

Energetische Nutzung von Altholz zur Wärmeerzeugung

Anlagenkonzept und Wirtschaftlichkeit von 1–10-MW-Altholzfeuerungen

Dr. Thomas Nussbaumer, Zürich*



Mit dem heute nicht genutzten Altholz könnten rund 0,5% des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs gedeckt werden. Das Altholz bietet damit ein nicht unerhebliches Potential zur Substitution von Öl und Gas im Wärmemarkt. Voraussetzung zur Energienutzung von Altholz ist jedoch die Realisierung von Anlagen, welche über eine geeignete Feuerungstechnik und Abgasreinigung verfügen und bei welchen ein entsprechender Bedarf an Prozess- oder Heizwärme vorhanden ist. Wegen der aufwendigen Anlagentechnik ist der Einsatz von Altholz vor allem in mittleren und grösseren Anlagen sinnvoll. Im Rahmen des DIANE-8-Projekts Energie aus Altholz und Altpapier wurden Anlagenkonzepte für Altholzfeuerungen im Leistungsbereich von 1–10 MW erarbeitet und deren Wirtschaftlichkeit abgeschätzt. In diesem Beitrag werden die wichtigsten Resultate zusammengefasst.

Durch den Einsatz von industriellen Altholzfeuerungen wird eine hohe Energieausnutzung von Altholz bei geringer Umweltbelastung angestrebt. Gleichzeitig sollen durch die Wärmenutzung ein wirtschaftlicher Betrieb und niedrige Entsorgungskosten erzielt werden. Im vorliegenden Beitrag wird der Stand der Technik sowie die Wirtschaftlichkeit von Anlagen zur Altholzverwertung aufgezeigt. Zur thermischen Verwertung kommen im Bereich von 1–10 MW vor allem Vorschubrostfeuerungen in Frage. Zur Abgasreinigung bietet sich der Einsatz von Gewebe- oder Elektrofiltern mit Zugabe eines Sorptionsmittels an, und für die Entstickung kommen die selektive katalytische und die selektive nichtkatalytische Reduktion (SCR, SNCR) in Frage. Bei einem Preis von Fr. 0.– pro Tonne aufbereitetes Altholz ist

der Einsatz von Altholzfeuerungen für Raumwärme mit 2000–2500 Vollbetriebsstunden pro Jahr ab 10 MW und für Prozesswärme mit 4000–6000 Vollbetriebsstunden pro Jahr ab 2–3 MW wirtschaftlich, sofern für die Anlagen eine Annuität von 15 Jahren vorausgesetzt wird. Bei einem Entsorgungserlös von Fr. 50.– pro Tonne Altholz ist die Raumwärmeerzeugung ab 2–3 MW wirtschaftlich.

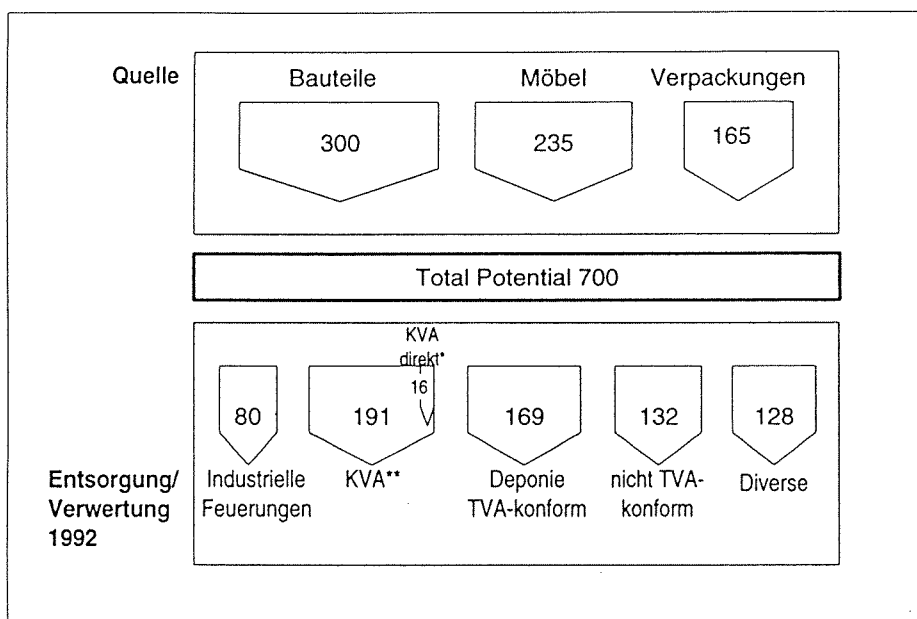
Herkunft und Potential von Altholz

Altholz stammt aus den Bereichen Bau, Möbel und Verpackungsmaterial. Möbel fallen vor allem im Siedlungsabfall an, Abbruchholz kann dagegen separat erfasst werden. Altholz aus Verpackungsmaterial fällt bei Grossverteilern an, welche teilweise bereits über eigene Verbrennungsanlagen verfügen [Vock et al. 1993]. In der Schweiz wurden im Jahr 1992 rund 2,14 Mio. t Siedlungsabfälle und 0,12 Mio. t brennbare Bauabfälle in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) behandelt und teilweise energetisch genutzt. Im weiteren wurden rund 1,35 Mio. t Abfälle in Deponien abgelagert, darunter 0,68

Mio. t Siedlungsabfälle, 0,09 Mio. t Klärschlamm und 0,58 Mio. t brennbare Bauabfälle [Schwank et al. 1994].

Von den in der Schweiz jährlich anfallenden rund 700 000 t Altholz werden heute 430 000 t in Deponien abgelagert und anderweitig entsorgt, 190 000 t in Kehrichtverbrennungsanlagen behandelt und 80 000 t in industriellen Feuerungen energetisch genutzt (Bild 1). Die heutige Verwendung von Altholz in industriellen Anlagen erfolgt vor allem in Rostfeuerungen mit einer Leistung von knapp 1 MW bis rund 10 MW, die in der Holz- und Papierindustrie sowie von Bau- und Entsorgungsunternehmen betrieben werden [Vock et al. 1993], sowie zur Direktbefeuerung in Zementöfen und – zusammen mit Reststoffen aus der Papierherstellung – in einer 17-MW-Wirbelschichtfeuerung [Hartweck 1992].

Die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) verpflichtet die Kantone, die heute noch deponierten Abfälle in geeigneten Anlagen zu verbrennen. In Zukunft sollen 380 000 t energetisch genutzt werden in industriellen Feuerungen zur Wärmeerzeugung, in Zementöfen sowie zur Spitzenlastabdeckung in KVAs im Winter. 280 000 t sollen in KVAs behandelt und 40 000 t anderweitig entsorgt werden (Bild 2). Das noch nicht genutzte Potential zur energetischen Nutzung von Altholz beträgt somit rund 300 000 t Altholz pro Jahr, was einem Anteil von 0,5% des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs entspricht.

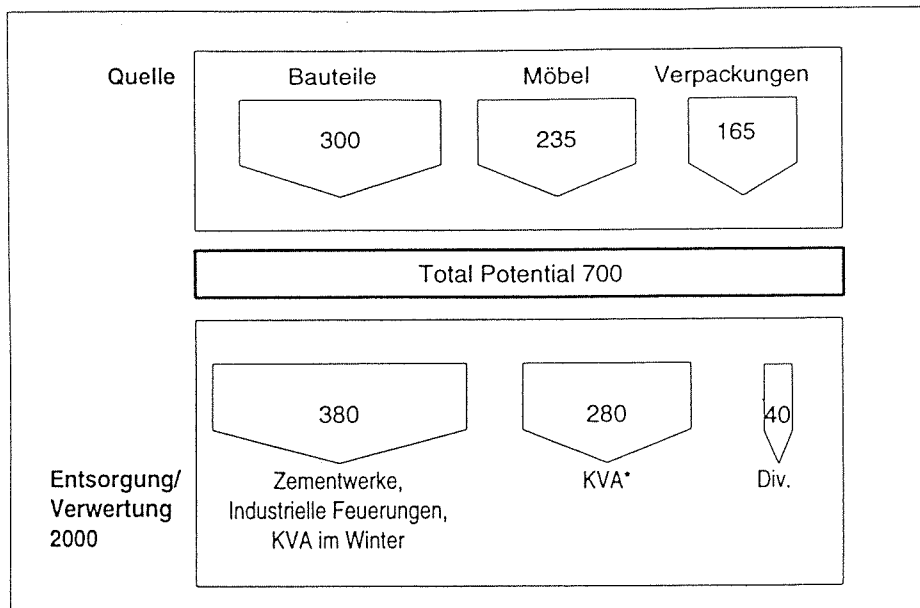


* Direktanlieferungen von Altholz an Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA)

** vermischt mit Siedlungsabfällen und brennbaren Bauabfällen

Bild 1 Heutige Mengenflüsse für Altholz in 1000 t pro Jahr [Schwank et al. 1994].

* Ingenieurbüro Verenum, 8006 Zürich; Institut für Energietechnik, ETH, 8092 Zürich



* vermischt mit Siedlungsabfällen und brennbaren Bauabfällen

Bild 2 Künftig mögliche Mengenflüsse für Altholz in 1000 t pro Jahr [Schwank et al. 1994].

Zielsetzung

Das Aktionsprogramm Energie 2000 strebt eine Stabilisierung des Energieverbrauchs und eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger an. Bis ins Jahr 2000 sollen in der Schweiz zusätzlich 3,5% der Wärmeerzeugung und 0,5% der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energieträgern gedeckt werden. Der Einsatz ausgereifter, heute zur Verfügung stehender Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energieträger wird deshalb im Rahmen verschiedener Aktivitäten gefördert, wobei das Energieholz den grössten Beitrag zu leisten vermag. Mit der Verwertung von Altholz in dafür geeigneten Altholzfeuerungen werden folgende Ziele verfolgt:

- Substitution fossiler Brennstoffe
- Höhere Energieausnutzung als in Kehrichtverbrennungsanlagen
- Kostengünstige Entsorgung dank Wärmenutzung und dadurch
- Verhinderung der Deponierung von Altholz
- Verhinderung unerlaubter Verbrennung in konventionellen Holzfeuerungen
- Verhinderung unerlaubter offener Verbrennung

Weil die unerlaubte Verbrennung hohe Emissionen und eine unkontrollierte Rückstandsentsorgung zur Folge hat, ist die Verbrennung in ungeeigneten Anlagen sowie die offene Verbrennung z. B. auf

Baustellen unbedingt zu unterbinden. Kostengünstige und gut organisierte Entsorgungswege sind eine wichtige Voraussetzung, um die unerlaubte Verbrennung von Altholz zu verhindern. Soweit dies betrieblich möglich ist, sollte in Zukunft eine separate Entsorgung von Altholz deshalb ebenso selbstverständlich werden, wie dies heute für Altglas und Altpapier bereits weitgehend der Fall ist.

Systemwahl

Die einzuhaltenden Emissionswerte wurden aufgrund der Grenzwerte für Altholz gemäss Luftreinhalte-Verordnung sowie bei ausgewählten Schadstoffen in Anlehnung an die Grenzwerte für Siedlungsabfall festgelegt. Da die Dioxin- und Furanemissionen durch die Auslegung des Gesamtsystems bestimmt werden und in

der Schweiz keine Grenzwerte vorgeschrieben sind, wurde bei der Einholung der Offerten auf die Festlegung von Dioxingrenzwerten verzichtet. Bei den Anlagenkonzepten wurden jedoch die Erfahrungen zur Dioxinminimierung in Kehrichtverbrennungsanlagen und Altholzfeuerungen berücksichtigt [Vogg et al., 1990, Mosch 1992, Hasler et al. 1993a, Hasler et al. 1994 a].

Zur thermischen Nutzung von Altholz wurden Offerten eingeholt für Rostfeuerungen, Wirbelschichtfeuerungen und Festbettvergaser. Unterschubfeuerungen wurden als nicht geeignet für den asche-reichen und zu Anbackungen neigenden Brennstoff Altholz betrachtet und nicht weiter untersucht. Gleichzeitig wurden die Möglichkeiten zur Abscheidung von Partikeln, Schwermetallen und Halogeniden in Elektrofiltern, Gewebefiltern, Keramikfiltern und Wäschern abgeklärt.

Brennstoffkosten

Die Kosten für das beim Brennstoffsilo angelieferte und aufbereitete Altholz hängen vom Entsorgungspreis am Ort des Anfalls sowie den Handling-, Lager-, Transport- und Aufbereitungskosten ab. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden folgende Annahmen für den Altholzpreis getroffen:

- Preis von Fr. 0.– pro Tonne aufbereitetes Altholz (Gratis-Altholzschnitzel)
- Entsorgungserlös für den Anlagebetreiber von Fr. 50.– pro Tonne aufbereitetes Altholz.

Der Bezug von Gratis-Altholzschnitzeln (Fr. 0.–/t) entspricht in etwa den aktuellen Gegebenheiten. Die Entsorgungskosten für nicht aufbereitetes Altholz entsprechen somit gerade den Aufbereitungskosten, welche im Mittel rund Fr. 80.–/t bis Fr. 100.–/t betragen (Bild 3). Dabei wird vorausgesetzt, dass Altholz der Brennstoffklasse «mittel» mit einer maximalen Endstücklänge von 15 cm verarbeitet werden kann. Im Vergleich dazu sind die Ent-

Aufbereitung	Grösse	Durchsatz t/Jahr	Kosten Fr./m ³	Kosten Fr./t
mobil	mittel (< 15 cm)	5'000 – 10'000	20 – 25	100 – 120
	grob (< 25 cm)	10'000 – 15'000	15 – 20	75 – 100
stationär	mittel (< 15 cm)	> 15'000	< 15	< 75
	grob (< 25 cm)	> 15'000	< 10	< 50

Bild 3 Aufbereitungskosten für die Zerkleinerung von Altholz inklusive Magnetabscheidung (Richtwerte) [Nussbaumer et al. 1994].

sorgungskosten für Siedlungsabfall in modernen Kehrrechtverbrennungsanlagen um ein Mehrfaches höher. Als Vergleichsbasis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dient die Wärmeerzeugung mit einer Ölkesselanlage, wobei mit Ölpreisen von Fr. 300.-/t (Größenordnung des aktuellen Ölpreises), Fr. 400.-/t und Fr. 500.-/t gerechnet wird.

Altholz als Brennstoff

Die Verbrennung von Altholz oder Altpapier stellt gegenüber der Verbrennung von naturbelassenem Holz erhöhte Anforderungen an die Beschickung, das Feuerungssystem, die Abgasreinigung und die Ascheaustagung. Die wichtigsten Eigenschaften und Schadstoffgehalte von Altholz sind in Bild 4 zusammengestellt. Im

Vergleich zu unbelastetem Holz sind insbesondere die Gehalte an Chlor, Stickstoff und Schwermetallen erhöht. Im Vergleich zu Siedlungsabfall weist Altholz dagegen deutlich geringere Gehalte an Chlor, Fluor, Quecksilber und Cadmium auf. Insgesamt sind bei der Anlagenauslegung folgende Eigenschaften von Altholz zu beachten:

- Hoher Aschegehalt
- Verminderter Ascheerweichungs- und Ascheschmelzpunkt
- Erhöhter Gehalt an Chlor
- Erhöhter Gehalt an Stickstoff
- Erhöhter Gehalt an Pb, Zn, Cd, Mn, Cr, As
- Variable Schüttdichte
- Grosse Variabilität der Stückgrösse
- Neigung zu Brückenbildung.

	Einheit	Mittelwert	Medianwert	Minimum	Maximum	
Feinanteil	Gew.-%	6.5	6.5	4.0	9.0	
Schüttdichte	kg/m ³	219	220	180	270	
Wassergehalt	Gew.-%	2.2	1.8	1.0	4.4	
Heizwert H_u (berechnet)	MJ/kg	14.8	15.3	12.1	16.6	
Aschegehalt tot.	Gew.-%	5.3	6.1	1.6	11.1	
Stickstoff	N	mg/kg	7 922	7 300	5 600	12 000
Schwefel	S	mg/kg	1 385	450	20	5 800
Chlor	Cl	mg/kg	849	495	20	4 400
Fluor	F	mg/kg	4.2	1.0	0.01	140
Quecksilber	Hg	mg/kg	0.3	0.3	0.005	0.7
Arsen	As	mg/kg	4.1	1.5	0.7	22.0
Cadmium	Cd	mg/kg	3.4	1.0	0.4	24.0
Kobalt	Co	mg/kg	1	1	1	3
Chrom	Cr	mg/kg	3.2	2.0	1.4	9.3
Blei	Pb	mg/kg	3.14	3.20	4.3	6.90
Kupfer	Cu	mg/kg	2.5	1.7	1.1	8.5
Nickel	Ni	mg/kg	6	5	2	12
Zinn	Sn	mg/kg	6	7	0.04	12
Zink	Zn	mg/kg	53.5	53.0	1.70	9.60
Mangan	Mn	mg/kg	2.46	1.00	0.80	6.20

Bild 4 Zusammenstellung von Brennstoffanalysen von Altholz. Quellen: [Stahel et al. 1990, Sturm 1991, Bottmann et al. 1992, Tobler et al. 1993, Nussbaumer et al. 1993, Hasler et al. 1993 a, 1993 b, 1994 a, 1994 b, Nussbaumer et al. 1994].

Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit sind die Emissionen an Staub, Schwermetallen, Halogeniden und Stickoxiden zu berücksichtigen. Dabei sind die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung 1992 für Altholz und Papier einzuhalten (LRV, Anh. 2, Ziff. 72). Im weiteren sind die vorsorglichen Grenzwerte zu berücksichtigen (LRV, Anh. 1, Ziff. 5 und 6). Da die Nutzung von Altholz in separaten Altholzfeuerungen nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Schadstoffbelastung gegenüber der Entsorgung in KVAs führen soll, wird bei einzelnen Schadstoffen vorausgesetzt, dass Emissionswerte eingehalten werden müssen, die sich an den Grenzwerten für Siedlungsabfall orientieren (LRV 92, Anh. 2, Ziff. 71). Die wichtigsten Grenzwerte gemäss LRV sowie die dieser Arbeit zugrunde gelegten Grenzwerte sind in Bild 5 zusammengestellt. Bild 6 zeigt, für welche Stoffe eine Abscheidung erforderlich ist.

Feuerungen und Vergaser

Für die Feuerungen bzw. Vergaser wurde die Einhaltung folgender Grenzwerte nach einem Zyklon verlangt: Kohlenmonoxid (CO) < 100 mg/Nm³, Kohlenwasserstoffe (HC) < 20 mg/Nm³, Feststoffe < 250 mg/Nm³ (alle Werte bezogen auf 11 Vol.-% O₂). Zur Offerteinholung wurden mehrere Hersteller von Vorschubrostfeuerungen angefragt. Im weiteren wurden Offerten für eine zirkulierende Wirbelschichtfeuerung sowie für zwei Gleichstrom-Festbettvergaser angefragt. Insgesamt sind 14 Offerten für Feuerungen und Vergaser eingegangen. Da verschiedene Erfahrungen mit Vorschubrostfeuerungen bei der Verbrennung von Altholz vorliegen [Hasler et al. 1993 b], wurde die entsprechende Anlage beim Kostenvergleich als «Referenz» bezeichnet und mit den Kosten der «Variante» verglichen. Bild 7 zeigt eine Vorschubrostfeuerung für Altholz. Bei der «Variante» wurden kostengünstige Komponenten für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit ausgewählt.

Bei Vorschubrostfeuerungen müssen für die Brennstoffklasse «mittel» (max. 15 cm) und «grob» (max. 25 cm) Brennstoffzuführung und Entaschung so ausgelegt werden, dass auch grosse Fremtteile gefördert werden können. Im weiteren muss durch geeignete Regelung eine konstante Rostbelegung gewährleistet werden. Für einen zuverlässigen und störungsarmen Betrieb sind zudem entsprechende Massnahmen gegen Anbackungen vorzusehen (Abgasrückführung zur Vermeidung von Temperaturspitzen im Glutbett, Kühlung der Feuerraumwände und geeignete Materialwahl der Feuerraumwände, evtl. Regelung der Glutbetthöhe).

Für die Verwertung von Altholz in zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen ist eine

Schadstoff	Einheit	Emissionsgrenzwerte LRV			Garantiewerte Offertanfragen	
		KVA	Altholz	Gültigkeit ab	F/V	AGR
Staub	mg/Nm ³	10	50		250	10
Pb+Zn	mg/Nm ³	1	5		-	2
Hg	mg/Nm ³	0.1	0.2	1 g/h	-	-
Cd	mg/Nm ³	0.1	0.2	1 g/h	-	0.2
SO₂	mg/Nm ³	50	250	2500 g/h	-	-
Cl (als HCl)	mg/Nm ³	20	30	300 g/h	-	20
F (als HF)	mg/Nm ³	2	5	50 g/h	-	2
NO_x	mg/Nm ³	80	250	2500 g/h	-	150
NH₃	mg/Nm ³	5	30	300 g/h	-	10
HC	mg/Nm ³	20	50		20	-
CO	mg/Nm ³	50	250		100	-

Bild 5 Emissionsgrenzwerte gemäss LRV und Garantiewerte für die Offertanfragen. Bezugswerte: 11 Vol.-% O₂, trockenes Abgas bei Normbedingungen. KVA (Kehrichtverbrennungsanlagen): LRV, Anh. 2, Ziff. 71. Altholzfeuerungen: LRV, Anh. 2, Ziff. 72, sowie Anh. 1, Ziff. 5 und 6.

AGR: Abgasreinigung, F/V: Feuerungen/Vergaser.

Schadstoff	max. Gehalt im Abgas nach Zyklon (Staub max. 250 mg/Nm ³) [mg/Nm ³]	Massnahmen erforderlich	Abscheidegrad Abgasreinigung
Hg	0.05	keine	-
Cd	0.2	keine	-
SO₂	ca. 150	keine	-
HCl	ca. 100	ab 1.5 MW	> 75%
HF	ca. 10	ab 2.2 MW	> 50%
NO_x	ca. 500	ab 2.5 MW	> 50%
NH₃	-	-	-

Bild 6 Zu erwartende Schadstoffgehalte im Abgas einer Altholzfeuerung (nach Zyklon) und Abscheidegrad zur Einhaltung der vorsorglichen Emissionsgrenzwerte [Nussbaumer et al. 1994].

Abscheidung von Staub und Schwermetallen

Die Abscheidung von Schwermetallen ist mit der Staubabscheidung verknüpft, da die meisten Schwermetalle partikelgebunden oder partikelförmig vorliegen. Eine Ausnahme bildet Quecksilber, welches einen hohen Dampfdruck aufweist und nur zu einem geringen Anteil in Partikelform vorliegt. Brennstoffanalysen zeigen, dass Altholz nur sehr wenig Quecksilber enthält [Stahel et al. 1990, Hasler et al. 1994 b], so dass selbst im Falle einer vollständigen Emission in das Abgas der vorsorgliche Grenzwert von 0,2 mg/Nm³ nicht erreicht wird und somit keine Massnahmen zur Quecksilberabscheidung erforderlich sind.

Zur Abscheidung von Staub und Schwermetallen werden trockene, quasitrockene und nasse Verfahren unterschieden. Die trockenen und quasitrockenen Verfahren arbeiten abwasserfrei und liefern einen trockenen Rückstand. Quasitrockene Verfahren kommen hauptsächlich im Grossindustriebereich bei Abgasen mit hohen Emissionen z. B. von Schwefeldioxid (SO₂) zur Anwendung. Bei der nassen Abgasreinigung entstehen ein schwermetallhaltiger Schlamm sowie ein schwermetall- und salzhaltiges Abwasser, so dass weitere Aufbereitungsschritte notwendig sind. Eine trockene Staub- und Schwermetallabscheidung umfasst z. B. einen Zyklon zur Vorabscheidung und ein nachgeschaltetes Elektro-, Gewebe- oder Keramikfilter. Eine nasse Staubabscheidung umfasst z. B. einen Rotations- oder Venturiwäscher.

Die Abscheidegrade der verschiedenen Entstaubungsapparate sind sehr unterschiedlich. Während filternde Abscheider, wie z. B. Gewebe- oder Elektrofilter, auch für sehr kleine Partikel hohe Abscheidegrade aufweisen, können Partikel < 2 µm in einem Zyklon nicht abgeschieden werden. Der Zyklon wird jedoch häufig zur Vorabscheidung eingesetzt. Bei Wäschern ist die Abscheidung von sehr kleinen Partikeln mit hohem Energieaufwand verbunden. Die Abscheidung von sehr feinen Partikeln ist bei Holzfeuerungen wichtig, da mehr als 80 Gew.-% der Staubpartikel < 0,5 µm sein können [Nussbaumer 1989]. Andererseits liegen die Rohgasstaubgehalte z. B. bei Rostfeuerungen im Bereich von etwa 1 g/Nm³. Mit einem Zyklonabscheider ist es in der Regel nicht möglich, einen Reingasstaubgehalt < 50 mg/Nm³ einzuhalten. Einfache Waschverfahren, wie z. B. Kolonnenwäscher oder Strahlwäscher, sind zur Abscheidung von Partikeln ebenfalls nicht geeignet, da sie nur geringe Abscheidewirkungsgrade für Feinpartikel aufweisen. So wurde bei Versuchen an Abgasen aus Altholzfeuerungen mit einem Kolonnen-

aufwendigere Aufbereitung erforderlich (kleinere Korngrösse, geringerer Anteil Fremdstoffe). Im weiteren sind vor allem bei einer Leistung < 10 MW die Anlagekosten deutlich höher.

Der Einsatz von Gleichstrom-Festbettvergäsern für Altholz wird aufgrund des technischen Standes (Entwicklungsstadium) nicht für den Praxisbetrieb empfohlen. Die wesentlich höheren Investitionskosten im Vergleich zu Vorschubrostfeue-

rungen sind bei einer thermischen Nutzung des Brennstoffs nicht zu rechtfertigen, da die Abgasreinigung nicht weniger aufwendig ist als bei Rostfeuerungen [Hasler et al. 1993 b]. Erfahrungen aus Versuchsanlagen haben zudem gezeigt, dass die Rückstände einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweisen können, was vor der Deponierung eine Nachverbrennung oder Nachbehandlung erfordern würde.

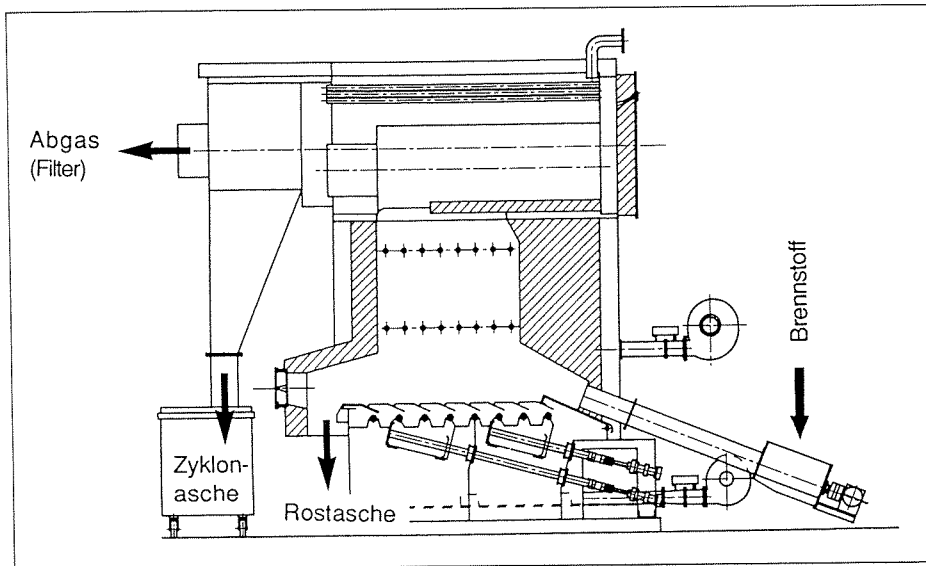


Bild 7 2-Zonen-Vorschubrostfeuerung (Ygnis)

wäscher eine maximale Reduktion der Staubfracht um 30% erreicht [Stahel et al. 1990]. Das Elektrofilter weist den geringsten Druckverlust und den geringsten Energieverbrauch auf. Der Energieverbrauch beim Gewebefilter ist mindestens dreimal höher, ein Venturiwäscher benötigt einen etwa 10mal höheren Energieaufwand als ein Gewebefilter.

Kombinierte Abscheidung von Staub, Schwermetallen und HCl

Bei der Altholzverbrennung in Feuerungsanlagen > 1,5 MW ist eine Abscheidung von Chlorwasserstoff (HCl) erforderlich. Fluorwasserstoff (HF) hat eine geringere Bedeutung, da deren Konzentration um mindestens eine Größenordnung geringer ist und das Abscheideverhalten ähnlich demjenigen von HCl ist. Da Chlorwasserstoff gasförmig vorliegt, ist es bei trockenen Verfahren in der Regel nicht möglich, HCl ohne Zugabe eines Sorptionsmittels ausreichend abzuscheiden. Bei Gewebe- und Elektrofiltern wird das Abgas deshalb vor dem Filter mit einem alkalischen, festen Sorptionsmittel, wie z. B. Kalkhydrat ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), vermischt oder dem Filter ein Wäscher zur Chlorabscheidung nachgeschaltet. Bei nassen Staubabscheidungsverfahren ist eine Abscheidung von sauren Schadgasen ohne Zusatzstoffe möglich. Durch alkalische Waschwasserzusätze kann der Abscheidegrad gesteigert werden.

Entstickung

Bei der Verbrennung von Altholz entstehen Stickoxide NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), die zu mehr als 90% als NO vorliegen. Bei für Holzfeuerungen typischen Temperaturen

bis ca. 1200 °C stammen die Stickoxide hauptsächlich aus dem im Brennstoff vorhandenen Stickstoff [Nussbaumer 1989]. Eine Verminderung der Stickoxide im Abgas ist durch Zugabe von Ammoniak (NH_3) oder Harnstoff ($\text{CO}[\text{NH}_2]_2$) als Reduktionsmittel möglich. Dabei werden folgende Verfahren unterschieden:

- SNCR-Verfahren (selective non catalytic reduction) und
- SCR-Verfahren (selective catalytic reduction).

Die wichtigsten Vor- und Nachteile sind: [Nussbaumer 1992, Nussbaumer et al. 1993, Good et al. 1994]:

SNCR-Verfahren: Vorteile: Einfache Bauart, Verbesserung des Ausbrandes, Möglichkeit zur Verhinderung der Dioxinbildung; Nachteile: Höherer Verbrauch von Reduktionsmittel, geringerer Entstickungsgrad und höhere NH_3 -Emissionen als beim SCR-Verfahren, erhöhte NO_x - und NH_3 -Emissionen, wenn das Temperaturfenster von 850 °C bis 950 °C nicht eingehalten wird.

SCR-Verfahren: Vorteile: Geringer Reduktionsmittelverbrauch, NH_3 -Speicherkapazität des Katalysators (V_2O_5) verhindert NO_x -Spitzen im Reingas, bei entsprechender Betriebsweise oder entsprechendem Katalysatormaterial können Dioxine und Furane zu mehr als 90% oxidiert werden. Nachteile: Katalysatorvergiftungen und Ablagerungen (erhöhter Druckabfall) möglich, insbesondere bei der High-dust-Variante, Ersatz-Katalysator nach einigen 1000 Betriebsstunden (bei Altholz noch keine Erfahrungswerte).

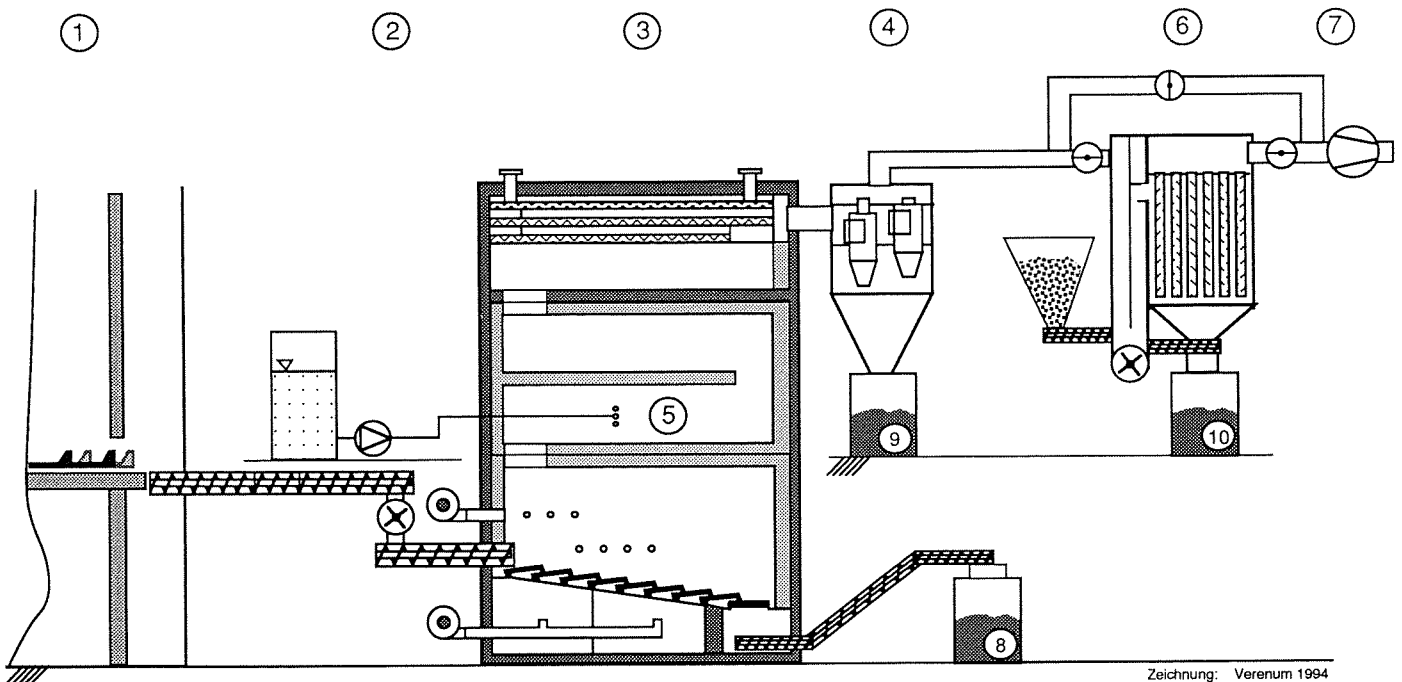
Rückstände

Bei der Altholzverbrennung in einer Rostfeuerung und einer Abgasreinigung mit trockenen Rückständen fallen in der Regel folgende Verbrennungsrückstände an:

- Rostasche
- Zyklonasche
- Elektro- oder Gewebefilterasche.

Kosten in kFr.	1 MW		2.5 MW		5 MW		10 MW	
	Ref	Var	Ref	Var	Ref	Var	Ref	Var
Schnitzelsilo	280	280	400	400	580	580	900	900
Altholzfeuerung	680	340	890	520	1 790	810	2 735	1 515
Denox SCR	190		280		470		1 030	
Denox SNCR		110		140		230		350
Ölkessel	106	106	220	220	451	451	890	890
Gewebefilter m. Kalk	270	110	440	250	880	430		790
Elektrofilter m. Kalk							1200	
Hydraulik, Elektro	105	105	235	235	365	365	420	420
Gebäude	225	225	383	383	500	500	646	646
Planung	260	179	370	279	603	402	805	584
TOTAL	2'120	1'460	3'220	2'430	5'640	3'770	8'630	6'100

Bild 8 Investitionskosten für 1-MW-, 2,5-MW-, 5-MW- und 10-MW-Altholzfeuerungen mit Abgasreinigung und Entstickungseinrichtung. Bei den Anlagen Referenz (Ref) wurden Komponenten mit Erfahrung mit Altholz ausgewählt, bei der Variante (Var) kostengünstigere Angebote.

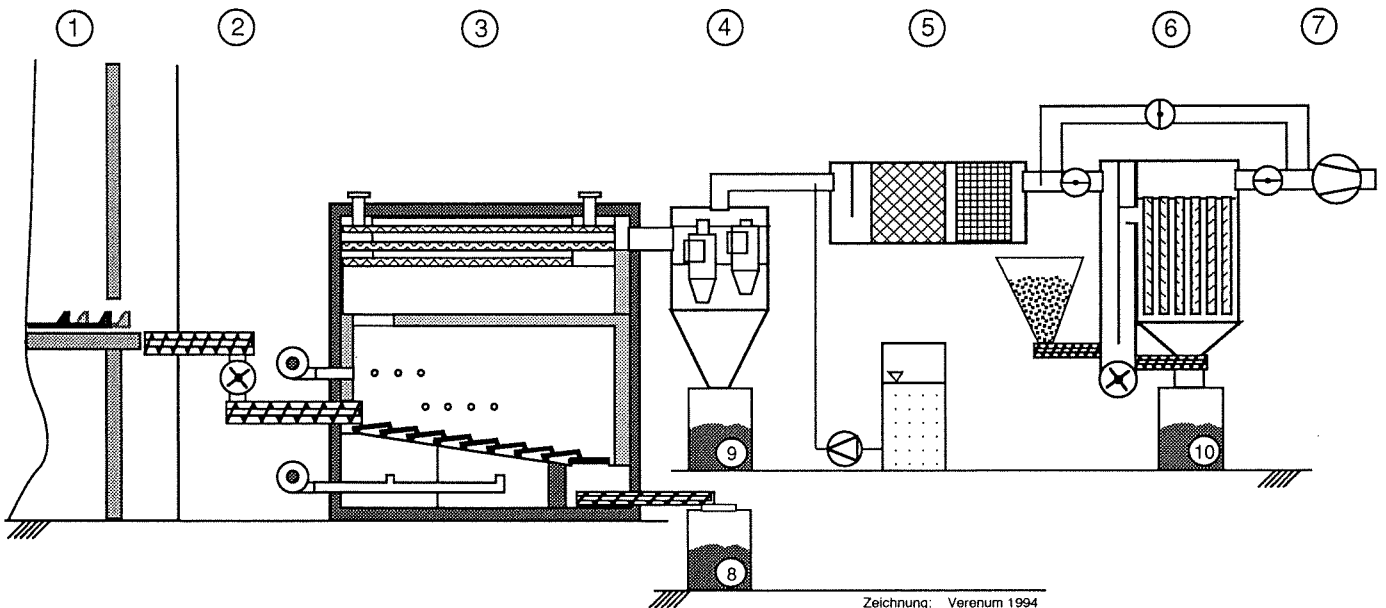


Zeichnung: Verenum 1994
Th. Nussbaumer

Bild 9 Anlagenkonzept einer Altholzfeuerungsanlage mit Vorschubrostfeuerung, SNCR-Entstickung und trockener Abgasreinigung für HCl und Schwermetalle mit Filter und Sorptionsmittelzugabe.

- 1 Silo mit Schubbodenaustragung
- 2 Schnecke zur Feuerungsbeschickung
- 3 Vorschubrostfeuerung mit Primärluftzugabe (mehrere Zonen) und Sekundärluftzugabe
- 4 Zyklon zur Grobentstaubung
- 5 Reduktionskammer mit Eindüsung von Ammoniak oder Harnstoff für SNCR-Verfahren

- 6 Gewebefilter (Bild) oder Elektrofilter mit Sorptionsmittelzugabe
- 7 Abgasventilator
- 8 Rostasche
- 9 Zyklonasche
- 10 Filterasche



Zeichnung: Verenum 1994
Th. Nussbaumer

Bild 10 Anlagenkonzept einer Altholzfeuerungsanlage mit Vorschubrostfeuerung, SCR-Entstickung und trockener Abgasreinigung.

- 1 Silo mit Schubbodenaustragung
- 2 Schnecke zur Feuerungsbeschickung (unten) und Tank für Reduktionsmittel (oben)
- 3 Vorschubrostfeuerung mit Primärluftzugabe (mehrere Zonen) und Sekundärluftzugabe
- 4 Zyklon zur Grobentstaubung
- 5 Katalysator mit Eindüsung von Ammoniak oder Harnstoff für SCR-Verfahren

- 6 Gewebefilter (Bild) oder Elektrofilter mit Sorptionsmittelzugabe
- 7 Abgasventilator
- 8 Rostasche
- 9 Zyklonasche
- 10 Filterasche

Die Gesamtmenge der Rückstände ist durch den Gehalt an Inertmaterial im Brennstoff bestimmt. Deren Verteilung auf Rostasche, Zyklonasche und Filterasche ist von der Feuerungstechnologie, der Feuerungseinstellung und den eingesetzten Abgasreinigungssystemen abhängig [Hasler et al. 1994 b, Kasser 1994]. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurde angenommen, dass die Entsorgungskosten der Verbrennungsrückstände Fr. 12.50 bis Fr. 25.– pro Tonne trockenen Brennstoff betragen.

Anlagenkonzepte Feuerung und Abgasreinigung

Anhand der Grundlagen und der eingegangenen Offerten können verschiedene Gesamtanlagen kombiniert werden. Für den Vergleich möglicher Anlagenkonzepte werden für 1 MW, 2,5 MW, 5 MW und 10 MW je zwei Anlagenkonzepte aus den Offerten zusammengestellt, die aufgrund des Konzepts und der Komponenten nach minimiertem Risiko (= «Referenz») und nach optimierten Kosten (= «Variante») ausgewählt werden. Bei der Referenzanlage gilt der Stand der Technik als weitgehend nachgewiesen, und von den Anlageherstellern können die geforderten Garantien verlangt werden.

Die ausgewählten Anlagenkonzepte können in Anlagen mit nicht-katalytischer Entstickung und Anlagen mit katalytischer Entstickung aufgeteilt werden. Für die Anlagen bis 5 MW wurden für den Fall «Referenz» und «Variante» ein Gewebefilter mit Kalkzugabe ausgewählt. Sie unterscheiden sich nebst der Entstickungseinrichtung durch die Wahl der Feuerung und des Gewebefilters, bei welchen je rund ein Faktor 2 der Investitionskosten verschiedener Anbieter resultieren. Bei der 10-MW-Anlage «Referenz» wurde ein Elektrofilter ausgewählt.

Die Investitionskosten sind in Bild 8 dargestellt, die Anlagenkonzepte SCR und SNCR in Bild 9 und 10.

Wirtschaftlichkeit

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit werden die Nutzwärmepreise der Altholzfeuerungen «Referenz» und «Variante» mit einer Ölfeuerungsanlage verglichen. Als Nutzwärmepreis wird der Preis pro kWh Nutzwärme bezeichnet, welcher aus den Jahreskosten und der jährlich produzierten Nutzwärme berechnet wird. Die Investitionen für die Altholzfeuerungsanlagen fallen gegenüber der Ölfeuerungsanlage etwa drei- bis fünfmal höher aus. Allerdings kann auch die Höhe der Investitionen von Altholzfeuerungsanlagen untereinander stark abweichen. So liegen die Investitionen der Variante im

Vergleich zur Referenzanlage im Leistungsbereich von 1–10 MW um ca. 30% tiefer. Bei der Feuerungsanlage, der SCR-Anlage und dem Gewebefilter betragen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Anbietern bis mehr als einen Faktor 2. Zur Berechnung der Jahreskosten, welche sich aus Kapital- und Betriebskosten zusammensetzen, werden folgende Annahmen getroffen:

● Kapitalkosten	6%
● Annuität:	
– Anlagenteile (15 Jahre)	10,3%
– Installationen, Planung (25 Jahre)	7,82%
– Bauten (40 Jahre)	6,65%

Die Nutzwärmepreise der 1-MW-Altholzanlagen «Referenz» und «Variante» sind in Bild 11 in Funktion der Vollbetriebsstundenzahl dargestellt und denjenigen einer Ölfeuerungsanlage bei Ölpreisen von Fr. 300.–/t, Fr. 400.–/t und Fr. 500.–/t gegenübergestellt. Bild 12 zeigt die Nutzwärmepreise für 5-MW-Altholzfeuerungen.

Schlussfolgerungen

Altholzaufbereitung

Der Aufwand für die Brennstoffaufbereitung kann die Wirtschaftlichkeit von Altholzfeuerungen entscheidend beeinflussen. Für Anlagen ab 2–3 MW sollte deshalb künftig die Brennstoffklasse «mittel» (Endstücklänge max. 15 cm) oder bei grösseren Anlagen die Brennstoffklasse «grob» (max. 25 cm) eingesetzt werden. Diese Sortimente können mit langsamlaufenden Hackern in einem Arbeitsschritt hergestellt werden.

Feuerungen und Vergaser

Für die thermische Nutzung von Altholz kommen nur Feuerungen mit einer leistungsfähigen Fördereinrichtung und Entaschung in Frage, welche auch bezüglich Anbackungen und Verschlackung unempfindlich sind. Dies sind in erster Linie Vorschubrostfeuerungen mit einer Aufteilung der Verbrennungsluft in mehrere Zonen. Zur Erzielung der geforderten Ausbrandqualität ist zudem eine gute Vermischung von Verbrennungsluft (Sekundärluft) und Brenngasen erforderlich. Die Preisunterschiede zwischen Vorschubrostfeuerungen verschiedener Anbieter betragen mehr als einen Faktor 2, was die Investitionen der Gesamtanlage und die Jahreskosten um rund 20–25% beeinflusst. Im Vergleich zu anderen Feuerungs- und Vergasungssystemen stellt die Vorschubrostfeuerungsanlage die wirtschaftlichste Lösung dar. Der Einsatz einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungsanlage (ZWS) erfordert einen erhöhten Aufwand zur Brennstoffaufbereitung (kleinere Korngrösse, geringerer An-

teil an Fremdstoffen). ZWS-Anlagen sind wesentlich teurer als Rostfeuerungen und werden im Leistungsbereich bis 10 MW nicht standardmässig angeboten. Der Einsatz von ZWS-Anlagen kommt deshalb vor allem in Anlagen > 10 MW in Frage.

Die offerierten Festbettvergaser sind wesentlich teurer als die Vorschubrostfeuerungen und weisen aufgrund der bisherigen Erfahrungen keine Vorteile auf. Im weiteren wird der Einsatz von Festbettvergäsern aufgrund des heutigen Standes der Technik für Altholz nicht empfohlen, da selbst für naturbelassenes Holz noch nicht ausreichende und befriedigende Praxiserfahrungen vorliegen.

Abgasreinigung

Die Abgasreinigung bei einer Altholzfeuerungsanlage umfasst im wesentlichen die Abscheidung von Staub, Schwermetallen (mit Ausnahme von Quecksilber) und sauren Gasen (insbesondere HCl). Im weiteren wird je nach Anforderung bzw. Anlagengrösse eine Abgasentstickung um rund 50% verlangt.

Zur Einhaltung der Grenzwerte für Staub, Schwermetalle und HCl kommt in erster Linie eine trockene Abgasreinigung mit Gewebe- oder Elektrofilter und Zugabe eines Sorptionsmittels, wie z. B. Kalk, in Frage. Bei Gewebefiltern muss eine Zerstörung der Filtermaterialien durch Funkenflug oder Taupunktunterschreitung verhindert werden, wozu Massnahmen wie Funkenlöschanlage und elektrische Beheizung zum Einsatz gelangen. Bei Anlagen bis 5 MW sind Gewebefilter im Mittel kostengünstiger als Elektrofilter. Allerdings bestehen auch bei Gewebefiltern Preisunterschiede von mehr als einem Faktor 2, was die Gesamtkosten um rund 10% beeinflusst. Bei Anlagen ab ca. 10 MW sind die Kosten für Elektro- und Gewebefilter vergleichbar. Als Variante zur trockenen Abscheidung kommt der Einsatz eines Filters mit nachgeschaltetem Wäscher in Frage (Trocken-/Nassverfahren). Dies ermöglicht eine getrennte Abscheidung von partikelförmigen Schadstoffen wie Staub und Schwermetallen sowie gasförmigen Schadstoffen wie HCl und SO₂. Bei Ammoniakemissionen z. B. aus einer SNCR-Entstickungsanlage kann gleichzeitig Ammoniak abgeschieden werden.

Zur Abgasentstickung kommen das SCR und das SNCR-Verfahren in Frage. Beim SCR-Verfahren kann eine Entstickung um deutlich mehr als 50% erzielt werden, ohne massgeblichen Ammoniak schlupf. Das SCR-Verfahren bietet damit eine vom Feuerungssystem unabhängige Lösung zur Abgasentstickung. Im Vergleich verschiedener Anbieter sind zwischen den SCR-Verfahren Preisunterschiede um mehr als einen Faktor 2 zu verzeichnen, was die Gesamtkosten um rund 6–7% beeinflusst.

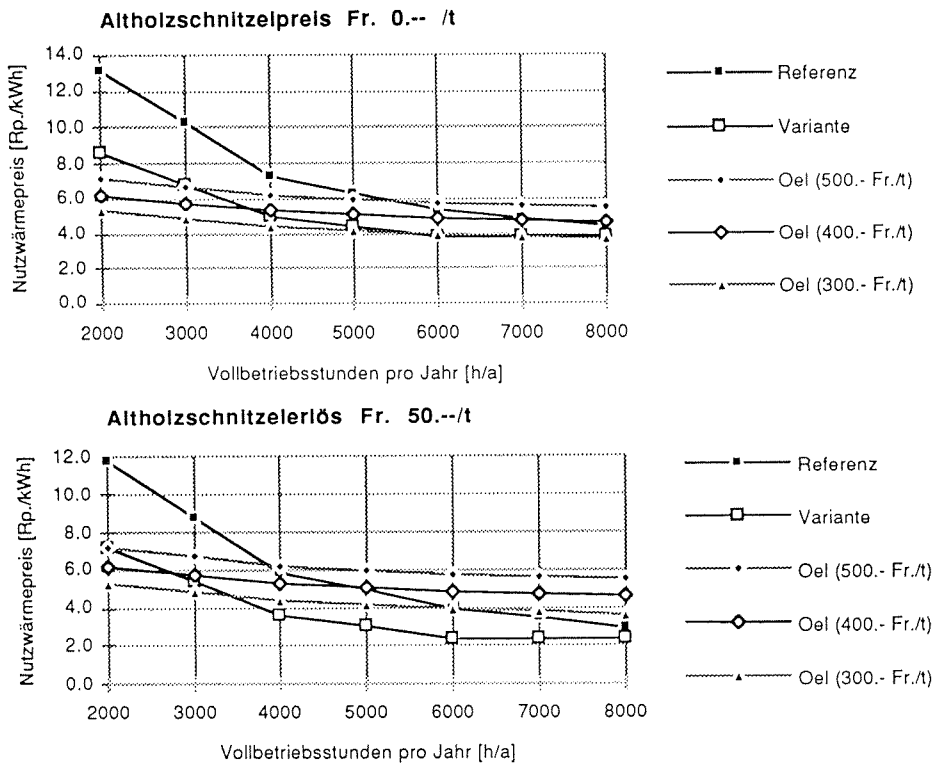


Bild 11 Nutzwärmepreis für 1-MW-Altholzfeuerungen im Vergleich zu Ölfeuerungen bei Heizölpreisen von Fr. 300.-/t, Fr. 400.-/t und Fr. 500.-/t. Obere Grafik: Altholzschnitzelpreis Fr. 0.-/t. Untere Grafik: Altholzschnitzelerlös von Fr. 50.-/t.

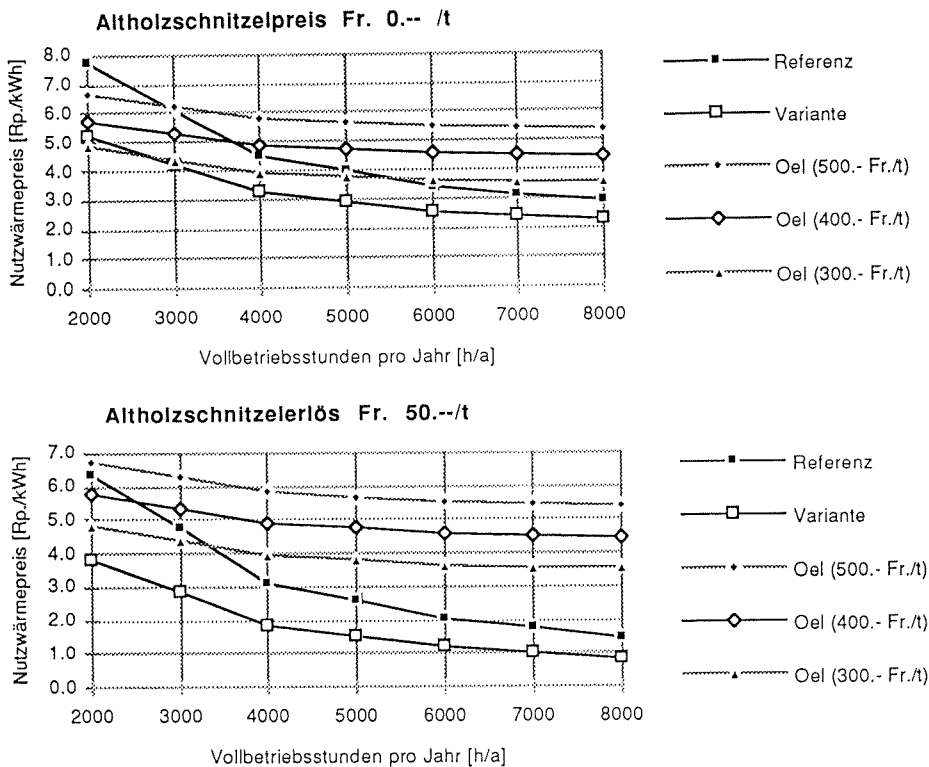


Bild 12 Nutzwärmepreis für 5-MW-Altholzfeuerungen im Vergleich zu Ölfeuerungen bei Heizölpreisen von Fr. 300.-/t, Fr. 400.-/t und Fr. 500.-/t. Obere Grafik: Altholzschnitzelpreis Fr. 0.-/t. Untere Grafik: Altholzschnitzelerlös von Fr. 50.-/t.

Das SNCR-Verfahren kommt als Alternative zum SCR-Verfahren in Frage. Der Verbrauch an Reduktionsmitteln ist höher und der Entstickungsgrad niedriger. Die Erreichung eines Stickoxidwerts von 150 mg/Nm³ sollte mit Altholz möglich sein, aber es ist noch offen, ob dabei der Ammoniakgrenzwert im praktischen Betrieb sicher eingehalten werden kann. Das SNCR-Verfahren ohne Wäscher ist kostengünstiger als die günstigste Offerte für das SCR-Verfahren. Zur Gewährleistung der Einhaltung des Ammoniakgrenzwertes wird das SNCR-Verfahren jedoch vor allem in Kombination mit einem Wäscher empfohlen. Die Kosten für die gesamte Abgasreinigung sind beim SNCR-Verfahren mit Wäscher bei der 1-MW-Anlage leicht höher als die Kosten für das SCR-Verfahren. Ab 2,5 MW sind die Gesamtkosten für das SNCR-Verfahren deutlich niedriger als für die kostengünstigste SCR-Offerte.

Rückstände

Die Zusammensetzung und Eigenschaften der bei Altholzfeuerungen anfallenden Rost-, Zyklon- und Filterasche ist mit den Rückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen vergleichbar. Für die Entsorgung der Rückstände kommen im wesentlichen die gleichen Entsorgungswege wie bei Kehrichtverbrennungsanlagen in Frage. Für die Rostasche bedeutet dies die Entsorgung in Reaktordeponien, während die Filterasche als Sonderabfall gilt und entsprechend aufzuarbeiten oder zu deponieren ist. Wegen des wesentlich niedrigeren Aschegehalts von Altholz (3–10 Gew.-%) als von Siedlungsabfall (30 Gew.-%) sind die Rückstandsmengen um einen Faktor 3–10 geringer.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit von Altholzfeuerungen hängt vor allem ab von folgenden Faktoren:

- Kosten bzw. Erlös für das aufbereitete Altholz
- Investitionskosten
- Annuität der Anlagekosten
- Anlagengröße
- Energiepreis des Vergleichssystems, also z. B. Ölpreis.

Bei einem Altholzschnitzelpreis von Fr. 0/t und einem derzeitigen Ölpreis von Fr. 300.-/t ist eine Altholzfeuerung auf der Basis «Referenz» bei einer Annuität von 15 Jahren und einer Vollbetriebsstundenzahl von 6000 h/a ab 2–3 MW wirtschaftlich. Bei einer Vollbetriebsstundenzahl von 2000–3000 h/a, wie z. B. bei Raumwärme, sind Altholzfeuerungen beim derzeitigen Ölpreis ab ca. 10 MW wirtschaftlich, bei einem Erdölpreis von Fr. 400.-/t bis Fr. 500.-/t ab ca. 2–5 MW.

Bei einem Altholzschnitzel-Erlös von Fr. 50.-/t können Altholzfeuerungsanlagen bereits ab einer Leistung von 1 MW wirtschaftlich sein, sofern eine jährliche Vollbetriebsstundenzahl von ca. 3500–6000 h/a erreicht wird. Für die Bereitstellung von Raumwärme sind Altholzfeuerungsanlagen ab ca. 2–3 MW wirtschaftlich, bei einem Ölpreis von Fr. 400.-/t bis Fr. 500.-/t ab ca. 1 MW. ■

Literatur

- Bottmann, H.-J.; Sköries, H. 1992: Durchführung von Versuchsmessungen in den Rauchgasen einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung für Holzschnitzel bei der Papierfabrik Perlen. Technischer Bericht 2/7/041565/Bo/Sk, TÜV Südwest
- Fritz, W.; Kern, H. 1990: Reinigung von Abgasen. 2. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg, 1990
- Good, J.; Nussbaumer, Th.; Bühler, R.; Jenni, A. 1994: SNCR-Verfahren zur Stickoxidminderung bei einer Holzfeuerung, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1994
- Hartweck, W. 1992: Holzverbrennung in der zirkulierenden Wirbelschicht. In: Nussbaumer, Th. (Ed.): Neue Konzepte zur schadstoffarmen Holzenergie-Nutzung, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1992, 173–188
- Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th.; Bühler, R. 1993 a: Dioxinmissionen von Holzfeuerungen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 208. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1993
- Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th. 1993 b: Stofffluss bei der Verbrennung und Vergasung von Altholz. DIANE 8 – Energie aus Altholz und Altpapier, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, EDMZ-Nr. 805.172 d, November 1993
- Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th.; Bühler, R. 1994 a: Dioxinmissionen von Altholzfeuerungen. DIANE 8, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, EDMZ-Nr. 805.174 d, April 1994
- Hasler, Ph.; Kasser, U. 1994 b: Rückstände aus der Altholzverbrennung. DIANE 8, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, EDMZ-Nr. 805.175 d, Juni 1994
- Kasser, U. 1994: Verwertung und Entsorgung von Rückständen aus Altholzfeuerungen. In: Nussbaumer, Th. (Ed.): Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1994
- Mosch, H. 1992: PCDD/F-Minimierung in Abgas und Reststoffen der Müllverbrennung. Dioxin-Belastung, Quellen, Verbleib. TÜV Südwest/Ecoplan. Symposium, Stuttgart, 6./7. 10. 1992.
- Nussbaumer, Th. 1989: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz. Diss ETH Nr. 8838 ETH Zürich, 1989
- Nussbaumer, Th. 1992: Entstickungsverfahren für Holzfeuerungen. In: Nussbaumer, Th. (Ed.): Neue Konzepte zur schadstoffarmen Holzenergie-Nutzung, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1992, 123–152
- Nussbaumer, Th.; Bühler, R.; Jenni, A. 1993: Abgasentstickung bei Holzfeuerungen durch selektive katalytische und selektive nicht-katalytische Reduktion SCR und SNCR, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1993
- Nussbaumer, Th.; Halser, Ph.; Jenni, A.; Erny, M.; Vock, W. 1994: Emissionsarme Altholznutzung in 1–10-MW-Anlagen, DIANE 8, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1994, EDMZ 805.180 d
- Schwank, O.; Aebersold, A.; Engeli, H. 1994: Perspektiven zur Energienutzung biogener Abfälle in der Schweiz, Analysen und Empfehlungen einer von Buwal/BEW-begleiteten Arbeitsgruppe, Energie 2000, Infrac, Zürich, 2. August 1994
- Stahel, R.; Vock, W.; Kasser, U.; Bühler, R.; Jenni, A.; Nussbaumer, Th. 1990: Altholzkonzentration Kanton Zürich. Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau (AGW), Amt für Technische Anlagen und Lufthygiene (ATAL), Kapitel 17.5, Anhang 17-A, Oktober 1990
- Sturm, P. 1991: Vergasungsversuche mit Altholz und Altholzmischungen in der 0,7-m-ZWS-Pilotanlage, Lurgi 1991
- Tagali, A. 1992: Reinigung von Abluft und Abgas mit Nassetstaubern. «Chemie-Technik» 21, Nr. 4, 119–124 (1992)
- Tobler, H. P.; Noger, N. 1993: Brennstoff und Holzverbrennungsrückstände von Altholzfeuerungen: 1. Teilbericht. Empa St. Gallen, Auftrag 22 032, November 1993
- Vogg, H.; Merz, A.; Stieglitz, L.; Albert, F. W.; Blattner, G. 1990: Zur Rolle des Elektrofilters bei der Dioxin-Bildung in Abfallverbrennungsanlagen, Abfallwirtschaftsjournal 2 (1990), Nr. 9, 529–536
- Vock, W.; Jenni, A.; Steinmann, P. 1993: Übersicht Schweiz: Situationsanalyse der energetischen Nutzung von Altholz und Altpapier, DIANE 8, Bundesamt für Energiewirtschaft, EDMZ, Bern 1993
- Wicke, M. 1970: Aufbau, Leistung und Betriebsverhalten von Nassetstaubern, Fortschrittsberichte VDI-Zeitung, Reihe 3, Nr. 33, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, November 1970

Die vorliegende Untersuchung wurde im Rahmen des Projekts DIANE 8, Energie aus Altholz und Altpapier, im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft durchgeführt. Von der Arbeitsgemeinschaft Verenum, Zürich (Projektleitung); IEU AG, Liestal, und Abfall und Recycling, Liestal.

Der Schlussbericht mit dem Titel «Emissionsarme Altholznutzung in 1–10-MW-Anlagen» kann bezogen werden bei: EDMZ, 3000 Bern, EDMZ-Nr. 805.180 d.