuverlässiger Betrieb mit vertretbarem Betriebsaufwand möglich ist. So waren im Kanton Thurgau während der letzten Heizperiode je eine Anlage mit 250 kW und 550 kW mit Elektroabscheider sowie eine 350 kW-Anlage mit Gewebefilter im Einsatz [5]. Bild 4 und Bild 5 zeigen den Aufbau der Abscheider, von welchen Betriebserfahrungen mit Anlagen unter 1 MW vorliegen. Während der Abnahmemessungen wurden für alle drei Anlagen Staubemissionen von unter 5 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> ausgewiesen.

### **3.2 Investitionskosten mit und ohne Feinstaubabscheider**

Bild 6 zeigt die Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage unterteilt nach Technik (Heizanlage ohne Feinstaubabscheider), Gebäude (Heizraum und Silo) sowie Feinstaubabscheider. Elektroabscheider weisen deutlich höhere Investitionskosten auf als das Gewebefilter. So kostet zum Beispiel eine 1 MW-Anlage ohne Feinstaubabscheider inklusiv Gebäude rund 1,0 Mio Franken. Mit Gewebefilter betragen die Gesamtkosten rund 1,11 Mio Franken, mit Elektroabscheider 1,18 Mio Franken. Bei Kleinanlagen wirkt sich der Einsatz eines Feinstaubabscheiders stärker auf die Gesamtkosten aus als bei Grossanlagen. Die Technik (ohne Gebäude) einer 200 kW-Anlage wird durch ein Gewebefilter um 24% und durch einen Elektroabscheider um 34% verteuert. Eine 1 MW-Anlage wird durch ein Gewebefilter um 15% und durch einen Elektroabscheider um 22% verteuert.

### **3.3 Wärmegestehungskosten mit und ohne Feinstaubabscheider**

Tabelle 2 zeigt die Wärmegestehungskosten für Holz und Heizöl, wobei für Holzfeuerungen der Einfluss von Elektroabscheidern und Gewebefiltern aufgezeigt ist. Die Resultate sind auch in Bild 7 und Bild 8 dargestellt.

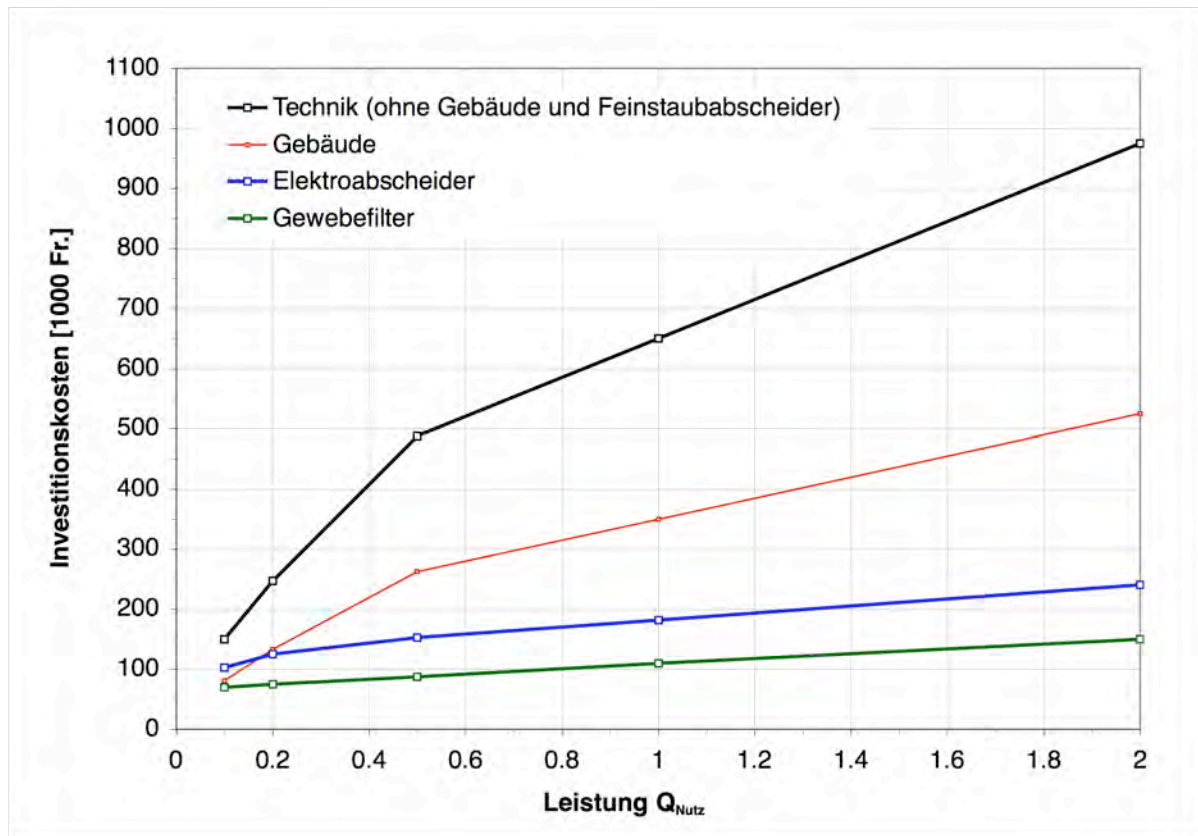


Bild 6 Investitionskosten Technik, Gebäude und Feinstaubabscheider für automatische Holzheizanlagen. Technik = Heizanlage ohne Silo und ohne Feinstaubabscheider, Gebäude = Heizraum und Silo.

Tabelle 2 Wärmegestehungskosten für Heizöl sowie für Holz mit und ohne Feinstaubabscheider sowie prozentuale Kostenerhöhung durch Feinstaubabscheider. Angaben gelten inklusive Gebäude und exklusive Wärmeverteilung für allfälliges Wärmenetz sowie für Brennstoffpreise von 5 Rp./kWh für Holz und 8 Rp./kWh für Heizöl und einen Kapitalzins von 5% p.a..

Leistung	Heizöl	Holz	Holz mit Elektroabscheider		Holz mit Gewebefilter	
	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[%]	[Rp./kWh]	[%]
100 kW	15.5	19.6	25.5	30	25.1	28
200 kW	13.9	17.3	20.9	21	20.3	17
500 kW	12.4	15.0	16.8	11	16.3	9
1 MW	11.8	12.1	13.1	8	13.0	7
2 MW	11.2	10.7	11.3	6	11.3	5

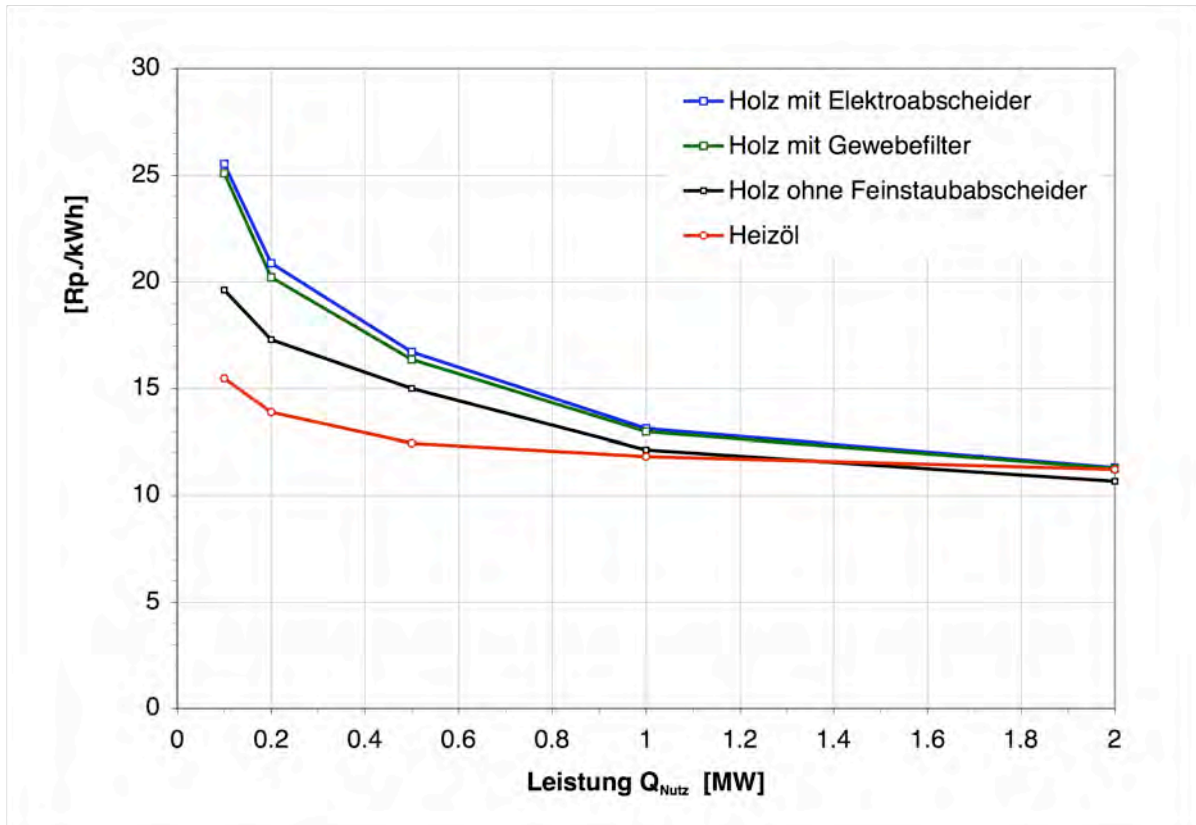


Bild 7 Wärmegestehungskosten für Heizöl sowie für Holz mit und ohne Feinstaubabscheider inklusive Gebäude und exklusive Wärmeverteilung für allfälliges Wärmenetz für Brennstoffpreise von 5 Rp./kWh für Holz und 8 Rp./kWh für Heizöl sowie einen Kapitalzins von 5% p.a.

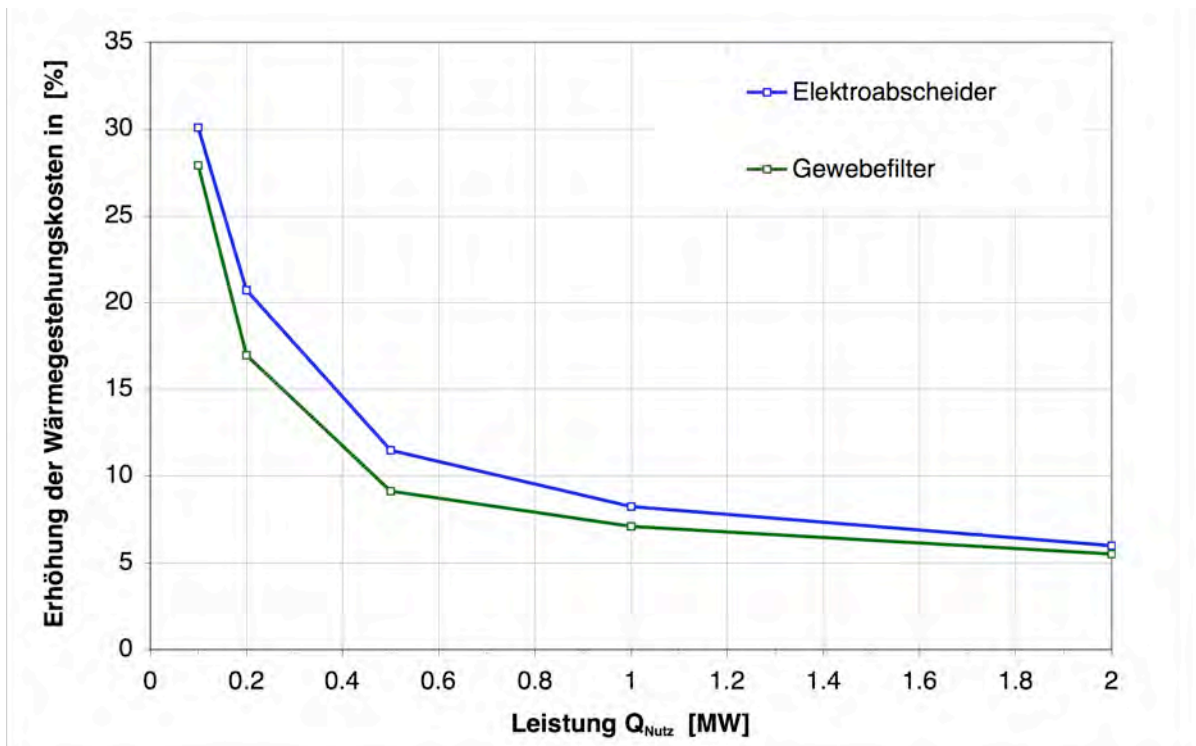


Bild 8 Prozentuale Erhöhung der Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung durch Einsatz eines Elektroabscheiders oder eines Gewebefilters.

### 3.4 Schlussfolgerungen zur Feinstaubabscheidung

Zur Feinstaubabscheidung bei Holzfeuerungen zwischen 100 kW und 2 MW kommen sowohl Trocken-Elektroabscheider als auch Gewebefilter zum Einsatz. Beide Verfahren sind von etablierten Herstellern verfügbar und zu beiden Anlagen existieren positive Betriebserfahrungen von Referenzanlagen, wenn auch erst mit einzelnen Anlagen und erst über wenige Heizperioden. Bei Einführung eines Grenzwerts von  $20 \text{ mg/m}^3$  ist davon auszugehen, dass die mit Feinstaubabscheidern ausgerüsteten Anlagen bei regulärem Betrieb Reingasemissionen deutlich unter dem Grenzwert aufweisen werden. So weisen drei Anlagen mit Elektroabscheidern oder Gewebefilter bei Abnahmemessungen Reingasswerte unter  $5 \text{ mg/m}^3$  auf.

Unter den heutigen Referenzanlagen weisen Gewebefilter für kleine Leistungen wesentlich tiefere Investitionskosten auf als Elektroabscheider, verursachen jedoch höhere Betriebskosten infolge des Druckverlusts, des Bedarfs an Druckluft und der beschränkten Lebensdauer der Filter. Für Leistungen bis 1 MW resultieren für das Gewebefilter 15% bis 20% tiefere Gesamtkosten als für Elektroabscheider. Diese Differenz ist mit den Unsicherheiten der Betriebskosten allerdings als gering zu bewerten und sie berücksichtigt nicht, dass Gewebefilter höhere Anforderungen an die Feuerung und den Betrieb stellt.

Für eine einwandfreie Feinstaubabscheidung ist ein korrekter Betrieb der Feuerungsanlagen mit einem für die Feuerung zugelassenen Brennstoff entscheidend. Gewebefilter sind besonders heikel in Bezug auf Taupunktunterschreitung, da dies Verklebungen und Schäden verursachen kann. Aus diesem Grund werden Gewebefilter in der Regel nur für den Einsatz von trockenen Brennstoffen und bei möglichst stationärem Betrieb der Feuerung empfohlen. Im Weiteren sind strengere Anforderungen an die Ausbrandqualität der abzuscheidenden Stäube zu erfüllen. Während für Elektroabscheider ein Gehalt von maximal 10 Gewichtsprozent zulässig ist, ist für Gewebefilter ein Gehalt von maximal 2 Gewichtsprozent einzuhalten, was für Heizanlagen als strenge Anforderung bewertet wird.

Bei beiden Verfahren besteht die Gefahr, dass die Staubemissionen im Praxisbetrieb durch die periodische Abreinigung sowie durch den Bypass-Betrieb oder die Abschaltung der Hochspannung bei Unterschreitung der Mindesttemperatur erhöht werden. Betriebszustände mit zu tiefen Abgastemperaturen treten vor allem beim Anfahren und bei Schwachlastbetrieb auf. Bei einer breiten Praxiseinführung von Feinstaubabscheidern ist deshalb sicher zu stellen, dass unwirksame Zustände auf ein Minimum reduziert und geeignet überwacht sowie eine Mindestverfügbarkeit des Abscheiders verlangt werden. Im Weiteren sollten auch die Abreinigung der Feinstaubabscheidung und die allfällig vorhandene automatische Kesselabreinigung erfasst werden.

Mit diesen Einschränkungen wird die Technik zur Feinstaubabscheidung bei automatischen Holzfeuerungen im Bereich ab rund 200 kW, sicher jedoch ab rund 400 kW als für eine breite Praxiseinführung verfügbar beurteilt. Sowohl Elektroabscheider als auch Gewebefilter sind als etablierte Technik auf dem Markt verfügbar, können einen Staubgrenzwert von  $20 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  garantieren und in der Praxis deutlich unterschreiten. Selbst für Anlagen von 100 kW können entsprechende Abscheider eingesetzt werden. Die meisten derzeit angebotenen Systeme sind allerdings für grössere Leistungen ausgelegt und beim Einsatz für 100 kW-Anlagen entsprechend teuer.

Sofern nur Produkte etablierter Hersteller berücksichtigt werden, weist das Gewebefilter im Leistungsbereich unter 1 MW geringfügig tiefere Gesamtkosten auf als ein Elektroabschei-

der. Die Investitionskosten der Technik werden für eine 200 kW-Anlage durch ein Gewebefilter um rund 24% und durch einen Elektroabscheider um rund 34% erhöht. Für eine 1 MW-Anlage beträgt die Kostenerhöhung rund 15% für ein Gewebefilter und rund 22% für einen Elektroabscheider.

Für eine 200 kW-Heizanlage verursacht ein Gewebefilter Zusatzkosten von 3,0 Rp./kWh, ein Elektroabscheider von 3,6 Rp./kWh. Wärme aus einer 200 kW-Ölheizung ist im Vergleich zu einer Holzheizung ohne Feinstaubabscheider rund 3,4 Rp./kWh kostengünstiger. Die Feinstaubabscheidung führt somit zu rund einer Verdopplung der Mehrkosten für Wärme aus Holz im Vergleich zu Heizöl. Für Anlagen mit 500 kW verteuert ein Feinstaubabscheider die Wärme um rund 1,3 bis 1,8 Rp./kWh, für Anlagen mit 1 MW um rund 1 Rp./kWh.

Die meisten von etablierten Herstellern auf dem Markt angebotenen Systeme sind für Leistungen ab 300 kW bis 500 kW konzipiert. Vor allem für Leistungen unter 500 kW besteht deshalb voraussichtlich noch ein Potenzial zur Kostenreduktion, welches für Elektroabscheider bis zu 50% betragen kann. Als Alternative ist zudem die Entwicklung von Metallgewebefiltern denkbar, welche im Vergleich zu Gewebefiltern deutlich unempfindlicher und kostengünstiger sein könnten. Zu beiden Techniken sind Entwicklungen im Gang (z.B. [22–25]).

Die Einführung verschärfter Staubgrenzwerte wird teilweise auch zu erhöhten Anforderungen bezüglich Feuerungstechnik und Anlagenregelung führen, da eine hohe Ausbrandqualität und ein möglichst stabiler Betrieb gewährleistet werden müssen. Bei Anlagen unter 1 MW liegen dazu bis anhin erst einzelne und bis anhin weitgehend positive Erfahrungen vor, während Erfahrungen von grösseren Anlagen aus der Praxis zum Teil auch aufzeigen, dass die Anforderungen an Feuerung und Betrieb heute teilweise nicht eingehalten werden.

## 4 Wärmeerzeugung und Wärmekraftkopplung

Bild 9 zeigt die Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung mit 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr, wobei der Einfluss der Brennstoffpreise für drei Niveaus dargestellt ist. Ein direkter Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Wärmeerzeugung und Anlagen zur Wärmekraftkopplung oder Kraftwerken ist nur bedingt möglich, da einerseits Strom und Wärme zu unterscheiden sind und andererseits für WKK-Anlagen und Kraftwerke deutlich längere Vollbetriebsdauern vorausgesetzt werden als für Heizanlagen. Bild 10 zeigt deshalb als Referenzfall für eine typische WKK-Anwendung die Wärme- und Stromgestehungskosten einer WKK-Anlage mit 4000 Vollbetriebsstunden pro Jahr. Bild 11 zeigt zum Vergleich die Kosten für 2000 Vollbetriebsstunden, was einem Betrieb als Heizanlage entsprechen würde. In Bild 12 sind die Verhältnisse für 6000 Vollbetriebsstunden ausgewiesen, was der Auslegung des nachfolgend behandelten Kraftwerks entspricht. Aus dem Vergleich der verschiedenen Anwendungen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Den grössten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Anlagen zur Wärmeerzeugung und Wärmekraftkopplung mit Holz haben folgende Faktoren:
  1. Die Endenergiepreise für Holz im Vergleich zu Konkurrenz-Energieträgern, was für die Wärmeerzeugung am Beispiel von Heizöl gezeigt wird.
  2. Die Vollbetriebsstundenzahl. Für Wärmeerzeugung ist ein Betrieb von mindestens 2000 h/a, besser von 2500 h/a anzustreben, was für monovalente Heizanlagen möglich ist, während für WKK-Anlagen mindestens 4000 h/a anzustreben sind. WKK-An-

lagen kommen daher vor allem bei Prozesswärmebedarf sowie im Fall von Heizwärme zur Grundlastabdeckung in Frage. In der betrachteten Leistungsgrösse sollten WKK-Anlagen zudem wärmegeführt betrieben werden.

3. Die Kalkulationsdauer und der Kalkulationszinssatz. Die Finanzierungsart und die Anlagenlebensdauer beeinflussen die Kosten für Holzanlagen stärker als für fossile Anlagen, da die Kapitalkosten bei Holzanlagen einen höheren Anteil an den Gesamtkosten aufweisen.
- Bei den heutigen Energiepreisen von 5 Rp./kWh für Holz und 8 Rp./kWh für Heizöl ist Wärme aus Holz ohne Feinstaubabscheidung bei 100 kW rund 26%, mit Abscheidung jedoch 65% teurer als Wärme aus Heizöl. Für eine 1 MW-Anlage ist Wärme aus Holz ohne Feinstaubabscheidung derzeit rund 3% teurer oder somit praktisch gleich teuer wie Wärme aus Heizöl. Die Feinstaubabscheidung, welche für diese Anlagengrösse in naher Zukunft erforderlich wird, erhöht den Kostenunterschied zwischen Holz und Heizöl auf rund 12%. Der Wirtschaftlichkeitsvergleich gilt dabei für die Realisierung eines Neubaus auf erschlossenem Grundstück in der Ebene. Zur Beurteilung der effektiven Heizkosten für einen Endverbraucher sowie für einen Vergleich zwischen Holz und Heizöl ist zu beachten, dass in den ausgewiesenen Kosten keine Wärmeverteilung berücksichtigt ist. Die ausgewiesenen Kosten gelten somit nur für einen Einzelverbraucher mit der angegebenen Leistung. Für diesen Fall ist ein direkter Vergleich zwischen Holz und Heizöl möglich. Im Falle von Einzelverbrauchern mit kleinerem Leistungsbedarf sind für Holz dagegen noch die Zusatzkosten für die Wärmeverteilung zu berücksichtigen, während für Heizöl eine dezentrale Anlage kleinerer Leistung angenommen werden muss. So können zum Beispiel für einen Wärmeverbraucher mit 100 kW die Wärmegestehungskosten einer 100 kW-Ölheizung mit den Kosten für die Wärmegestehung einer grösseren Holzheizung plus den Kosten für die Wärmeverteilung von zusätzlich rund 2 bis 4 Rp./kWh verglichen werden.
  - Da Holz-Anlagen kapitalintensiv sind, weisen sie eine stärkere Kostendegression in Abhängigkeit der Leistung auf als Ölheizungen. Entsprechend ist auch der Anteil der Brennstoffkosten an den Gesamtkosten bei Holzheizungen deutlich geringer als bei Ölheizungen gleicher Leistung. Für Wärme aus Holz machen die Brennstoffkosten für eine 100 kW-Anlage weniger als 30% der Gesamtkosten aus, für Wärme aus Heizöl dagegen rund 60%. Bei einer 1 MW-Anlage verursachen die Brennstoffkosten für Holz rund 50%, für Heizöl dagegen rund 80% der Gesamtkosten. Die Kostendegression für Wärme aus Holz wird durch Einsatz eines Feinstaubabscheiders noch deutlich verstärkt.
  - Eine WKK-Anlage mit 0,5 MWe und knapp 5 MW<sub>tot</sub> erreicht bei einem Betrieb von 4000 h/a gleiche ungewichtete Energiegestehungskosten wie eine 1 MW-Heizanlage mit Feinstaubabscheidung und 2000 h/a Betrieb. Die ungewichteten Gestehungskosten für Wärme und Strom betragen dabei zwischen 10 Rp./kWh für rund 26 MW Gesamtleistung und 13 Rp./kWh für rund 4 MW Gesamtleistung, wobei die Gesamtleistung die Summe von Wärme- und Stromproduktion bezeichnet. Der Einsatz einer WKK-Anlage ab 4 MW Gesamtleistung anstelle einer Heizanlage ist damit ab 4000 Vollbetriebsstunden sinnvoll, wenn Strom höher bewertet wird als Wärme bereits bei geringeren Leistungen oder kürzerer Betriebsdauer.

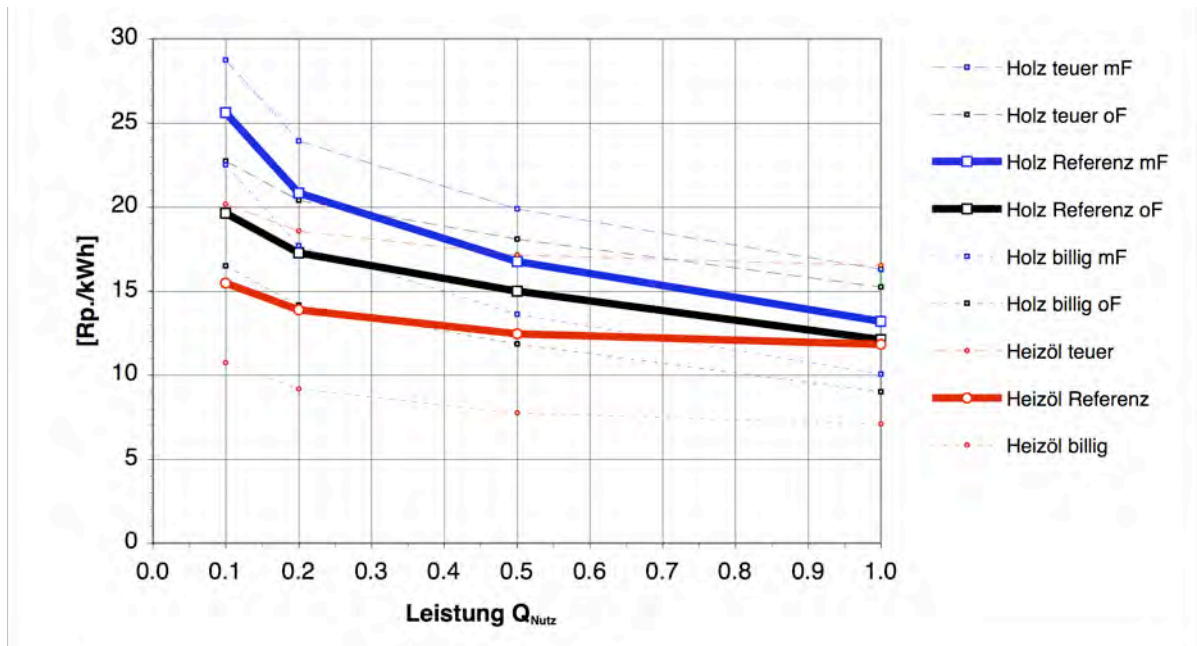


Bild 9 Wärmegestehungskosten mit Holz und Heizöl für 2000 h/a.  
 oF = ohne Feinstaubabscheider, mF = mit Feinstaubabscheider.  
 Holzpreis teuer, Referenz, billig: 7,5 / 5 / 2,5 Rp./kWh  
 Heizölpreis teuer, Referenz, billig: 12 / 8 / 4 Rp./kWh.

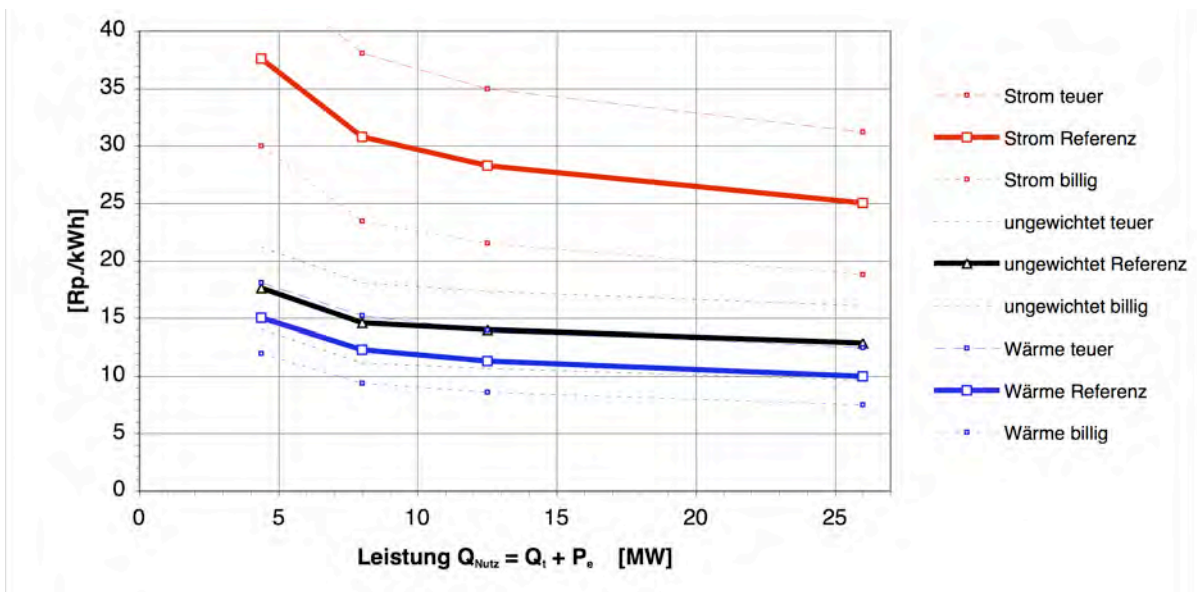


Bild 10 Wärme- und Stromgestehungskosten für 4000 h/a.  
 Holzpreis teuer, Referenz, billig: 7,5 / 5 / 2,5 Rp./kWh.  
 „ungewichtet“: Strom und Wärme sind gleich bewertet.  
 „Strom“ bzw. „Wärme“: Strom ist mit Faktor 2,5 bewertet und somit 2,5 mal so teuer wie Wärme. Die Nutzleistung entspricht der Summe aus Nutzwärmeleistung plus elektrischer Nutzleistung. Die berechneten Fälle (Punkte im Diagramm) entsprechen einer Anlage von 0,5 MWe, 1 MWe, 2 MWe und 5 MWe.

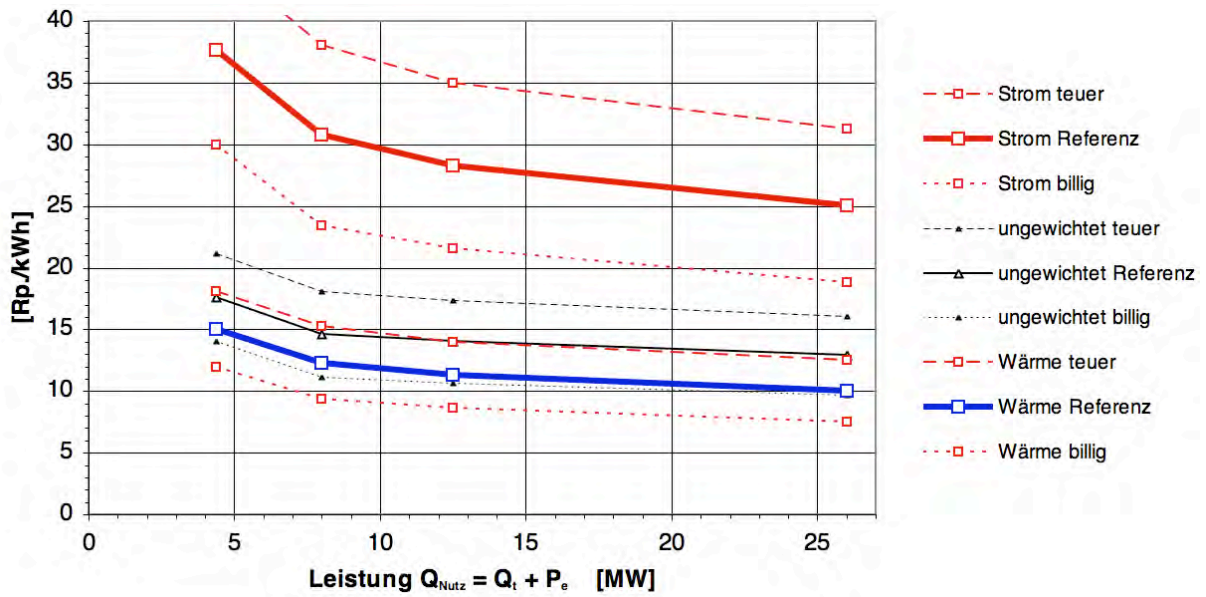


Bild 11 Wärme- und Stromgestehungskosten für 2000 h/a wie bei der Heizanlage.  
Holzpreis teuer, Referenz, billig: 7,5 / 5 / 2,5 Rp./kWh.

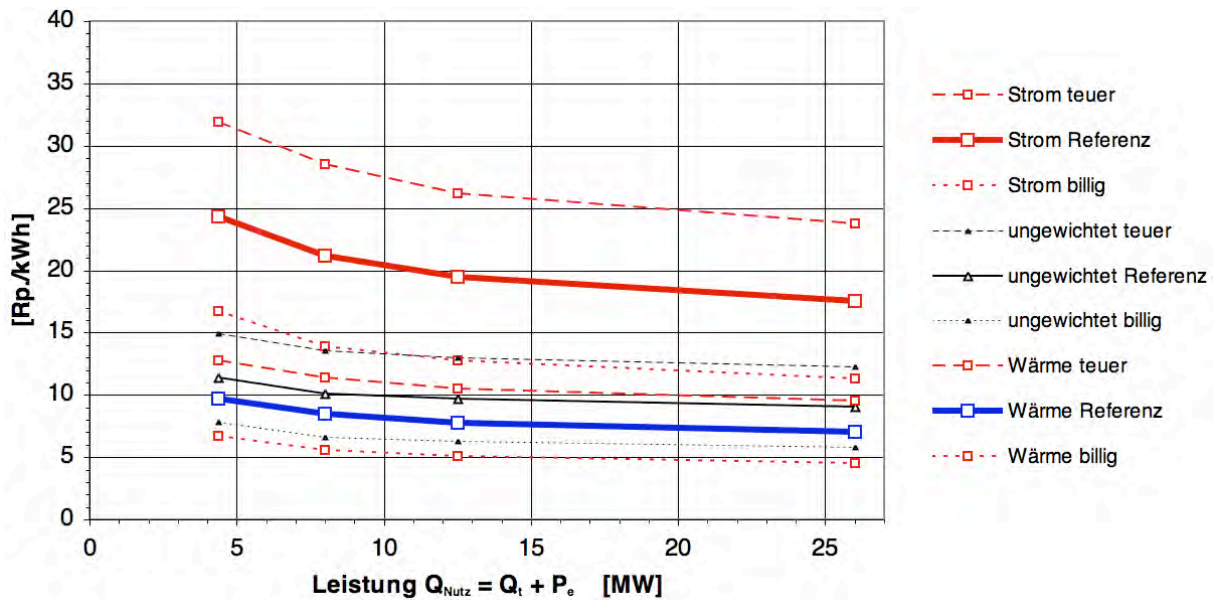


Bild 12 Wärme- und Stromgestehungskosten für 6000 h/a wie beim Kraftwerk.  
Holzpreis teuer, Referenz, billig: 7,5 / 5 / 2,5 Rp./kWh.

## 5 Stromerzeugung in Holzgas-Kombikraftwerk

### 5.1 Technik

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 genommen Kraftwerks zeigt [26]. Einen Wirkungsgradsprung auf bis über 40% verspricht ein Holzgas-Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine, welches eine vorge-schaltete Holzvergasung voraussetzt und als Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) bezeichnet wird. Diese Technik wurde im Rahmen von Forschungs- und Demonstrationsprojekten bis zur Schwelle der Markteinführung entwickelt. In Schweden existiert eine Demonstrationsanlage, welche über mehrere Jahre und während über 10 000 Stunden mit verschiedenen Biomasse-Brennstoffen betrieben wurde (Bild 13) [14]. Dieses Holzkraftwerk verfügt über eine Druckvergasung bei 20 bis 25 bar in einer zirkulierenden Wirbelschicht und eine Leistung von 6 MWe, wovon 4 MWe von der Gasturbine und 2 MWe von der Dampfturbine produziert werden. Bei einer Wärmeauskopplung von bis zu 9 MW wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 32% bis 37% ausgewiesen. Für ein grösseres Kraftwerk dieser Bauart ist ein Wirkungsgrad von gegen 45% möglich. Die Machbarkeit dieser Technologie wird als grundsätzlich nachgewiesen bewertet, obwohl bis heute kein kommerzielles Kraftwerk dieser Bauart realisiert wurde. Für eine Kommerzialisierung wird eine Mindestgrösse von rund 40 MWe vorgeschlagen. Eine weitere Steigerung der Leistung verspricht allerdings eine nochmalige Verbesserung des Wirkungsgrads und der Wirtschaftlichkeit. Für Holz, das eine geringere Energiedichte als fossile Energieträger aufweist und regional nur begrenzt verfügbar ist, kann die Anlagengrösse allerdings durch die Beschränkung der Transportdistanzen limitiert werden.



Bild 13 Demonstrationsanlage des Holzgas-Kombikraftwerks in Värnamo (Schweden) [14].

Da die für Erdgas standardmässig eingesetzte Technik des Kombikraftwerks auch für Holzgas geeignet ist, kommt als Alternative zu einer unabhängigen Stromerzeugung aus Erdgas und Holz auch eine kombinierte Nutzung in Frage. Gegenüber zwei separaten Kraftwerken verspricht dies verschiedene Vorteile. Zum Einen kann der Wirkungsgrad der Holznutzung wegen der Grössenabhängigkeit durch die Angliederung an ein Erdgaskraftwerk erhöht werden. Zum Andern kann die Logistik zur Energieholzbeschaffung vorerst auf eine kurzfristig realisierbare Holzmenge ausgelegt und später allenfalls erhöht werden. Aus Erfahrungen von anderen Anlagen mit kombinierter Nutzung von fossilen Brennstoffen und Biomasse wird vorgeschlagen, dass Holz für die Anwendung in einem Kraftwerk mit Holz und Erdgas etwa 20% der Kraftwerksleistung abdeckt. Eine geringere Holzleistung verursacht unverhältnismässig hohe Kosten, während ein höherer Anteil Holz durch eine spätere Erhöhung der Vergasungskapazität erzielt werden kann, jedoch nicht von Beginn an realisiert werden muss. Zur kombinierten Nutzung von Holzgas und Erdgas kommen verschiedene Konzepte in Frage. Gereinigtes Holzgas und Erdgas können entweder in einer Gasturbine genutzt oder in auf beide Brennstoffe je separat ausgelegten Gasturbinen mit einem gemeinsamen Dampfteil eingesetzt werden. Bild 14 zeigt das Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes und gemeinsamer Gasturbine für Holzgas und Erdgas. Ohne Zufuhr von Erdgas entspricht die Anlage einem reinen Holzgas-Kombikraftwerk, ohne den Holzteil einem konventionellen Erdgas-Kombikraftwerk.

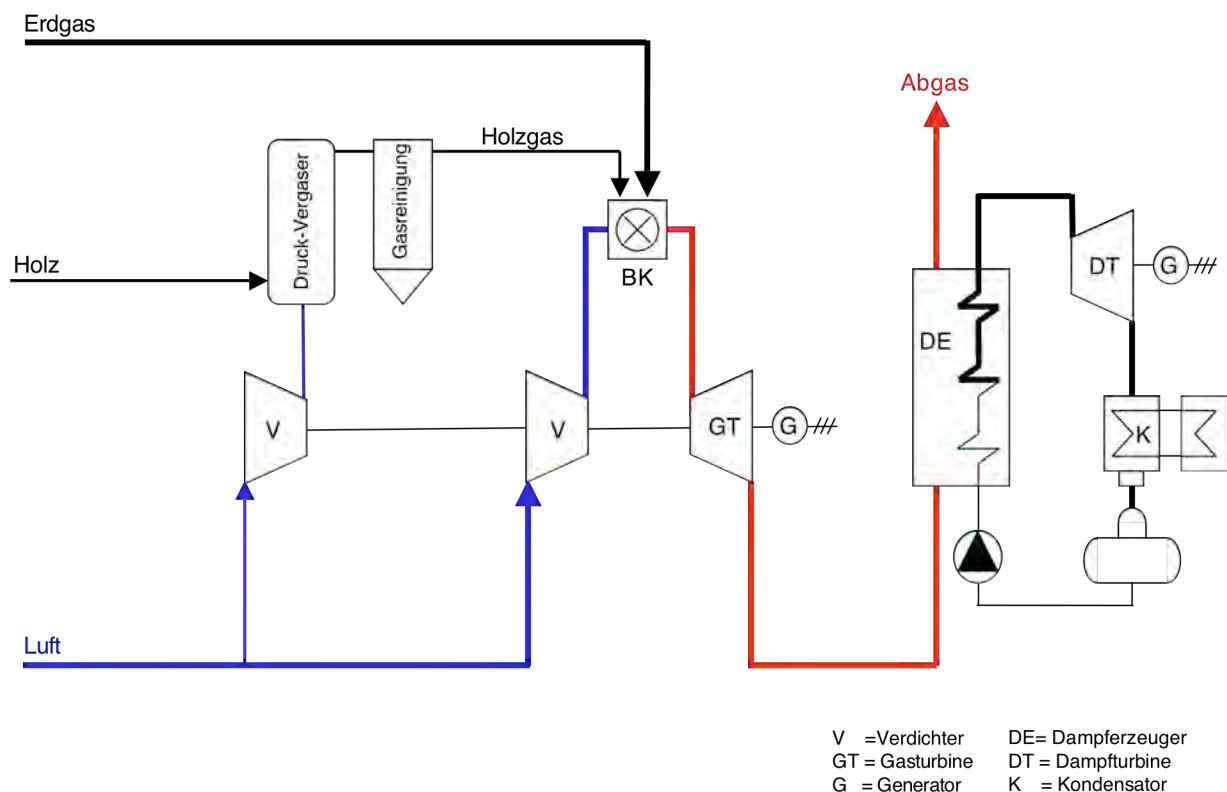


Bild 14 Konzept eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks mit Druckvergasung des Holzes in einer zirkulierenden Wirbelschicht und gemeinsamer Nutzung von Erdgas und gereinigtem Holzgas in einer Gasturbine [11].

## 5.2 Wirkungsgrad und Investitionskosten

Über den Wirkungsgrad und die Investitionskosten von Kombikraftwerken liegen Angaben aus der Literatur vor [14–21, 27]. Im Fall der Biomasse-Vergasung stützen sich diese unter anderem auf die Demonstrationsanlage in Schweden und sie decken vor allem Leistungen unter 50 MWe ab, während für grössere Leistungen auch 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 Zufeuerung 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. Im Weiteren wird für die Berechnungen angenommen, dass geeignete Gasturbinen in den jeweiligen Leistungsklassen verfügbar sind. Für die Realisierung eines Kraftwerks müsste die Anlagenauslegung dagegen auf die im Markt verfügbaren Maschinen angepasst werden. Mit diesen Annahmen resultieren für ein Holzgas/Erdgas-Kraftwerk ein Wirkungsgrad gemäss Bild 15 sowie spezifische Investitionskosten gemäss Bild 16. 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-Axe 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 Bild 15 zur Produktion von 50 MWe aus Holz durch die Kombination ein Wirkungsgrad von 44,0% anstelle von 42,0% erzielt, was einer Verbesserung um rund 5% entspricht.

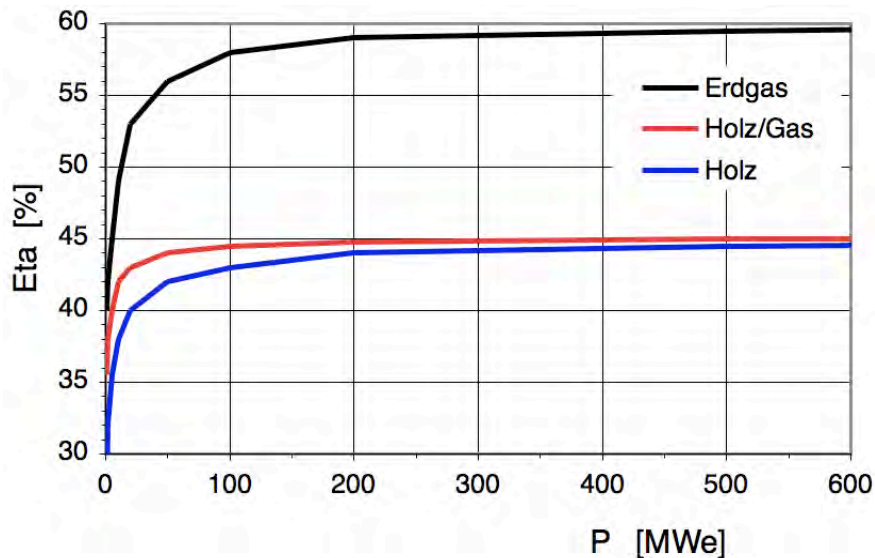


Bild 15 Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Holz in Funktion der elektrischen *Holz-Leistung* für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas, rot) mit 20% Holzanteil und für ein reines Holzgas-Kombikraftwerk (Holz, blau). Als Vergleich ist der Wirkungsgrad eines reinen Erdgas-Kombikraftwerks als Funktion der *Erdgasleistung* dargestellt (Erdgas, schwarz). Für die Fälle Holz und Holz/Erdgas bezeichnet die Leistung auf der x-Axe somit die Holzleistung, für den Erdgas-Fall dagegen die Erdgasleistung. Lesebeispiel: Zur Produktion von 50 MWe aus Holz wird in einem Holzkraftwerk ein Wirkungsgrad von 42,0% erzielt (blaue Kurve 50 MWe). Wenn dagegen Holz an ein Erdgaskraftwerk angegliedert wird, steigt der Wirkungsgrad zur Holzverstromung auf 44,0% (rote Kurve 50 MWe). Der Erdgasteil weist dabei eine Leistung von 200 MWe auf und erzielt einen Wirkungsgrad von 59,0% (schwarze Kurve, 200 MWe).

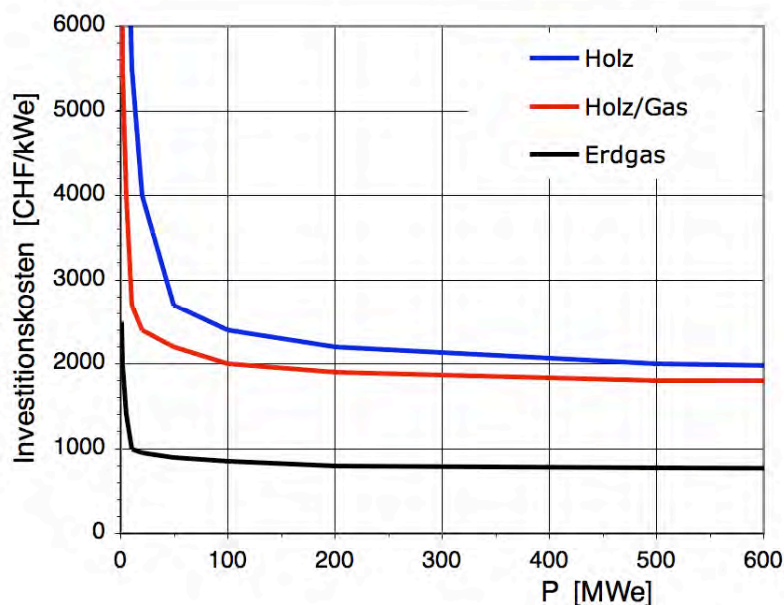


Bild 16 Spezifische Investitionskosten für ein Holzgas-Kombikraftwerk (Holz) und ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk (Holz/Gas) mit gleicher Holzleistung im Vergleich zu den Investitionskosten eines Erdgas-Kombikraftwerks. Für die Fälle Holz und Holz/Erdgas bezeichnet die Leistung auf der x-Axe die Holzleistung, für den Erdgas-Fall die Erdgasleistung.

### 5.3 Transportaufwand

Die Transportdistanz für das Energieholz nimmt mit zunehmender Anlagengrösse zu. Wenn eine gleichmässige Holzverteilung vorausgesetzt wird, steigt die Transportdistanz mit der Wurzel der Anlagenleistung. Bild 17 zeigt die erwartete mittlere Transportdistanz für die Versorgung mit Altholz, mit Wald- und Restholz, sowie mit Energieholz als Summe aller Sortimente in der Schweiz. Wenn sämtliches zusätzlich verfügbares Energieholz in einem Holzkraftwerk eingesetzt wird, kann eine elektrische Leistung von 628 MWe bei einer Transportdistanz von rund 230 km realisiert werden. Zwei Anlagen mit je 300 MWe ergeben 160 km Transportdistanz und vier Anlagen mit 150 MWe rund 120 km. Da eine leere Rückfahrt vorausgesetzt wird, entspricht der Radius des Einzugsgebiets der Hälfte der Transportdistanz. Wenn die Anlagen nur mit Wald- und Restholz (also ohne Altholz) betrieben werden, ergeben sich nur unerheblich längere Transportdistanzen. Wird dagegen eine Anlage allein auf Altholz ausgelegt, so ergeben sich mehr als zweimal so lange Transportdistanzen.

Zur Beurteilung des Einflusses des Transportaufwands ist in Bild 18 der Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung des Treibstoffverbrauchs bei reinem Strassentransport ausgewiesen. Für den Lastwagentransport ist ein Dieserverbrauch von 40 Litern pro 100 km angenommen und Diesel ist zur Berücksichtigung der grauen Energie mit einem Faktor 1,25 bewertet. Die Grafik zeigt, dass der Energieaufwand für den Transport des Holzes den Netto-Wirkungsgrad zwar reduziert, dass jedoch der dank zunehmender Anlagengrösse höhere Kraftwerkwirkungsgrad den Transportaufwand bis zu rund 300 MWe kompensiert, so dass zur Nutzung des gesamten Potenzials für die Schweiz der Bau von zwei bis vier Kraftwerken optimal wäre. Zur Nutzung des nicht verfügbaren Holzes entspricht dies mittleren Einzugsgebieten mit einem Radius von 80 km respektive 60 km.

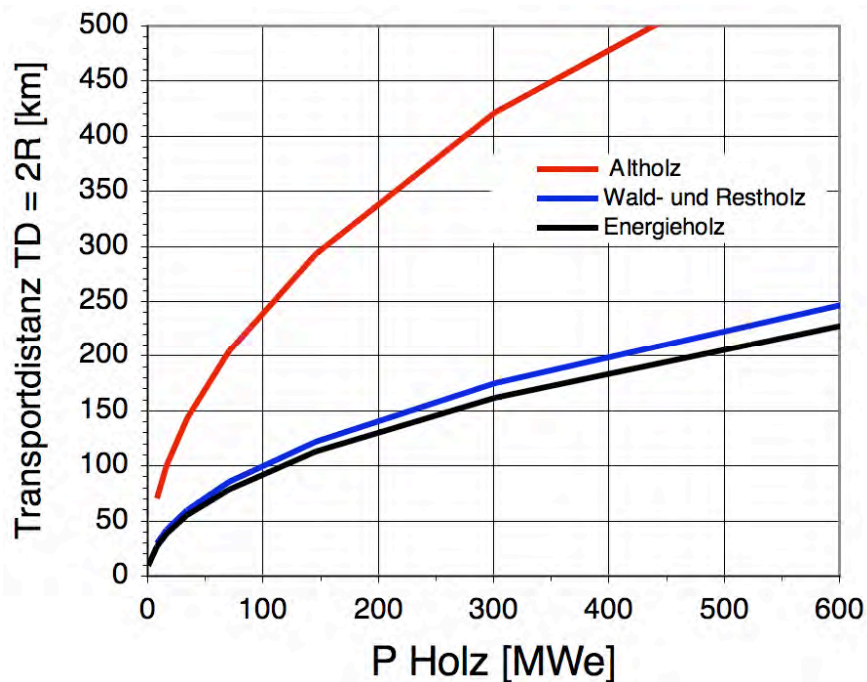


Bild 17 Mittlere Transportdistanz für die Energieholzdichte der Schweiz in Abhängigkeit der Holzkraftwerksleistung. Für den Transport ist eine Rückfahrt des leeren Lastwagens angenommen, so dass die Transportdistanz dem zweifachen Radius des Einzugsgebiets.

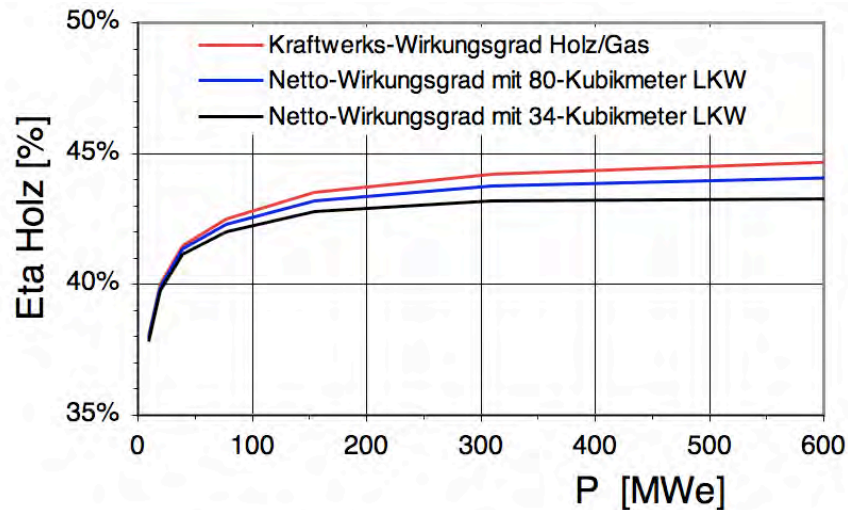


Bild 18 Wirkungsgrad eines Holzgas-Kombikraftwerks in Funktion der elektrischen Leistung sowie Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung des Transportenergieaufwands des Holzes mit 80-Kubikmeter LKW (Schubboden) und mit 34-Kubikmeter LKW (Container).

## 5.4 Potenzial

Die Erhebungen zum Energieholzpotenzial sind in der Einleitung beschrieben und in Tabelle 1 zusammengefasst. Demnach entspricht das heute nicht genutzte Zusatzpotenzial an Energieholz rund 8400 GWh Endenergie pro Jahr. Für ein auf dieses Potenzial ausgelegtes und während 6000 Stunden pro Jahr betriebenes Kraftwerk ergibt dies eine zugeführte Leistung von 1400 MW. Dies ermöglicht zum Beispiel den Betrieb von zwei Holzgas-Kombikraftwerken mit einer Leistung von je rund 300 MWe und einer Stromproduktion von zusammen 3700 GWh (Bild 19). Für vier Kraftwerke mit 150 MWe resultiert als Folge der tieferen Wirkungsgrade eine geringfügig reduzierte Stromproduktion von 3640 GWh pro Jahr. Beim heutigen Elektrizitätsverbrauch der Schweiz von 56 000 GWh/a könnte das derzeit nicht genutzte Holz somit gut 6,5% der Stromversorgung decken. Wenn vorab ein Kraftwerk mit 150 MWe Holzleistung für einen Viertel des Zusatzpotenzials gebaut wird, könnte eine spätere Erhöhung der Holznutzung zum Ersatz von Erdgas im bestehenden Kraftwerk, für weitere Kraftwerke oder für zusätzliche Holzheizungen eingesetzt werden.

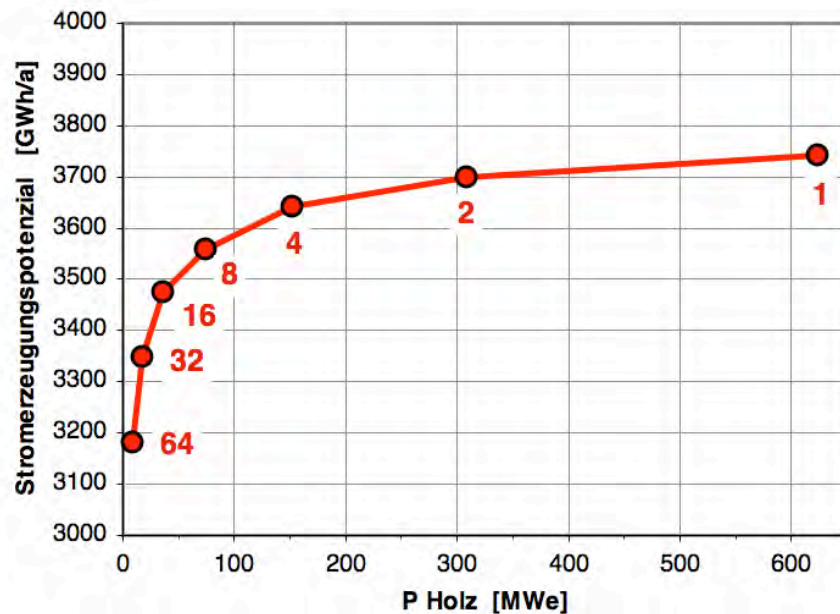


Bild 19 Potenzial zur Stromerzeugung aus Holz in der Schweiz mit bis heute nicht genutztem Zusatzpotenzial an Holz in Funktion der Holzleistung je Kraftwerk. Die Zahlen im Diagramm bezeichnen die Anzahl Kraftwerke zur Nutzung des gesamten Zusatzpotenzials. Eine Aufteilung auf mehr als vier Kraftwerke mit Leistungen von weniger als 150 MWe ist energetisch und ökonomisch unvorteilhaft.

## 5.5 Stromgestehungskosten

Bild 20 zeigt die Stromgestehungskosten für Holz (Waldhackschnitzel), Restholz und Altholz 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, was mit „Holz“ gekennzeichnet ist und denjenigen für ein Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk, was mit „Holz/Erdgas“ gekennzeichnet ist.

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

Für Erdgas ist als Berechnungsbeispiel ein Preis von 7 Rp./kWh angenommen. Die Stromgestehungskosten betragen damit rund 12 bis 13 Rp./kWh und sind geringfügig höher als für Restholz, jedoch etwas tiefer als für Waldholz. Für Erdgas sind die Stromgestehungskosten in Bild 20 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.

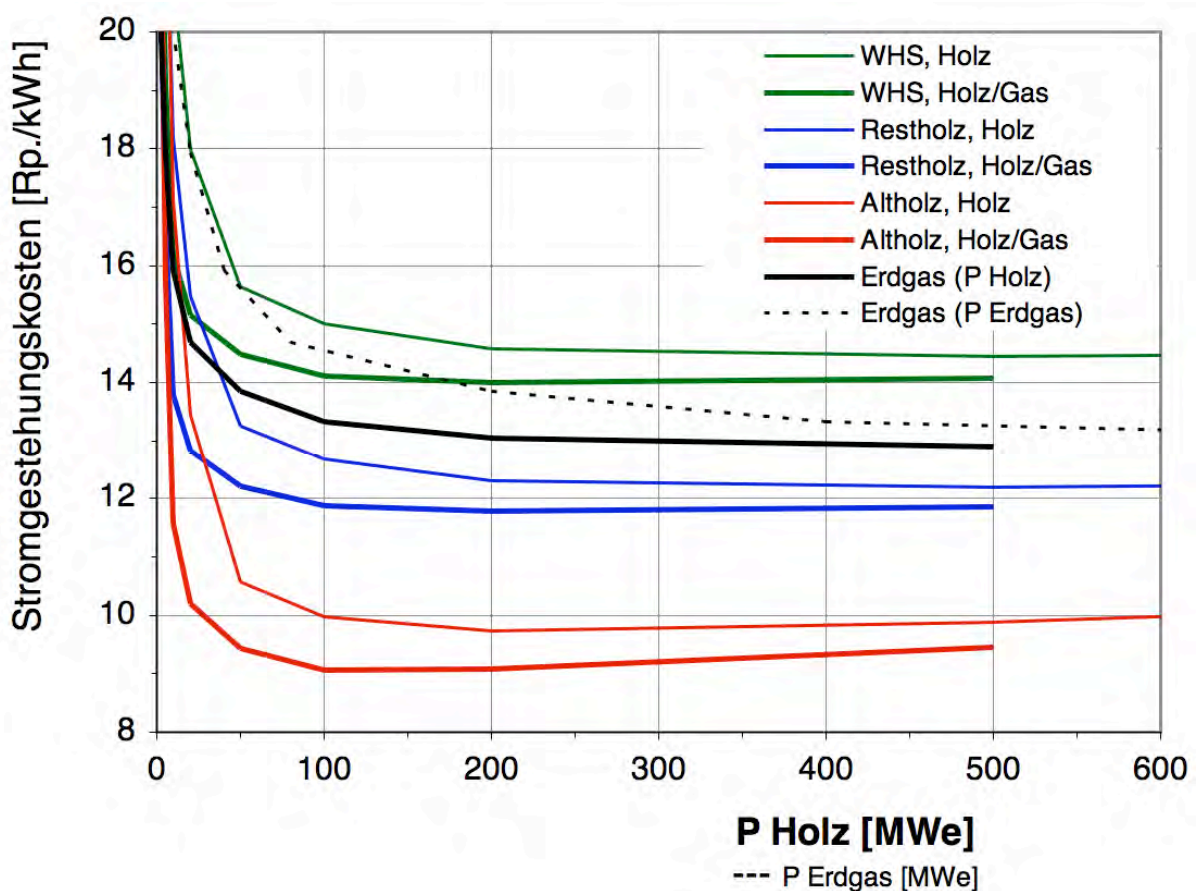


Bild 20 Stromgestehungskosten in Funktion der elektrischen Leistung. Brennstoffpreise: Erdgas 7 Rp./kWh, Waldholz 5 Rp./kWh, Restholz 4 Rp./kWh, Altholz 2 Rp./kWh.  
P Holz = Kraftwerksleistung Holz = 20% der Gesamtleistung,  
P Erdgas = Kraftwerksleistung Erdgas = 80% der Gesamtleistung,  
WHS, Holz = 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).

## 5.6 Emissionen

Die thermische Nutzung biogener Brennstoffe verursacht Emissionen an Feinstaub, Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenwasserstoffen (KW), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sowie bei belastetem Holz an Dibenzo-*p*-Dioxinen und -Furanen (PCDD/F).

Feinstaub: Damit ein Holzgas-Kraftwerk zuverlässig betrieben werden kann und die Gasturbine nicht beschädigt wird, darf das als Gasturbinen-Brennstoff eingesetzte Holzgas nur sehr geringe Mengen an Partikeln und Alkalimetallen enthalten. Das Rohgas aus der Wirbelschichtvergasung wird dazu in einer Gasreinigung mit Feinstaubabscheidung behandelt. Entsprechend weist auch das Abgas nach Gasturbine nur geringe Konzentrationen an anorganischem Feinstaub auf. Gleichzeitig gewährleistet die annähernd vollständige Verbrennung des Holzgases niedrige Gehalte an organischen Partikeln. Entsprechend weist ein Holzgas-Kombikraftwerk typische Staubemissionen von weniger als  $1 \text{ mg/m}^3$  auf [27]. Bei Feuerungsanlagen kann dieser Wert nur mit einer sehr effizienten Feinstaubabscheidung wie zum Beispiel einem Gewebefilter erzielt werden. Übliche industrielle Anlagen mit Elektroabscheidern weisen dagegen rund eine Grössenordnung höhere Staubemissionen auf, während handbeschickte Holzfeuerungen sowie automatische Holzfeuerungen ohne Feinstaubabscheidung rund zwei Grössenordnungen höhere Staubemissionen verursachen. Wenn Holz anstatt in Feuerungen ohne Feinstaubabscheider in einem Holzgas-Kombikraftwerk verwertet wird, kann die Feinstaubbelastung somit auf einen Bruchteil reduziert werden.

Kohlenwasserstoffe und PCDD/F: Auf Grund der guten Verbrennungsbedingungen ist davon auszugehen, dass auch die Emissionen an Kohlenwasserstoffen und PCDD/F auf tiefem Niveau sind. So werden PCDD/F-Emissionen von weniger als  $0,01 \text{ ng TE/m}^3$  ausgewiesen [27].

Stickoxide: Ohne Zusatzmassnahmen wird ein Teil des Brennstoffstickstoffs, welcher im Rohgas vorwiegend als Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) vorliegt, in der Brennkammer oxidiert und führt so zu Stickoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ). Für Waldhackschnitzel mit einem Stickstoffgehalt von 0,1 bis 0,2 Gew.-% ist mit rund 120 bis  $180 \text{ mg/m}^3$  (bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) zu rechnen, für Biomasse mit 0,5 bis 1 Gew.-% mit rund 300 bis  $500 \text{ mg/m}^3$  [14, 27]. Diese Werte sind auf ähnlichem Niveau wie bei Holzfeuerungen. Beim Bau von Kraftwerken in der vorgeschlagenen Leistungsklasse sind jedoch Massnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung möglich. Nebst Ausschöpfung von Primärmassnahmen in der Gasturbinenbrennkammer bietet sich dank der geringen Gehalte an Staub und weiteren Schadstoffen eine katalytische Entstickung der Abgase an. Daneben kommt aber auch eine  $\text{NH}_3$ -Abscheidung im Rohgas in Frage. Mit einer oder mehrerer dieser Massnahmen sind Emissionswerte an  $\text{NO}_x$  von deutlich unter  $80 \text{ mg/m}^3$  möglich.

## 5.7 Schlussfolgerungen zu Holzgas-Kombikraftwerken

Die technische Machbarkeit der Holzvergasung und Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine wurde im Demonstrationsstadium gezeigt und verspricht mit über 40% die derzeit höchsten Wirkungsgrade zur Stromerzeugung aus Holz bei gleichzeitig sehr geringen Emissionen an Feinstaub und – wenn  $\text{NO}_x$ -mindernde Massnahmen verlangt werden – auch an Stickoxiden. Die vorgestellte Abschätzung zeigt, dass für die Schweiz bei einem für diese Kraftwerksart typischen Betrieb mit 6000 Vollbetriebsstunden

pro Jahr eine Anlagengrösse mit einer Holzleistung zwischen 150 MWe und 300 MWe optimal wäre. Damit könnten 3640 GWh/a bis 3700 GWh/a Strom produziert und gut 6,5% des heutigen Stromverbrauchs gedeckt werden. Bei Holzpreisen von 4 Rp./kWh für Restholz und 5 Rp./kWh für Waldholz ergeben sich Stromgestehungskosten von rund 12,5 Rp./kWh für Restholz und 14,5 Rp./kWh für Waldholz. Zum Vergleich kann in einem 600 MWe Kombikraftwerk mit Erdgas zu 7 Rp./kWh Strom für 12,7 Rp./kWh erzeugt werden. Gleiche Stromgestehungskosten werden mit Wald- oder Restholz zu einem Preis von 4,5 Rp./kWh erzielt. Als interessante Alternative zu einem reinen Holzkraftwerk kommt auch der Bau eines Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerks in Frage, das dank des Grössenvorteils einen Wirkungsgrad von gegen 45% für Holz und 60% für Erdgas verspricht. Dazu wird ein Anteil des Holzes an der Gesamtleistung von 20% vorgeschlagen. Für eine Holzleistung von 150 MWe könnten die Stromgestehungskosten aus Holz dadurch um knapp 1 Rp./kWh reduziert werden. Gleichzeitig könnten die Versorgungssicherheit erhöht und eine sukzessive Steigerung der Holzleistung ermöglicht werden. Im Vergleich zu einem reinen Erdgaskraftwerk erlaubt die Zufeuerung von Holzgas eine Minderung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen ungefähr im Verhältnis zum Holzanteil an der Kraftwerksleistung. Der Bau eines Erdgaskraftwerks setzt dabei voraus, dass fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen aus anderen Quellen entsprechend reduziert werden, also zum Beispiel durch den Ersatz von Öl- und Gasheizungen durch Holzheizungen. Zur Einführung der vorgestellten Technologie und den Aufbau der Versorgung wird für die Schweiz vorerst der Bau eines Holzkraftwerks mit 150 MWe oder – sofern ein Erdgaskraftwerk realisiert wird – eines Holz/Erdgas-Kraftwerks mit 150 MWe Holzleistung vorgeschlagen. Bei einer gleichmässigen Verteilung des Energieholzes über die Schweiz muss für die Holzversorgung dazu theoretisch ein Einzugsgebiet von rund 60 km Fahrdistanz erschlossen werden. Durch geeignete Standortwahl ist anzustreben, dass ein Teil des Holzbedarfs lokal zum Beispiel als Restholz verfügbar ist und die Kraftwerksabwärme teilweise genutzt werden kann, wodurch die Energieausnutzung und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden. Im Vergleich zu einer Nutzung von Energieholz in dezentralen Anlagen verspricht die Verwertung in einem Kraftwerk eine Reduktion der Schadstoffemissionen vor allem an Feinstaub, aber auch an Stickoxiden, Schwermetallen, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und polychlorierten Dibenzo-*p*-Dioxinen und Furanen (PCDD/F). Da vor allem einfache und unsachgemäss betriebene handbeschickte Holzfeuerungen unverhältnismässig hohe Feinstaubemissionen verursachen und diese zudem besonders gesundheitsschädlich sind (siehe [28] sowie Hinweis zu ähnlicher Wirksamkeit für Lungenkrebs an Menschen in [29]<sup>2</sup>), könnte die durch Energieholz verursachte Feinstaubbelastung durch Verlagerung des so genutzten Holzes in Kraftwerke drastisch reduziert werden.

---

<sup>2</sup> This study suggests that there is a possible association of lung cancer with wood smoke exposure. Likewise, our findings demonstrate that wood smoke could produce similar effects on p53, phospho-p53, and MDM2 protein expression as tobacco.

## 6 Vergleich Wärme, Wärmekraftkopplung und Kraftwerk

Um verschiedene Szenarien zur Nutzung des zusätzlichen Holzpotenzials zu vergleichen, wird angenommen, dass mit dem Holz der Bedarf an Heizung und Warmwasser gedeckt werden soll. Dazu kommen Holzheizwerke mit Fernwärmenetz oder dezentrale Holzheizungen in Frage. Im Fall des Kraftwerks wird angenommen, dass der Strom für dezentrale Wärmepumpen genutzt wird. Die Annahmen dazu sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Damit kann das Potenzial zur Erzeugung von Nutzwärme gemäss Tabelle 4 abgeleitet werden. Bei Kenntnis des spezifischen Bedarfs an Heizwärme und Warmwasser pro Quadratmeter Wohnfläche kann daraus die zu versorgende Wohnfläche bestimmt werden. Dies erfolgt in Tabelle 4 für eine Gebäudequalität gemäss dem SIA-Zielwert für das Jahr 2008. Dieser entspricht einer Energiekennzahl für Heizung und Warmwasser von 200 MJ/m<sup>2</sup>a oder 55 kWh/m<sup>2</sup>a [30]. Heutige Neubauten weisen im Mittel noch geringfügig höhere Verbrauchswerte auf, während Minergie-Gebäude tiefere Werte erzielen.

Bei den Szenarien für die Energieversorgung der Gebäude ist zu beachten, dass in Zukunft eine erhöhte Energieeffizienz der Bauten zu fordern ist. Zur Verringerung der Lüftungsverluste wird für den Minergie-Standard bereits heute der Einsatz einer kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung vorausgesetzt. Dies macht den Einsatz elektrischer Energie zum Teil des Beheizungskonzepts, denn aus Sicht der Energieversorgung entspricht die kontrollierte Lüftung ebenso wie eine Wärmepumpe einem Elektro-Thermo-Verstärker (ETV). Während Wärmepumpen typische Verstärkungsfaktoren (angegeben als Jahresarbeitszahl JAZ) von 3 bis 5 aufweisen, erzielen korrekt ausgeführte kontrollierte Lüftungen eine Verstärkung von über 10. In künftigen Gebäuden wird somit der Einsatz an Strom im Verhältnis zu allfälligem direktem Brennstoffeinsatz im Gebäude zunehmen. Im Zusammenhang mit dem Energie-sparpotenzial ist dabei zu fordern, dass das Gebäude als Gesamtsystem optimiert wird, da der Verstärkungsfaktor von der Vorlauftemperatur des Heizsystems abhängig ist. Während heutige Gebäude und Wärmepumpen noch oft mit Vorlauftemperaturen von bis zu 45°C arbeiten und damit immerhin Jahresarbeitszahlen von über 3 erreichen<sup>3</sup>, könnten Neubauten in der Regel auf Vorlauftemperaturen von maximal 35° ausgelegt werden und so Jahresarbeitszahlen von über 4 sicher stellen.

Wie Bild 21 zeigt, kann durch ein Holzgas-Kombikraftwerk zum Antrieb von Wärmepumpen mehr Nutzwärme erzeugt werden als durch Heizanlagen. Dabei wird davon ausgegangen, dass keine Abwärmenutzung erfolgt. Dies entspricht dem schlechtesten möglichen Fall, da ein Kraftwerk sinnvollerweise im Umfeld eines Grossverbrauchers an Wärme realisiert und ein Teil der Abwärme genutzt werden könnte. Allerdings wäre ein stromgeführter Betrieb erforderlich. In Bild 22 ist vergleichend die Anzahl Personen dargestellt, welche in Gebäuden nach Baustandard im Jahr 2008 mit Heizung und Warmwasser versorgt werden könnte. Mit dem Einsatz des heute nicht genutzten Zusatzpotenzials an Holz könnten bei Einsatz guter Wärmepumpen rund 5,5 Millionen Einwohner versorgt werden, bei Nutzung des Zusatzholzes in Heizanlagen wären es 2,6 Millionen Einwohner.

---

<sup>3</sup> In der Schweiz installierte Wärmepumpenheizungen weisen für Sole/Wasser-Anlagen eine mittlere JAZ von 3,5 und für Luft/Wasser-Anlagen von 2,7 auf [30].

Tabelle 3 Wirkungsgrad zur Nutzwärmeerzeugung aus Holz über Heizanlagen mit Wärmeverteilung sowie über Kraftwerk mit Stromverteilung und dezentralen Wärmepumpen. Beim Kraftwerk wird von einem 150 MWe-Holzgas-Kombikraftwerk ausgegangen, wobei der Transportaufwand für LKW-Transport im Produktionswirkungsgrad berücksichtigt ist. Die Angaben für Heizanlagen entsprechen sehr guten Werten für eine Grossanlage mit Wärmenetz, oder typischen Werten einer Kleinanlage mit etwas geringerem Wirkungsgrad aber ohne Wärmenetz. Für die Wärmepumpen wird eine Jahresarbeitszahl von 2,5, 3 oder 4 angenommen. 2,5 ist pessimistisch, da bereits heute installierte Wärmepumpen für Heizung und Warmwasser eine Jahresarbeitszahl von mehr als 3 aufweisen, während Neubauten mehr als 4 erreichen.

Wirkungsgrad (Jahresmittel)	Heizungen	Kraftwerk		
		schlechte Wärmepumpen	heutige Wärmepumpen	gute Wärmepumpen
		JAZ = 2,5	JAZ = 3	JAZ = 4
Produktion	85%	43%	43%	43%
Verteilung	90%	93%	93%	93%
Nutzung	100%	250%	300%	400%
<b>Wirkungsgrad Nutzwärme</b>	<b>77%</b>	<b>100%</b>	<b>120%</b>	<b>160%</b>

Bild 23 zeigt eine Abschätzung der Feinstaubemissionen für verschiedene Szenarien von Heizanlagen mit einem mittleren Emissionswert zwischen  $100 \text{ mg/m}^3$  (bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) und  $10 \text{ mg/m}^3$ . Während bei heute installierten Feuerungen von einer Grössenordnung von  $100 \text{ mg/m}^3$  auszugehen ist, sind Emissionen von  $10 \text{ mg/m}^3$  für Feuerungen mit Feinstaubabscheidern möglich. Demgegenüber ist für ein Holzgas-Kombikraftwerk mit weniger als  $1 \text{ mg/m}^3$  zu rechnen. Die Staubemissionen aus zusätzlichen Holzgas-Kombikraftwerken wären damit im Vergleich zu den Emissionen der heute installierten Holzfeuerungen nahezu vernachlässigbar. Dies gilt auch dann, wenn die Emission an Dieselruss berücksichtigt wird und der gesamte Transport per Lkw nach Euro 5 erfolgt. Wenn die Russemissionen den Kraftwerksemissionen angerechnet werden, erhöht der Transport mit Lkw ohne Partikelfilter die Kraftwerksemission um maximal  $0,036 \text{ mg/m}^3$  bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$ , wenn Lkw mit Partikelfilter eingesetzt werden um sicher weniger als  $0,007 \text{ mg/m}^3$ , effektiv ist jedoch ein Anstieg um weniger als  $0,0012 \text{ mg/m}^3$  zu erwarten<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Für Lkw nach Euro 5 gilt ein Grenzwert für Feinstaub von  $30 \text{ mg/kWh}$  Nutzenergie (im dynamischen Zyklus ETC) [32].  $30 \text{ mg}$  pro kWh Nutzenergie entspricht bei einem im Alltagsbetrieb von der Empa ermittelten Wirkungsgrad von rund 40% einer Emission von  $12 \text{ mg}$  pro kWh Endenergie. Für Diesel mit einem Heizwert von  $42,7 \text{ MJ/kg}$  und einer Dichte von  $0,85 \text{ kg/l}$  entspricht der Verbrauch eines Lkw von 40 Liter pro 100 km einem Energieinhalt von  $14,5 \text{ MJ}$  oder  $4,0 \text{ kWh}$  Endenergie pro km. Der Lkw emittiert somit bei Ausschöpfung des Euro 5-Grenzwerts  $48 \text{ mg}$  Russ pro km. Für eine Fahrdistanz von 120 km beträgt die Emission  $5,8 \text{ g}$ . Ein Lkw transportiert rund 80 Kubikmeter Brennstoff. Für Holzschnitzel kann eine Transportdichte von  $200 \text{ kg}$  Trockensubstanz pro Kubikmeter angenommen werden, so dass die Russemission rund  $0,36 \text{ mg/kg}$  atro Holz entspricht. Die Verbrennung von  $1 \text{ kg}$  atro Holz verursacht rund  $10 \text{ m}^3$  trockenes Abgas bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$ . Die Aufrechnung der Dieselrussemission auf das Kraftwerks-

Bild 24 zeigt die pro Person induzierte Feinstaubbelastung für die verschiedenen Szenarien, wobei der Einfluss der Güte der Wärmepumpe erkennbar wird, während die Russemissionen aus dem Transport vernachlässigbar sind.

Tabelle 4 Holznutzung Heute, Zusatzpotenzial und Total angegeben als Endenergie (Heizwert Holz) sowie bewertet als Nutzwärme bei Nutzung des Holzes in Heizungen mit 85% Wirkungsgrad und 10% Verteilverlusten sowie als Nutzwärme bei Einsatz des Holzes in Kraftwerken mit 43% Wirkungsgrad und 7% Verteilverlusten zum Antrieb von Wärmepumpen mit Jahresarbeitszahlen (JAZ) von 2,5, 3 und 4.

Für Neubauten mit einem Energiebedarf für Heizung und Warmwasser von 200 MJ/m<sup>2</sup>a = 55 kWh/m<sup>2</sup>a nach Zielpfad SIA 380-1 Jahr 2008 [30] wird die Wohnfläche ausgewiesen, welche beheizt und mit Warmwasser versorgt werden kann.

Beim heutigen Wohnflächenbedarf von 44 m<sup>2</sup> pro Einwohner (Stand Schweiz 2000) wird daraus die Anzahl Einwohner (E = Einwohner) abgeleitet, für welche Heizung und Warmwasser zum Wohnen durch Holz abgedeckt werden kann.

Holznutzung		Einheit	Holz	Heizungen	Kraftwerk		
			Endenergie	Nutzwärme	Nutzwärme		
					JAZ = 2,5	JAZ = 3	JAZ = 4
					schlechte Wärmepumpe	heutige Wärmepumpe	gute Wärmepumpe
Energie	Heute	GWh/a	6'240	4'774	6'238	7'486	9'982
	Zusatz	GWh/a	8'371	6'404	8'369	10'043	13'390
	<b>Total</b>	GWh/a	<b>14'611</b>	<b>11'178</b>	<b>14'607</b>	<b>17'529</b>	<b>23'372</b>
Wohnen	Heute	Mio m <sup>2</sup>	–	86	112	135	180
	Zusatz	Mio m <sup>2</sup>	–	115	151	181	241
	<b>Total</b>	Mio m <sup>2</sup>	–	<b>201</b>	<b>263</b>	<b>316</b>	<b>421</b>
	Heute	Mio E	–	2.0	2.6	3.1	4.1
	Zusatz	Mio E	–	2.6	3.4	4.1	5.5
	<b>Total</b>	Mio E	–	<b>4.6</b>	<b>6.0</b>	<b>7.2</b>	<b>9.6</b>

abgas entspricht somit 0,036 mg/m<sup>3</sup> Kraftwerksabgas. Sofern Lkw mit Partikelfilter eingesetzt werden, sind dies bei einem pessimistischen Emissionswert (entsprechend einem möglichen Grenzwert zur Forderung von Partikelfiltern) von 6 mg/kWh Nutzenergie weniger als 0,007 mg/m<sup>3</sup>, bei effektiv zu erwartenden Russemissionen von unter 1 mg/kWh weniger als 0,0012 mg/m<sup>3</sup> oder weniger als 0,12% der angenommenen Kraftwerksemission. Die Dieselermissionen sind damit gegenüber den angenommenen Kraftwerksabgasen nahezu vernachlässigbar und im Vergleich zu Holzfeuerungen ohne Feinstaubabscheider ist der Anteil Dieseleruss noch entsprechend geringer.

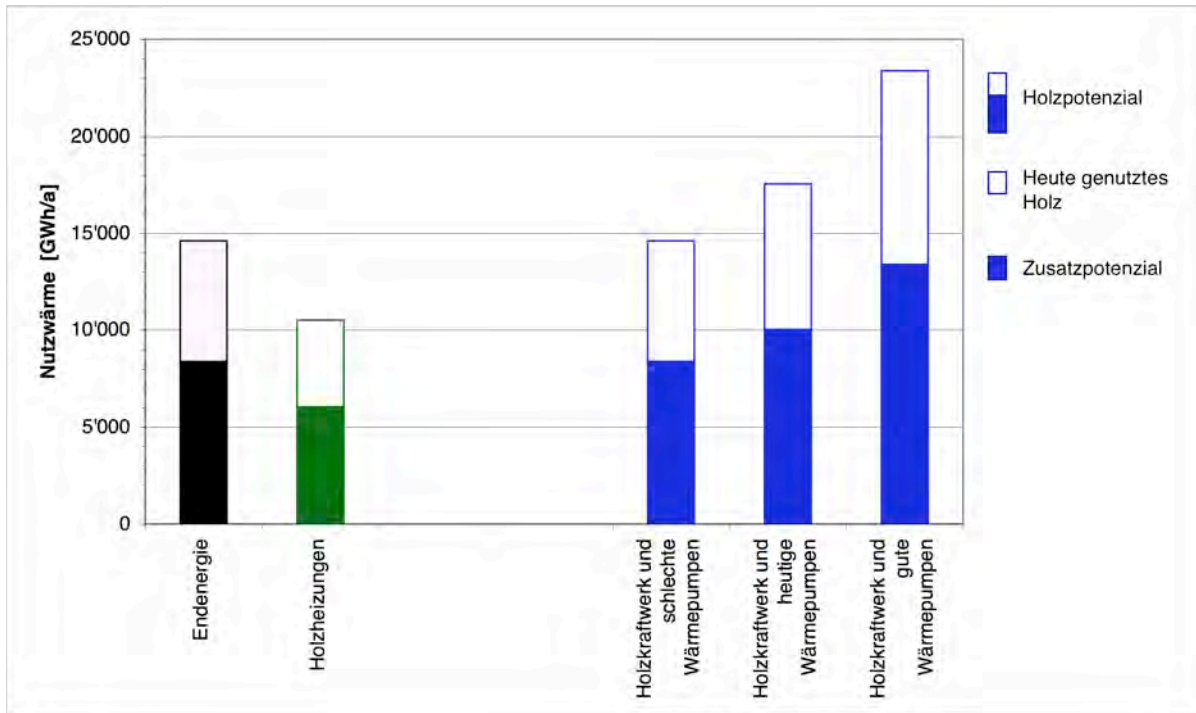


Bild 21 Potenzial zur Produktion von Nutzwärme aus Holz in der Schweiz beim Einsatz in Holzheizungen im Vergleich zu Holzkraftwerken mit dezentralen Wärmepumpen gemäss Tabelle 3 und Tabelle 4.

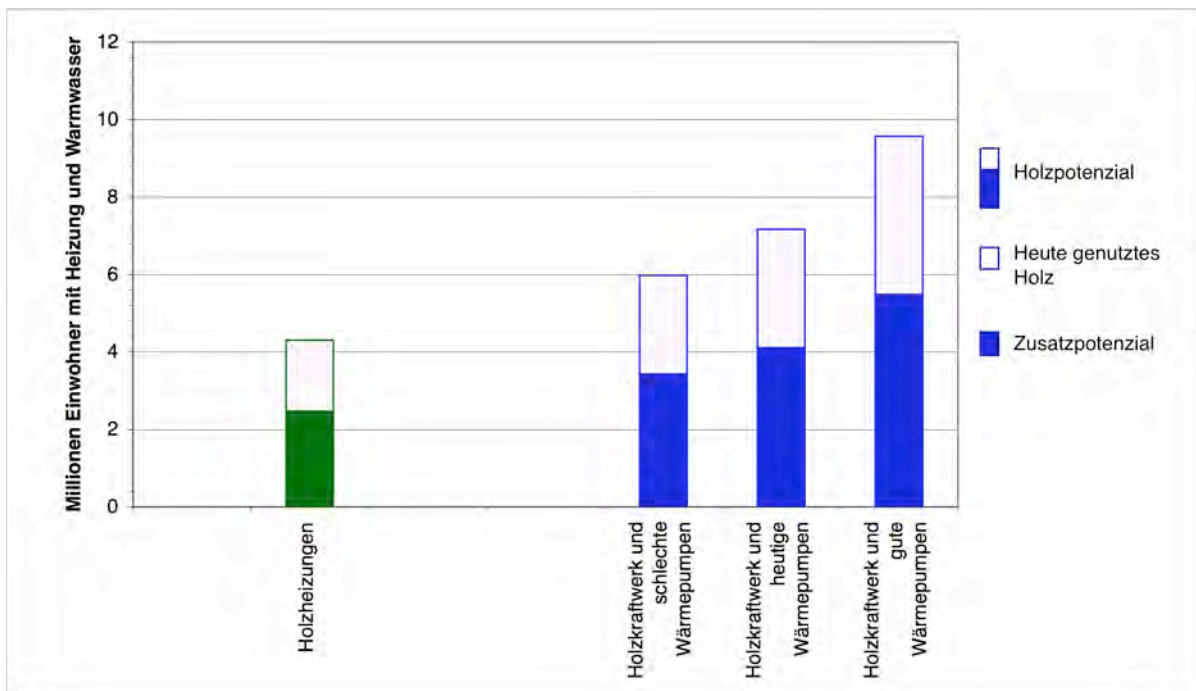


Bild 22 Potenzial zur Versorgung von Einwohnern mit Heizwärme und Warmwasser in der Schweiz mit Holz in Gebäuden gemäss Baustandard Jahr 2008.

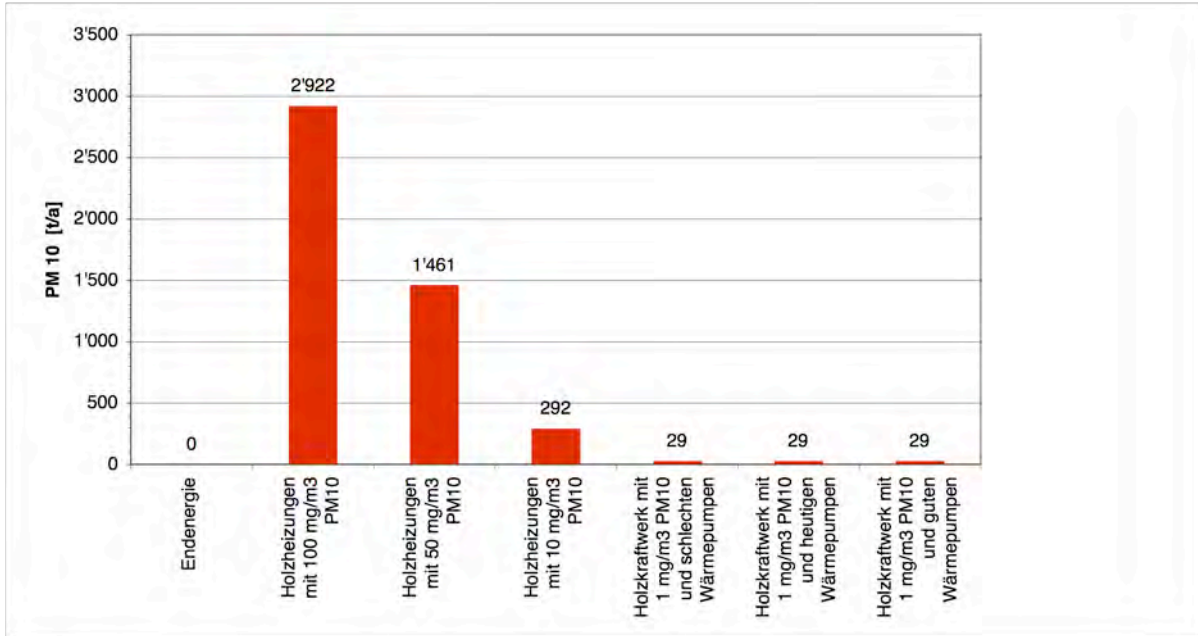


Bild 23 Emissionen an Feinstaub in der Schweiz in Tonnen pro Jahr durch Nutzung des gesamten Holzpotenzials in Holzheizungen mit mittleren Staubemissionen von 100 mg/m<sup>3</sup> bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub>, 50 mg/m<sup>3</sup> und 10 mg/m<sup>3</sup> sowie durch Nutzung in Kombikraftwerken mit 1 mg/m<sup>3</sup>.

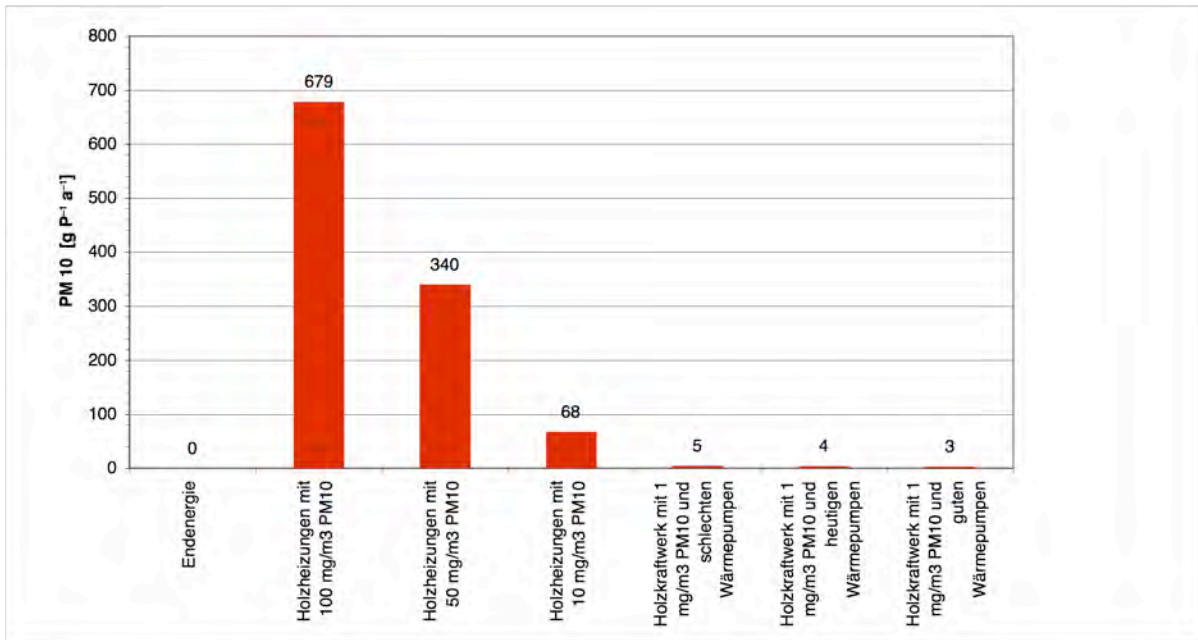


Bild 24 Spezifische jährliche Emissionen an Feinstaub pro für Heizung und Warmwasser mit Holz versorgte Person.

## 7 Ausblick

Wärme aus Holz ist als eine der ältesten vom Menschen genutzte Energieform nicht aus unserem Alltag wegzudenken. Aus Sicht der Ressourcenökonomie weisen Holzheizungen heute wieder ein interessantes Potenzial auf, da sie eine direkte Substitution fossiler Brennstoffe durch Holz praktisch im Verhältnis 1 zu 1 ermöglichen. Fossile Rohstoffe für Heizanwendungen einzusetzen ist dagegen fragwürdig, da uns die gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffe in Zukunft für höherwertige Anwendungen, also als Fahrzeugtreibstoff und – noch schwieriger zu ersetzen – als Chemierohstoff und Flugzeugtreibstoff fehlen werden. Biomasse wird dann als einzige Kohlenstoffquelle zur Verfügung stehen. Aus ihr können sämtliche erwähnten Verbindungen ebenfalls hergestellt werden, allerdings ist dies für die meisten Anwendungen mit deutlich grösseren Umwandlungsverlusten vom Rohstoff bis zum Endprodukt und gleichzeitig mit deutlich höheren Kosten verbunden.

Ohne griffige Massnahmen zur Verminderung der Feinstaubemissionen steht eine vermehrte Nutzung von Holz als Brennstoff im Widerspruch zu den Zielen der Luftreinhaltung. Aus diesem Grund ist eine Zunahme der Holzenergienutzung nur in Anwendungen mit geringen Feinstaubemissionen zu unterstützen, also zum Beispiel in automatischen Holzfeuerungen mit Feinstaubabscheidern. Feinstaubabscheider verteuern die Wärme aus Holz zwar spürbar. Zumindest für Anlagen ab rund 200 kW, sicher jedoch ab 400 kW wird die Erhöhung der Wärmegestehungskosten um rund 20% bzw. um knapp 15% aber als verhältnismässig beurteilt. Für kleinere Leistungen ist dagegen auch der Einsatz von verbrennungs- und regeltechnisch auf minimale Feinstaubemissionen optimierten Pelletfeuerungen ohne Feinstaubabscheider denkbar.

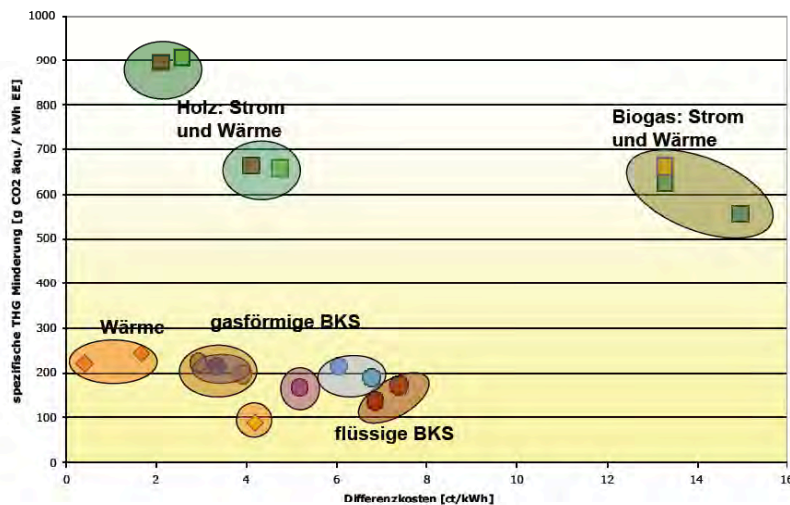
Wärme-Kraftkopplung in kleinen und mittleren Anlagen mit Leistungen von einigen Hundert kWe bis einigen MWe sind an Standorten mit Prozesswärmebedarf wirtschaftlich interessant. Aufgrund der geringen elektrischen Wirkungsgrade sind sie allerdings wärmegeführt zu betreiben und weisen nur ein beschränktes Einsatzpotenzial auf. Eine Praxiserhebung an 14 WKK-Anlagen mit holzbefeuerten Rostfeuerungen in Europa zeigt, dass die in der Praxis erreichten elektrischen Wirkungsgrade meist deutlich unter den Planungswerten liegen [33]. Für Anlagen von unter 1 MWe bis 90 MWe werden elektrische Wirkungsgrade von im Mittel 14% mit einer Bandbreite von 4% bis 28% ausgewiesen und vom produzierten Strom werden zwischen 8% und 40% als Eigenbedarf verbraucht.

Als Alternative zu Heizanlagen und WKK-Anlagen kommt auch die Holzverwertung in stromgeführten Kraftwerken in Frage. Zur Deckung eines allfälligen Heizwärmebedarfs sowie zum Vergleich mit Heizanlagen bietet sich dabei an, den erneuerbaren Strom zum Antrieb dezentraler Wärmepumpen zu nutzen. Da in der Schweiz derzeit der Bau fossil befeuerter thermischer Kraftwerke als Ersatz für Kernkraftwerke geprüft wird, sollten auch die Möglichkeiten des Einsatzes biogener Brennstoffe in Kraftwerken geprüft werden. In Frage kommen sowohl rein biogen gefeuerte Kraftwerke als auch die Zufeuerung in allfälligen fossilen Kraftwerken. Die höchstmöglichen Wirkungsgrade können dabei über Holzgas-Kombikraftwerke erreicht werden, weshalb diese Technologie zur Stromerzeugung aus Holz in den nächsten Jahren zur kommerziellen Reife entwickelt und vorab in erste Demonstrationsanlagen eingesetzt werden sollte. Sofern Holzkraftwerke realisiert werden, wird eine Anlagengrösse von rund

150 MWe Holzleistung vorgeschlagen. Kleinere Kraftwerke sind sowohl wirtschaftlich als auch ressourcenökonomisch unter Bewertung des Wirkungsgrads inklusive Transportaufwand unvorteilhaft. Die Realisierung thermischer Kraftwerke sollte raumplanrisch so optimiert werden, dass der Gesamtwirkungsgrad durch eine teilweise Abwärmenutzung maximiert wird. Im Weiteren sollte der Standort bezüglich Transportaufwand optimiert werden. In Frage kommen dazu entweder Betriebe mit grossem Restholzanfall, also zum Beispiel grosse Sägewerke, oder auch Standorte, welche grosse Wärmeverbraucher versorgen und zu denen Punkt zu Punkt-Verbindungen per Bahn zu grösseren Holzlieferanten möglich wären. Dazu käme zum Beispiel das Fernwärmenetz der Stadt Zürich in Frage, welches heute teilweise mit Erdgas beheizt wird und zu welchem in Aubrugg ein Standort mit Bahnanbindung vorhanden wäre. Für die Schweiz könnte mit dem heute nicht genutzten Holz maximal die Vierfache für ein 150 MWe-Kraftwerk benötigte Holzmenge bereit gestellt werden. Beim Einsatz heutiger Wärmepumpen-Heizungen könnten rund 50% mehr Häuser mit Nutzwärme versorgt werden als mit Holzheizungen, mit künftig möglichen Gebäuden und Wärmepumpen wären es mehr als doppelt so viele bei gleichzeitig sehr geringer Feinstaubbelastung. Das Ziel von EnergieSchweiz, bis im Jahr 2010 zusätzlich 500 GWh elektrische Energie oder rund 1% des heutigen Stromverbrauchs aus neuen erneuerbaren Quellen zu produzieren, könnte mit einem Holzkraftwerk von rund 85 MWe erreicht werden.

Auch die EU schätzt das Potenzial der Wärme- und Stromerzeugung im Grundsatz als sehr interessant ein. Allerdings unterstützt sie trotz der Vorteile von Wärme- und Strom gegenüber Treibstoffen auch die Treibstoffherstellung aus Biomasse – und zwar nicht nur durch Vergärung, sondern insbesondere über thermische Verfahren und zum Beispiel durch Fischer-Tropsch-Synthese hergestellte Biotreibstoffe der sogenannten zweiten Generation. Dies erfolgt, obwohl die Treibstoffherstellung lediglich als drittbeste Option beurteilt wird [34]: „Biotreibstoffe weisen zwar die höchste Beschäftigungsintensität und den grössten Nutzen in Bezug auf die Versorgungssicherheit auf, doch bietet die Biomassenutzung zur Stromerzeugung die meisten Vorteile in Bezug auf Treibhausgasemissionen, und die Biomassenutzung zur Wärmeerzeugung ist am kostengünstigsten. Die Nutzung von Biomasse sollte in allen drei Sektoren gefördert werden. Mindestens bis 2010 wird es keinen nennenswerten Wettbewerb um Rohstoffe geben: Biotreibstoffe werden aus Agrikulturpflanzen gewonnen, während sich Strom- und Wärmeerzeugung vorwiegend auf Holz und Abfälle stützen“. Es besteht somit ein Zielkonflikt zwischen Ressourcenökonomie und Arbeitsplatzbeschaffung, aufgrund dessen nicht nur die effizientesten Anwendungen gefördert werden. Zahlreiche Ökobilanz-Studien bestätigen, dass Wärme und Strom aus Holz eine höhere Effizienz zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei gleichzeitig deutlich geringeren Kosten als die Treibstoffherstellung aufweist (z.B. [35–37]). Bild 25 zeigt dazu beispielhaft eine ökologisch-ökonomische Bewertung verschiedener Verfahren. Obwohl die Arbeitsplatzhaltung ein wichtiges Anliegen jeder Volkswirtschaft sein muss, sollte die Ressourcenökonomie angesichts der Klimaproblematik und der Begrenztheit der Ressourcen oberste Priorität für die Wahl künftiger Energiesysteme haben.

## Wie können die begrenzten Biomasse-Ressourcen am sinnvollsten eingesetzt werden?



➤ Sowohl ökologisch als auch ökonomisch ist die KWK-Verstromung von Holz bei Nutzung der Abwärme die beste Option. Diesem Nutzungspfad sind aber strukturelle Grenzen gesetzt.

➤ Wärme- und Kraftstoffoptionen erzielen ähnliche THG Minderungen, die Mehrkosten für die Kraftstoffpfade sind aber höher.

➤ Die gasförmigen Biokraftstoffe sind ökonomisch günstiger als die flüssigen; die Infrastruktur ist aber noch nicht vorhanden.

➤ Die Datenunsicherheit für SNG ist vergleichsweise hoch.

**Weder aus ökologischer noch aus ökonomischer Sicht stellen die Kraftstoff-Optionen die vorteilhaftesten Biomassenutzungen dar.**

Bild 25 Ökologisch-ökonomische Bewertung des sinnvollsten Einsatzes begrenzter Biomasse-Ressourcen nach [37]. BKS = Biokraftstoffe, KWK = Kraftwärmekopplung, THG = Treibhausgasemissionen, SNG = Synthetisches Erdgas.

## 8 Fazit

Wärme aus effizienten Holzheizungen ist eine wirkungsvolle Technik zur Substitution fossiler Brennstoffe. Automatische Holzfeuerungen ermöglichen eine effiziente Nutzung von Energieholz und ihr Beitrag zum Feinstaub ist nicht relevant, wenn sie mit Feinstaubabscheidern ausgerüstet werden. Bei handbeschickten Holzheizungen sind die Feinstaubemissionen durch optimalem Betrieb tief zu halten. Der Betrieb ist für Feuerstätten im Wohnbereich besonders entscheidend, weshalb für diese Anwendungen noch Handlungsbedarf bezüglich Technik, Vorschriften und Vollzug besteht, wie Immissionsmessungen und Ascheuntersuchungen zeigen. Wärmekraftkopplung in konventionellen Dampfkraftanlagen mit Holz ist für einen wärmegeführten Betrieb und somit vor allem für Anwendungen mit Bandlastwärmebedarf attraktiv. Wenn Holz einen signifikanten Beitrag zur Stromerzeugung leisten soll, sind ein oder wenige Holzgas-Kombikraftwerke grösserer Leistung sinnvoller als zahlreiche Dampfkraftanlagen mittlerer Leistung, da der elektrische Wirkungsgrad rund verdoppelt werden kann. Damit kann mit sehr geringen Feinstaubemissionen ein hohes Potenzial zur Substitution fossiler Brennstoffe erzielt werden. Sofern in der Schweiz ein Erdgaskraftwerk gebaut wird, bietet die Zufeuerung von Holzgas im Kombikraftwerk eine interessante Option.

## 9 Literatur

- [1] Bundesamt für Energie: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2004*, Bern 2005
- [2] Oettli, B., et al.: *Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz*, Bundesamt für Energie, Bern, 2004.
- [3] Primas, A., Kessler, F.: *Schweizerische Holzenergiestatistik, Folgerhebung für das Jahr 2004*, Bundesamt für Energie, Bern 2005.
- [4] Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: *Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4: Planungshandbuch*, Holzenergie Schweiz, Zürich 2004 und C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2004, ISBN 3-937441-90-5.
- [5] Nussbaumer, Th.: *Stand der Technik und Kosten der Feinstaubabscheidung für automatische Holzfeuerungen von 100 kW bis 2 MW*. Bericht zu Handen Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Amt für Umwelt Kanton Thurgau (AFU Thurgau). Zürich 2006, www.verenum.ch, ISBN 3-908705-13-4.
- [6] Ernst Basler und Partner: *Wirtschaftlichkeit von heutigen Biomasse-Energieanlagen*, Schlussbericht zu Handen Bundesamt für Energie, Zürich und Bern 2006
- [7] Nussbaumer, Th.: *Holzenergie-Anlagen*, in [6]
- [8] IEA 2002: S. van Loo, J. Koppejan (eds.): *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*, Twente University Press, Enschede 2002, ISBN 9036517737
- [9] Zhelyezna, T.: *Co-combustion of biomass with fossil fuels - First State of the Art (D14), draft version*, SEC Biomass, EU Projekt NETBIOCOF, 2006
- [10] Bundesamt für Energie: *Energieperspektiven 2035/2050*, Stand Februar 2005, Bern 2005, www.energie-perspektiven.ch.
- [11] Nussbaumer, Th.: *Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz: Potenzial und Wirtschaftlichkeitsabschätzung*, Bundesamt für Energie, Publikation 250049, Zürich 2005, www.energieforschung.ch.
- [12] Nussbaumer, Th.: Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerke – Konzept, Potenzial und Wirtschaftlichkeit für Deutschland, *BWK - Das Energie-Fachmagazin*, 5 2006, 58–62
- [13] Good, J.; Nussbaumer, Th.; Jenni, A.; Bühler, R.: *Systemoptimierung automatischer Holzheizungen*, Bundesamt für Energie, Schlussbericht Projekt 44278, Bern 2005
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Bridgwater, T.: *Biomass for power and heat*, Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham, 2004.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] ECG 2004 (Energy Consulting Group Ltd.): Fossil-thermische Kraftwerke, *BFE-Tagung „Zukunft des Elektrizitätsangebots“*, 2. Juli 2004, Bern.
- [20] Rensfelt, E.: Gasification Survey Report Sweden. In: K. Kwant, H. Knoef (Eds.): *Status of Gasification*, IEA Bioenergy and Gasnet, 2002.
- [21] Tiangco, V., Sethi, P., Zhang, Z.: Biomass – Strategic value analysis, *IEPR Workshop*, 1.7.05, California Energy Commission, 2005.

- [22] Forsthuber, P.: Vorstellung eines Rohr-Elektrofilters, *Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich*, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 39–43
- [23] Beer, S.: Entwicklung und Test einer Elektrofilteranlage für kleine Biomasseheizkessel, *Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich*, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 17–26
- [24] Heidenreich, R.: Abscheidung von Feinstäuben durch Ionisation und elektrostatische Abscheidung bei der thermischen Nutzung von Pflanzen in Kleinkesseln, *Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich*, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 27–38
- [25] Winkel, O.: Der praxisgerechte Filter für Rauchgase aus kleinen und mittleren Biomasse-Verbrennungen, *Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich*, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 45–59
- [26] Remmers, R.: 25 MW-Holzwerk mit stationärer Wirbelschicht in Cuijk (NL). 6. *Holzenergie-Symposium*, 20.10.2000, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, 2000, 187–196.
- [27] Stahl, K.: Värnamo Demonstration Plant, Berlings Skogs, Trelleborg (S) 2001.
- [28] Klippel, N.; Nussbaumer, T.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselmotoren, 9. *Holzenergie-Symposium*, 20. Oktober 2006, Verenum, Zürich, 21–39
- [29] Delgado, J.; Martinez, L.; Sanchez, T.; Ramirez, A.; Iturria, C.; Gonzalez-Avila, G.: Lung Cancer Pathogenesis Associated With Wood Smoke Exposure, *Chest* 2005; 128, 124–131
- [30] SIA 380/1: *Dokumentation D 0170, Thermische Energie im Hochbau, Leitfaden zur Anwendung der Norm SIA 380/1*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2001
- [31] Erb, M.; Hubacher, P.; Ehrbar, M.: *Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996–2003*, Schlussbericht BFE Projekt 240016, Bundesamt für Energie, Bern 2004
- [32] EN Euro 5: *Preliminary draft proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council relating to emissions of atmospheric pollutants from motor vehicles (Euro 5)*, Brüssel 2005
- [33] Evald, A.; Witt, J.: Biomass CHP best practice guide. Performance comparison and recommendations for future CHP systems utilising biomass fuels, Altener contract no. 4.1030/Z/02-150/2002, FORCE Technology Denmark, 2006
- [34] Kommission der Europäischen Gemeinschaften: *Aktionsplan für Biomasse, Mitteilung der Kommission KOM(2005) 628 endgültig*, SEK(2005) 1573, Brüssel, 7.12.2005
- [35] Jungmeier, G., Canella, L.: Greenhouse Gas Emissions of Energy Systems with Bio-oil, Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, CPL Press, ISBN 1-872691-97-8, 1700–1713
- [36] Edwards, R.: Well-to-wheels analysis of biofuels, 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, PD 2.4
- [37] Arnold, K.; Ramesohl, S.; Grube, T.; Menzer, R.; Peters, R.: Strategische Bewertung der Perspektiven für synthetische Kraftstoffe auf Biomasse-Basis in NRW, 10. *Fachkongress Zukunftsenergien*, Essen 14.2.06

## Verdankung

Die vorliegende Untersuchung wurde unterstützt von:

- Bundesamt für Energie (BfE)
- Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- Amt für Umwelt Kanton Thurgau (AfU TG)