

Nussbaumer, Th.: Anlagentechnik der Holzvergasung und offene Fragen
beim Einsatz von belastetem Altholz, *Heizung Klima* 9 1990, 75-82

Anlagentechnik der Holzvergasung und offene Fragen beim Einsatz von belastetem Altholz

Thomas Nussbaumer



Im vorliegenden Artikel werden aktuelle Anlagenkonzepte der Holzvergasung vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei bei automatischen Anlagen im Leistungsbereich von ca. 2 bis 5 MWth. Im

weiteren werden die wichtigsten Randbedingungen zur Nutzung von belastetem Altholz aufgezeigt und die noch offenen Fragen beim Einsatz in einer Vergasungsanlage behandelt. Im Artikel «Grundlagen der Holzvergasung» in «HeizungKlima» Nr. 7/1990 wurden die Grundreaktionen der Vergasung sowie der Einfluss der Gleich- und Gegenstrombauart und der wichtigsten Betriebsbedingungen auf die Gaszusammensetzung behandelt. Die beiden Artikel basieren auf den Resultaten des Projekts «Holzvergasung-Altholz», das im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Amtes für technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich von der Ingenieurgesellschaft R. Bühler, A. Jenni und Th. Nussbaumer durchgeführt wurde. Ziel dieser Arbeit war, den Stand der Technik von Holzvergasungsanlagen aufzuzeigen und die Möglichkeiten des Einsatzes von Altholz zu untersuchen. Der Bericht «Holzvergasungsanlagen in Europa im Bereich 2 bis 5 MWth» kann beim Bundesamt für Energiewirtschaft in Bern bezogen werden.

Zusammenfassung

Die Holzvergasung kann eine sinnvolle Alternative zur Verbrennung darstellen, da sie einerseits eine höhere Wertschöpfung des Brennstoffs ermöglicht und andererseits Vorteile bezüglich der Abscheidung von Verunreinigungen beim Einsatz von belastetem Altholz aufweisen kann.

Die Vergasung von belastetem Altholz kann in Verbindung mit einem Blockheizkraftwerk bereits unter heutigen Voraussetzungen wirtschaftlich sein, sofern die Schwermetalle in einer angereicherten Fraktion – zum Beispiel in der Schlacke – eingebunden werden und im praktischen Betrieb keine unerwarteten Probleme auftreten. Für eine abschliessende Beurteilung sind Erfahrungen aus dem Betrieb

von Pilotanlagen erforderlich, wobei vor allem folgende Punkte noch abgeklärt werden müssen:

- Zusammensetzung und Aufbereitung des Abwassers
- Verhalten des Brennstoffstickstoffs, insbesondere Umsetzung zu molekularem Stickstoff
- Verteilung und Form von Schwermetallen, Chlor und weiteren Verunreinigungen
- Betriebsverhalten und Emissionen von mit Holzgas betriebenen Verbrennungsmotoren
- Betriebsverhalten der Gesamtanlage mit Vergaser, Gasreinigung, Abwasser- aufbereitung und Stromerzeugungsteil im praktischen Einsatz.

Die Vergasung von naturbelassenem Brennholz zur Stromerzeugung ist zum heutigen Zeitpunkt in der Schweiz nicht wirtschaftlich. Bei einer direkten thermischen Nutzung des Gases können möglicherweise die Stickoxidemissionen durch den Einsatz von Low-NO_x-Schwachgasbrennern im Vergleich zu einer Holzfeuerung vermindert werden. Dazu liegen jedoch keine Erfahrungen vor, so dass die Einsatzmöglichkeiten bestehender Brenner untersucht bzw. entsprechende Techniken entwickelt werden müssen.

Nur wenige Hersteller bieten Vergasungsanlagen an, bei denen eine motorische Nutzung vorgesehen ist. Das von der Firma EFEU entwickelte und von der Schwelm GmbH (Deutschland) angebotene Verfahren weist ein erfolversprechendes Konzept auf. Die Anlage verfügt über einen Gleichstromvergaser mit aufsteigender Vergasung, einen nachgeschalteten Koksreaktor zur Spaltung hochsiedender Verbindungen sowie eine mehrstufige Gasreinigung. Das Verfahren beinhaltet die Rückführung der aus dem Brennstoffstickstoff gebildeten Verbindungen in den Reaktor zur Umwandlung in molekularen Stickstoff. Der Vergasungsteil der Anlage weist den für eine Pilotanlage erforderlichen Stand auf. Die Entwicklung der Gasreinigung ist noch nicht abgeschlossen, so dass die Effizienz der Stickstoffumwandlung und die Problematik der Abwasser- aufbereitung noch nicht abschliessend beurteilt werden können. Die Gasreinigung wird zurzeit an einer Versuchsanlage in Schwelm erprobt, wobei vorerst jedoch keine Untersuchungen mit belastetem Altholz vorgesehen sind.

Eine andere Prozessführung, die zur Nutzung und Entsorgung von Altholz in Frage kommt, besteht darin, den Brennstoff in die Fraktionen Gas, Öl und Rückstand aufzutrennen. Sofern die Schwermetalle in den Rückstand eingebunden werden, stehen das Gas für eine direkte energetische Nutzung und das Öl als speicherbarer Energieträger zur Verfügung. Da dieser Prozess nicht auf vollständige Spaltung der höherwertigen Verbindungen ausgelegt ist, kann der apparative Aufwand der Anlage vergleichsweise klein gehalten werden. Als mögliches System kommt der zur Herstellung von Holzkohle entwickelte Gegenstromvergaser der Bio-Alternative S.A. (Schweiz) in Frage. Auch bei diesem Verfahren liegen keine Erfahrungen beim Einsatz von Altholz vor. Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten müsste nebst dem Verhalten der Schwermetalle untersucht werden, wie sich der Energieinhalt auf die Fraktionen Gas, Öl und Rückstand verteilt.

Einleitung

Holzvergasungsanlagen sind aufwendiger und teurer als Holzfeuerungen. Die Vergasung weist jedoch gegenüber der Verbrennung den Vorteil auf, dass das Gas bei geeigneter Prozessführung in Verbrennungsmotoren zur Wärme-Kraft-Kopplung oder in Spezialfeuerungen, zum Beispiel für industrielle Brennprozesse, eingesetzt werden kann. Im weiteren besteht die Möglichkeit, den bei der Vergasung als Ammoniak vorliegenden Brennstoffstickstoff aus dem Rohgas abzuscheiden. Bei der Verbrennung dagegen bildet ein Teil des Brennstoffstickstoffs Stickoxide, die – falls erforderlich – nur durch aufwendige Sekundärmassnahmen reduziert werden können. Unter der Voraussetzung, dass Funktionstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit erreicht werden, kann die Vergasung somit ein sinnvolles Verfahren zur energetischen Nutzung von Holz und anderen biogenen Brennstoffen darstellen. Beim Einsatz von belastetem Altholz kann die Vergasung zusätzlich Vorteile bezüglich der Schwermetallabscheidung aufweisen, da unter Luftmangel eine Einbindung der Metalle in den festen Rückstand möglich ist.

Altholzpotalential in der Schweiz

Unter dem Begriff «Altholz» werden alle Produkte und Bauteile aus Holz zusammengefasst, die als Abfälle aus den Bereichen Bauwesen, Möbel und Verpackung anfallen. Nicht berücksichtigt werden die Produktionsabfälle oder Restholzsortimente, die bei der Herstellung von Holzprodukten entstehen.

Zur Verminderung des Entsorgungsproblems sind vor allem die Anteile aus den

Bereichen Bau und Möbel von Bedeutung, da sie zusammen beinahe 90% des gesamten Altholzaufkommens ausmachen (Bild 1). Im Rahmen der Untersuchungen zum Altholzkonzept im Kanton Zürich wurden Brennstoffanalysen mit Altholz aus den Sektoren Bau (Bauschutt-holz) und Möbel (Holzanteil im Sperrgut) vorgenommen und Emissionsmessungen bei der Verbrennung in konventionellen Feuerungen durchgeführt. Zwischen den beiden Sortimenten waren keine wesentlichen Unterschiede festzustellen, so dass von einer getrennten Nutzung nicht von vornherein entscheidende Vorteile zu erwarten sind. Obwohl die Zusammensetzung bei anderen Sortimenten verschieden sein kann, zeigen die Resultate, dass Altholz aus den Bereichen Bau und Möbel in der Regel mit Schwermetallen und Chlor verunreinigt ist. Im folgenden wird unter dem Begriff Altholz deshalb belastetes Altholz verstanden. Zusammenfassend können aus den Untersuchungen folgende Hinweise für die Entsorgung von Altholz aus den Bereichen Bau und Möbel abgeleitet werden (Bild 2):

- Hauptproblemstoffe:
 - Pb und Zn, im weiteren Cd
 - Cl und F
 - N (Stickoxidemissionen aus Brennstoffstickstoff)
- Nicht von Bedeutung:
 - Hg (noch zu validieren)

Nutzungs- bzw. Entsorgungstechniken für Altholz müssen somit Abscheidemassnahmen für die Verunreinigungen, insbesondere für Schwermetalle und Chlor, aufweisen. Da die Stickoxide bei der Holzverbrennung hauptsächlich dem Brennstoffstickstoff entstammen, kann ausserdem der hohe Stickstoffgehalt aus Leimen, Bindemitteln usw. bei der Verbrennung zu erhöhten Stickoxidemissionen führen [Nussbaumer 1988]. Die gemessenen Stickoxidwerte bei der Verbrennung von Altholz liegen rund 2- bis 3fach über denjenigen von unbehandeltem Holz, nämlich im Bereich von ca. 350–650 mg/m³ gegenüber ca. 150–250 mg/m³ [Arbeitsgemeinschaft Altholzkonzept Kanton Zürich 1989]. Aus Sicht der Betreiber von Altholzverwertungsanlagen hängt die zukünftige

Stoff	maximal mögliche Emissionen	LRV-Grenzwert	maximal möglicher Wert ÷ LRV-Grenzwert
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[-]
Zn	90	2,5	35
Pb	50	2,5	20
Cl	116	30 ^{*)}	3,9
F	13,8	5	2,8
Cd	0,32	0,2	1,6
Cu	2,2	5	0,4
Cr	1,7	5	0,34
Sn	1	5	0,2
Ar	0,09	1	0,09
Hg	0,009	0,2	0,05

Bild 2 Maximal mögliche Emissionen bei der Verbrennung von Altholz (berechnet aus der Brennstoffzusammensetzung), im Vergleich zu den Grenzwerten der Luftreinhalte-Verordnung (LRV). Quelle: [Arbeitsgemeinschaft Altholzkonzept Kanton Zürich 1989]. *) Annahme, sämtliches Chlor liege in Chlorid-Form vor.

Bedeutung der Stickoxidproblematik massgeblich davon ab, welche Grenzwerte für solche Anlagen nach der neuen Luftreinhalte-Verordnung Gültigkeit haben werden.

Damit ein massgeblicher Beitrag zur Entsorgung des Altholzanfalls kurzfristig realisierbar ist, sollten existierende Aufbereitungstechniken eingesetzt werden können. Ein handelsübliches Schnitzelsortiment sind zum Beispiel Hackschnitzel mit einer Grösse von 40 mm x 20 mm x 10 mm, mit einem Anteil an Endstücken < 220 mm von maximal 1% und einem Feinanteil von maximal 5%.

Offene Fragen beim Einsatz von Altholz

Für den Einsatz von Altholz in Vergasungsanlagen ist abzuklären, in welcher Form und in welcher Fraktion die Schwermetalle bei verschiedenen Prozessbedingungen anfallen. Verschiedene Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Schwermetalle unter geeigneten Prozessbedingungen in inerte Form in die Schlacke bzw. den Rückstand eingebunden werden können [Bender 1988, Schlegel 1989,

Kistler 1986]. Bezüglich der Schwermetalle bei der Pyrolyse von Klärschlamm konnte folgendes Verhalten festgestellt werden [Kistler 1986]:

- Bei Pyrolysetemperaturen bis 750 °C werden Cr, Cu, Ni, Pb und Zn in einer wasserunlöslichen Form in den festen Rückstand eingebunden. Der Kohlenstoff im Rückstand liegt in graphitähnlicher Form vor.
- Bedingt flüchtig ist Cd (bis 600 °C nicht-flüchtig).
- Leicht flüchtig ist Hg (bei 350 °C annähernd quantitativ in Gasphase).

Nicht abschliessend untersucht wurde das Verhalten von Ar, Sn und weiteren Metallen. Die Eluierbarkeit allein reicht zudem nicht aus zur Beurteilung der Endlagerfähigkeit. Dazu müssen auch die Zusammensetzung und das langfristige Verhalten des Rückstands als Ganzes (Verhalten der Stoff-Matrix) bekannt sein. Obwohl nach Untersuchungen der EAWAG noch keine abschliessenden Kriterien zur Beurteilung der Endlagerfähigkeit existieren [Stämpfli et al. 1990], ist bekannt, dass nicht vollständig mineralisierter Kohlenstoff die Endlagerfähigkeit negativ beeinflussen kann. So können zum Beispiel pH-Veränderungen bei Abbaureaktionen von organischem Kohlenstoff die Eluierbarkeit der Schwermetalle erhöhen. Als zentrale Forderung für eine endlagerfähige Form von Reststoffen gilt deshalb, dass der Kohlenstoff möglichst vollständig mineralisiert, d. h. in Form von CO₂, Karbonat (-CO₃) oder Graphit, vorliegen muss. So wird zum Beispiel bei der Kehrichtverbrennung eine Umsetzung des Kohlenstoffs zu CO₂ und Karbonat von mehr als 99,9% gefordert [Brunner 1989].

Anwendungsbereich	Quelle 1		Quelle 2
Bauwesen	790 000 m ³ /a	53%	
Möbel	530 000 m ³ /a	35%	
Verpackungen	180 000 m ³ /a	12%	
Total	1,5 Mio. m³/a (900 000 t/a)		2,2 Mio. m³/a

Bild 1 Jährlicher Altholzanfall in der Schweiz. Quelle 1: [Stahel et al. 1987, Stand Anfang 80er Jahre]. Quelle 2: [Holz-Zentralheizungen 1988].

Aufgrund der Erfahrungen mit Klärschlamm ist zu erwarten, dass die anteilmässig am stärksten vertretenen Schwermetalle Pb und Zn bei der Vergasung in den Rückstand eingebunden werden können. Im weiteren ist Hg, welches bei der Pyrolyse nicht zurückgehalten wird, im Altholz nach den bisherigen Untersuchungen nicht von Bedeutung. Das tatsächliche Verhalten der Schwermetalle und weiterer Verunreinigungen, die zu erwartenden Emissionen in Luft und Wasser sowie die Endlagerfähigkeit der Reststoffe bei der Vergasung von Altholz können aufgrund der vorhandenen Erfahrungen nicht abschliessend beurteilt werden. Zur Beurteilung, ob die Vergasung ein geeignetes Verfahren zur Altholznutzung sein kann, müssen die noch offenen Fragen bezüglich des Verhaltens der Verunreinigungen und der Zusammensetzung der Reststoffe in Versuchen abgeklärt werden.

Vergasungsanlagen

Imbertvergaser

Funktionsprinzip: Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung
Vergaserleistungen: 125 kWth bis 5 MWth

Imbertvergaser wurden im letzten Weltkrieg in grosser Zahl für den Betrieb von Fahrzeugen eingesetzt. Diese Anwendung war durch mehrere Randbedingungen gekennzeichnet, die bei grösseren stationären Anlagen nicht erfüllt sind. So wurde das Nachrutschen der Holzstücke unterstützt durch das durch den Fahrbetrieb bedingte Rütteln des Vergasers. Zum Unterhalt des Vergasers gehörte ein periodisches Entfernen der Asche, die sich am unteren Ende des Reaktors ansammeln konnte und die meist noch grössere Mengen unvollständig vergaster Holzkohle enthielt. Im weiteren konnte bei den kleinen Leistungen und Querschnitten des Reaktors die Luft vergleichsweise einfach über das ganze Brennstoffbett verteilt werden. Die geometrische Vergrösserung des Imbertvergaser von Klein- zu Grossanlagen hat in der Praxis zu Problemen geführt, weil die Luftverteilung im grossen Reaktor nicht befriedigend gelöst wurde und weil ein Teil der Holzstücke bei der Grossanlage unvergast durch den Reaktor durchfallen konnte [Hedden et al. 1986, Münch 1985, Ide et al. 1981]. Imbertvergaser sind aufgrund der Bauart vor allem für Hartholzklötzchen unformaler Abmessungen von ca. 5 cm Kantenlänge mit einem maximalen Feuchtigkeitsgehalt von 20% geeignet. Feinmaterial kann nicht eingesetzt werden, da es im Vergaser zu einer Verdichtung des Brennstoffbetts führt. Wegen des begrenzten Brennstoffsortiments ist das Einsatzgebiet von Imbertvergäsern stark eingeschränkt. Zur

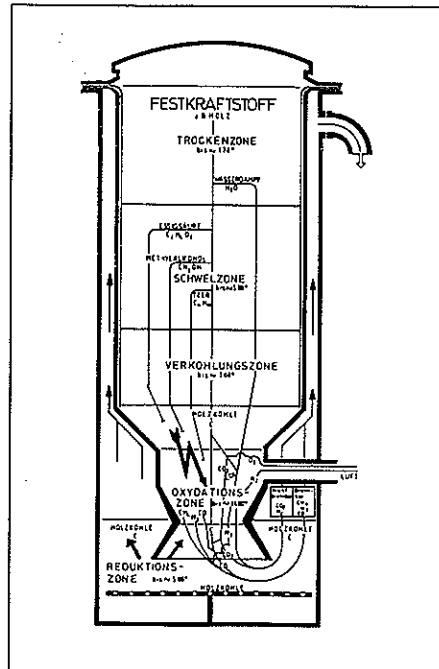


Bild 3 Vergasersystem Imbert.

Nutzung von Altholz kommt das Verfahren deshalb nur bedingt in Frage. Von installierten Anlagen sind zum Teil unbefriedigende Betriebserfahrungen bekannt. So wurde eine Anlage in Deutschland nach kurzer Versuchsdauer stillgelegt, weil sie die Umweltschutzvorschriften nicht erfüllte [Hedden et al. 1986]. Eine in der Schweiz installierte Anlage konnte wegen technischer Probleme nie in Betrieb genommen werden [Münch 1985].

Vergasersystem Michel-Kim (EFEU und Schwelm GmbH)

Funktionsprinzip: Gleichstromvergaser mit aufsteigender Vergasung
Vergaserleistung: 3,5 MWth

Verfahrensbeschreibung

Der Vergaser nach System Michel-Kim arbeitet mit einem Unterschubreaktor, der als *Gleichstromvergaser mit aufsteigender Vergasung* die Vorteile der aufsteigenden Gegenstromvergasung mit denjenigen der absteigenden Gleichstromvergasung verbindet, nämlich die Erzielung eines annähernd teerfreien Gases mit der Möglichkeit, auch feinkörniges Material einzusetzen.

Die Anlage, die von der Firma EFEU entwickelt und von der Schwelm GmbH (Deutschland) angeboten wird, setzt sich zusammen aus Dosiereinrichtung, Unterschubreaktor, nachgeschaltetem Koksreaktor und Gasreinigung [Seeger 1989, Michel-Kim 1985]. Der Unterschubreaktor besteht aus einem zweistufigen Vergasungssystem. Die erste Stufe der Vergasung läuft unter Zufuhr von Primärluft im

unteren Teil des Reaktors ab, die zweite, sogenannte Zwischenvergasung, unter Zufuhr von Sekundärluft im oberen Teil. Mit einer vertikalen Stokerschnecke wird der Brennstoff zentrisch im Hauptreaktor nach oben gefördert und gleichzeitig mit der auf ca. 550 °C vorgewärmten Vergasungsluft im Gleichstrom vergast. Durch die erzwungene, aufwärtsgerichtete Brennstoffförderung wird die Gefahr von Brücken- und Kanalbildung weitgehend vermieden.

Im Zwischenvergaser wird Holzkohle ausgetragen, die entweder zur vollständigen Umsetzung in den Vergaser zurückgeführt oder als Grill- bzw. Aktivkohle verkauft werden kann. Im nachgeschalteten Koksreaktor werden Teere und Phenole unter der thermischen und katalytischen Wirkung des glühenden Koksbetts bei 800–900 °C zu niedermolekularen Verbindungen gespalten. Der Koksreaktor wird vor dem Anfahren des Primärreaktors in Betrieb genommen, damit in der kritischen Anfahrphase ein Verschmutzen der Gasreinigungsanlage verhindert wird.

Der Vergaser ist ausgelegt für den Einsatz von Brennstoffen mit maximal ca. 60 mm Kantenlänge und einem Feinkornanteil bis zu 50%. Es können somit auch gewöhnliche Holzsplitter eingesetzt werden. Als Brennstoff kommt vor allem Rest- und Altholz in Frage, wobei beim Einsatz von Altholz die im Abschnitt «Offene Fragen beim Einsatz von Altholz» aufgeführten Fragen in bezug auf das Verhalten der Schwermetalle noch abgeklärt werden müssen. Als Beimischung zu Holz können zudem Papier, Kunststoffe, Papierschlämme, organische Schlämme, Agrarabfälle und andere organische Reststoffe eingesetzt werden, wobei auch bei diesen Brennstoffen die Emissionen im einzelnen noch untersucht werden müssen.

Gasreinigung und Möglichkeit zur motorischen Nutzung

Der Vergasungsteil der Anlage (Bild 4) wird ergänzt durch eine Wärmerückgewinnung und eine Aufbereitung des Gases zur Nutzung in Verbrennungsmotoren (Bild 5). Die Gasreinigung umfasst folgende Teile:

- Trägheitsentstaubung mit Zyklon, evtl. ergänzt durch Trenndüse [Michel-Kim 1985]
- Nassentstaubung mit Strahlwäscher bzw. Einspritzventilator und Rückführung eines angereicherten Teilstroms des Waschwassers in den Vergaser
- Füllkörperkolonne (Wäscher) zur Kondensation des Rohgases und zur Absorption des Ammoniaks und weiterer Verunreinigungen im Waschwasser. Die Verunreinigungen werden nach dem Gegenstromprinzip im Waschwasser angereichert und mit dem Rückführwasser

zur vollständigen Umsetzung in den Vergaser zurückgeführt.

- Füllkörperkolonne 2 (Stripper) zur Desorption des Ammoniaks aus dem Waschwasser zur Rückführung in den Vergaser sowie zur Sättigung der Vergasungsluft mit Wasserdampf.

In Kombination mit dem Gasreinigungssystem soll das Reingas bei der Vergasung von Holz die in Bild 6 angegebenen Zielwerte bezüglich Heizwert, Staub-, Teer- und Ammoniakgehalt erreichen und in etwa die aufgeführte Gaszusammensetzung aufweisen.

Umwandlung von Brennstoffstickstoff zu molekularem Stickstoff

In der Kondensationsstufe der Gasreinigung kann der Brennstoffstickstoff in Form von Ammoniak abgeschieden und über Beladung der Vergasungsluft im Stripper in den Unterschubreaktor zurückgeführt werden (Bild 7). Da NH-, CHN- und NO-Verbindungen zu molekularem Stickstoff reagieren können, kann bei geeigneter Prozessführung eine Umsetzung des Brennstoffstickstoffs zu molekularem Stickstoff erfolgen. Falls diese Umsetzung nicht in erforderlichem Mass abläuft, kann

	Typische Werte	Zielwert	Einheit
H _u	4-5,5	4-6	MJ/m _N ³
Staub		<5	mg/m _N ³
Teer		<5	
NH ₃		<10	
CO	10-15	20	Vol.-%
CO ₂	18	-	
CH ₄	3-5	2	
C _m H _n	0,5-2	<1	
H ₂	15-18	20-24	
O ₂	0-0,4	0	

Bild 6 Heizwert und Zusammensetzung des Reingases der Vergasungsanlage EFEU/Schwelm. Typische Werte: Messwerte der Prototypanlage (Messungen in Schwelm 1989 und 1990). Zielwerte H_u, Staub, Teer, NH₃: Herstellerangabe.

die Rückführung des Brennstoffstickstoffs aber auch zu einer Anreicherung führen. Es muss deshalb noch abgeklärt werden, ob die Stickstoffumwandlung in ausreichendem Mass abläuft. Bild 8 zeigt die wichtigsten Reaktionswege, nach denen zur Entstickung von Abgasen zugeführter Ammoniak zu NO oder N₂ umgesetzt werden kann [Schu 1990].

Bei unterstöchiometrischen Verbrennungsbedingungen (Sauerstoffmangel)

wird nur ein Teil des Brennstoffstickstoffs zu Stickoxiden umgesetzt [Jahson et al. 1989]. Der Brennstoffstickstoff liegt nach dem Vergasungsprozess vorwiegend in Form von NH_i-Verbindungen vor (i = 0,1,2,3) [Steinrück 1989]. Da die Vergasertemperatur im Bereich von 800-900 °C liegt, herrschen somit ähnliche Bedingungen wie bei den Verfahren zur selektiven nichtkatalytischen Reduktion (SNCR) der Stickoxide. Bei SNCR-Verfahren werden

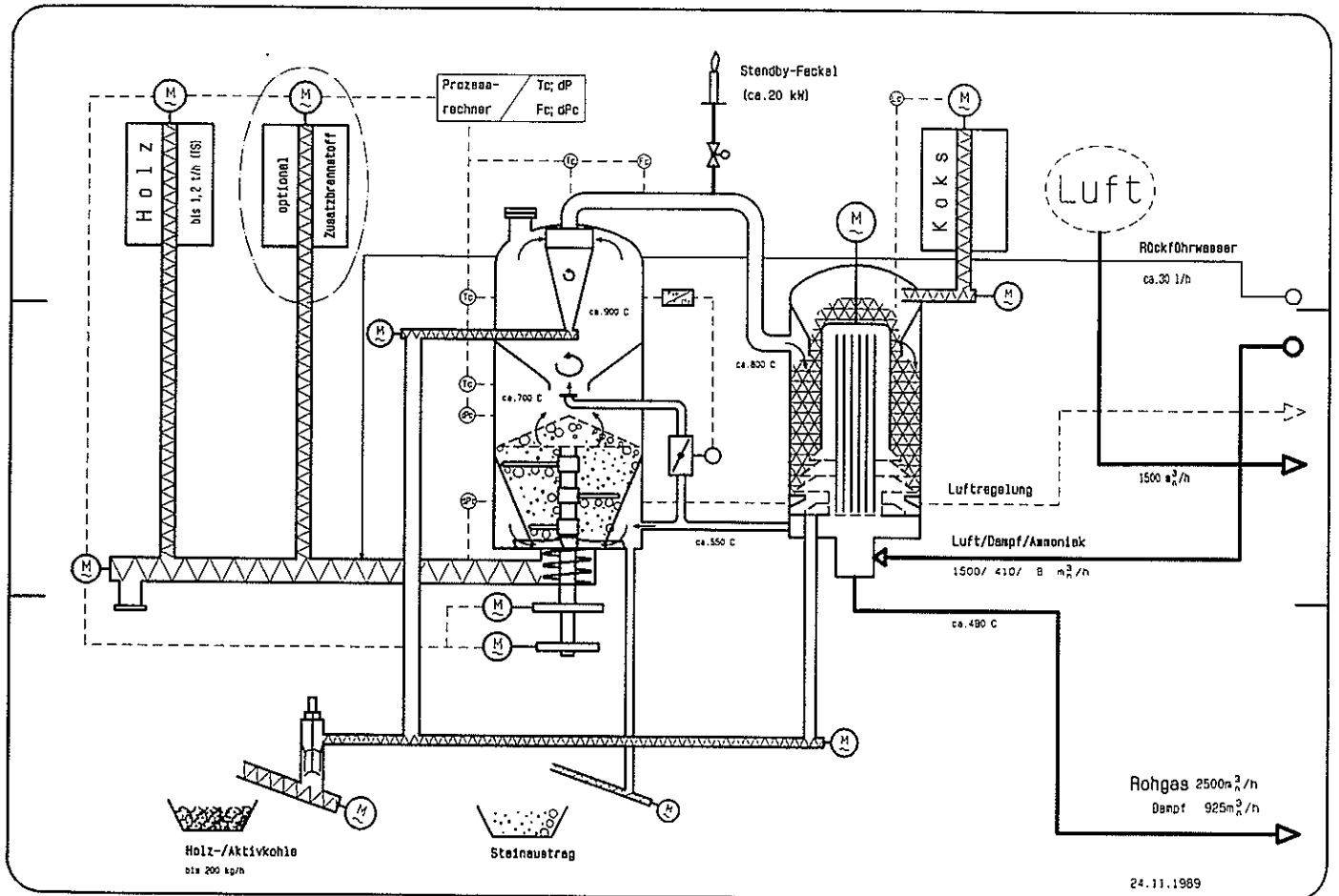
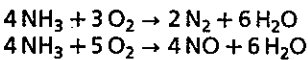


Bild 4 Vergasersystem Michel-Kim (Vergasungsanlage EFEU/Schwelm).

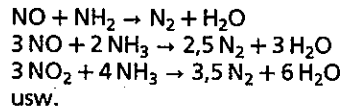
die NH-Verbindungen durch von aussen zugeführten Harnstoff oder Ammoniak erzeugt. Als optimale Temperatur zur Reduktion der Stickoxide gelten Werte um 900 °C, der Bereich der Literaturangaben variiert zwischen 850 und 1100 °C [Schu 1990, Hannes et al. 1987, Schultess 1987, Menig 1987].

Im Wäscher zur kombinierten Absorption und Kondensation wird der Brennstoffstickstoff in Form von Ammoniak (NH₃) aus dem Rohgas ausgewaschen und liegt im Waschwasser vorwiegend als Ammonium (NH₄) vor. Das Waschwasser wird somit im Absorber mit dem Brennstoffstickstoff beladen, welcher im Stripper (Desorber) wiederum an die Vergasungsluft abgegeben und so in den Prozess zurückgeführt wird. Ein Teil des Ammoniaks kann mit dem Sauerstoff der Vergasungsluft im Luftvorwärmer oder beim Eintritt in den Vergaser zu N₂ oder zu NO reagieren gemäss folgenden Summenreaktionen [Schu 1990]:

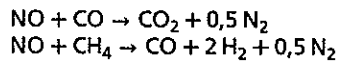


Am Eintrittsort der Vergasungsluft werden zudem aus dem Brennstoffstickstoff des Holzes – über HCN als Zwischenpro-

dukt – NH- und NO-Verbindungen gebildet. Bei Reaktortemperaturen im Bereich von ca. 800–900 °C liegen somit bei reduzierenden Bedingungen sowohl NO- als auch NH-Verbindungen vor, so dass eine Umsetzung zu molekularem Stickstoff N₂ ablaufen kann:



Daneben können im Reaktor Reaktionen ablaufen, bei denen NO an CO und an nichtoxidierten CH-Verbindungen reduziert wird, zum Beispiel gemäss folgenden Summenreaktionen:



Ob die Umsetzung des Brennstoffstickstoffs zu molekularem Stickstoff N₂ in der beschriebenen Art abläuft, muss in Versuchen abgeklärt werden.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit der EFEU-Anlage mit Blockheizkraftwerk (BHKW) wurde aufgrund einer Richtofferte abgeschätzt

unter der Annahme, dass im praktischen Betrieb keine massgeblichen Probleme auftreten [Nussbaumer et al. 1990]. Eine gesicherte Beurteilung ist erst möglich, wenn praktische Betriebserfahrungen vorliegen. Im weiteren ist zu beachten, dass die Wirtschaftlichkeit in entscheidendem Mass durch die Auslastung von Vergaser, BHKW und Wärmenutzung beeinflusst wird. Die Abschätzung bezieht sich auf eine günstige Auslastung der Anlage mit einem hohen Anteil Betriebsstunden sowie einem grossen Anteil an Prozesswärme. Annahmen:

- Vergaserleistung: 3,5 MW, Leistung BHKW: 0,6 MWel, 1,2 MWth
- Wärmebedarf: 2 MW Raumwärme, 1 MW Prozesswärme
- Betriebszeit pro Jahr: BHKW: 6000 h, Prozesswärme: 7000 h
- Erzeugter Strom wird nach EKZ-Tarif eingesetzt
- Gesamtkosten: Fr. 4,3 Mio. (Vergasungsanlage 1,5 Mio., BHKW 1,1 Mio., Baukosten und Infrastruktur 1,7 Mio.).

Beim Einsatz von Waldhackschnitzeln, für die mit einem aktuellen Preis von ca. Fr. 160.– bis Fr. 180.–/t (Wassergehalt 20%) gerechnet werden muss, ist unter den getroffenen Annahmen auch bei guter Auslastung kein wirtschaftlicher Betrieb möglich. Dagegen kann die Anlage

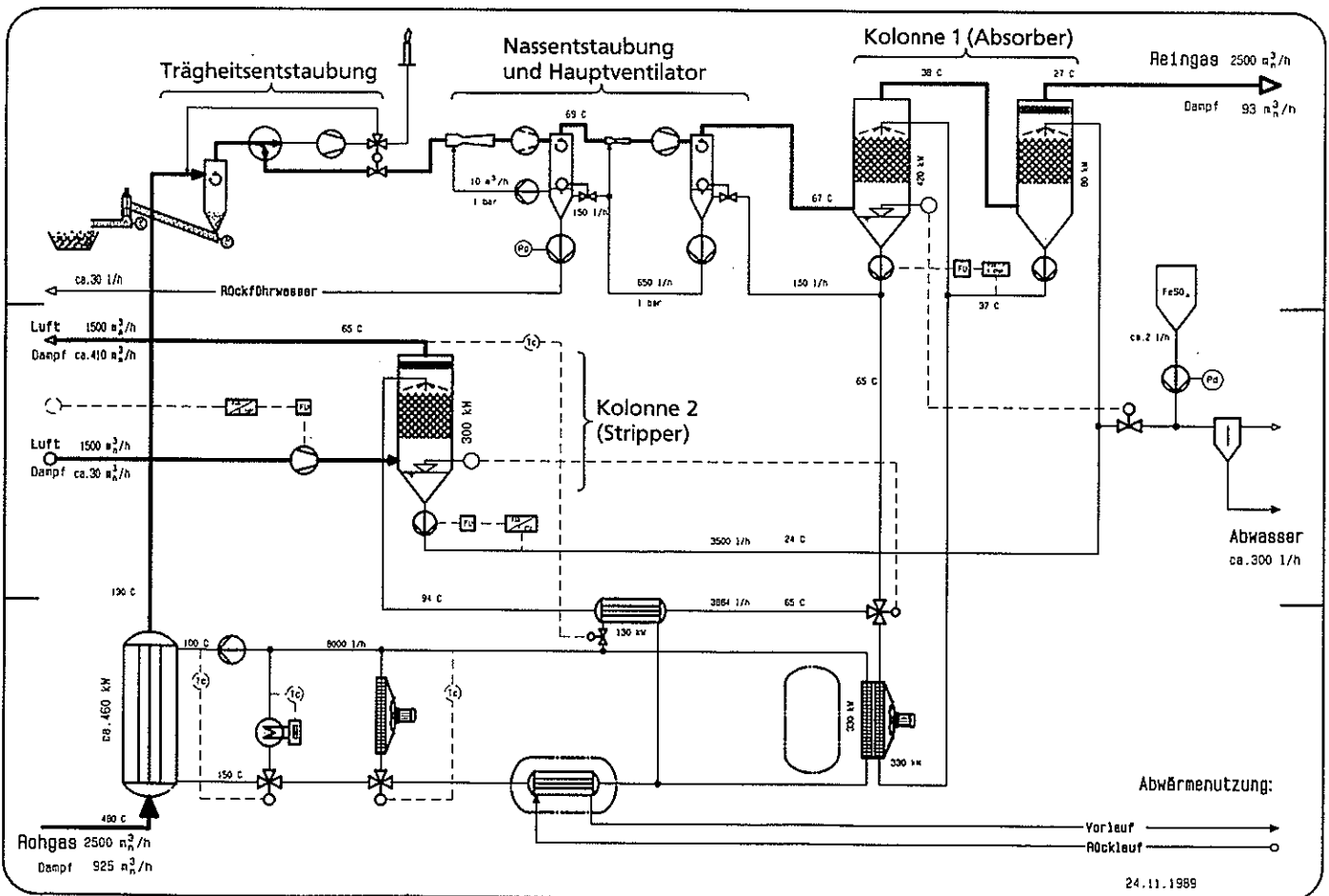


Bild 5 Gasreinigungsteil der Vergasungsanlage EFEU/Schwelm.

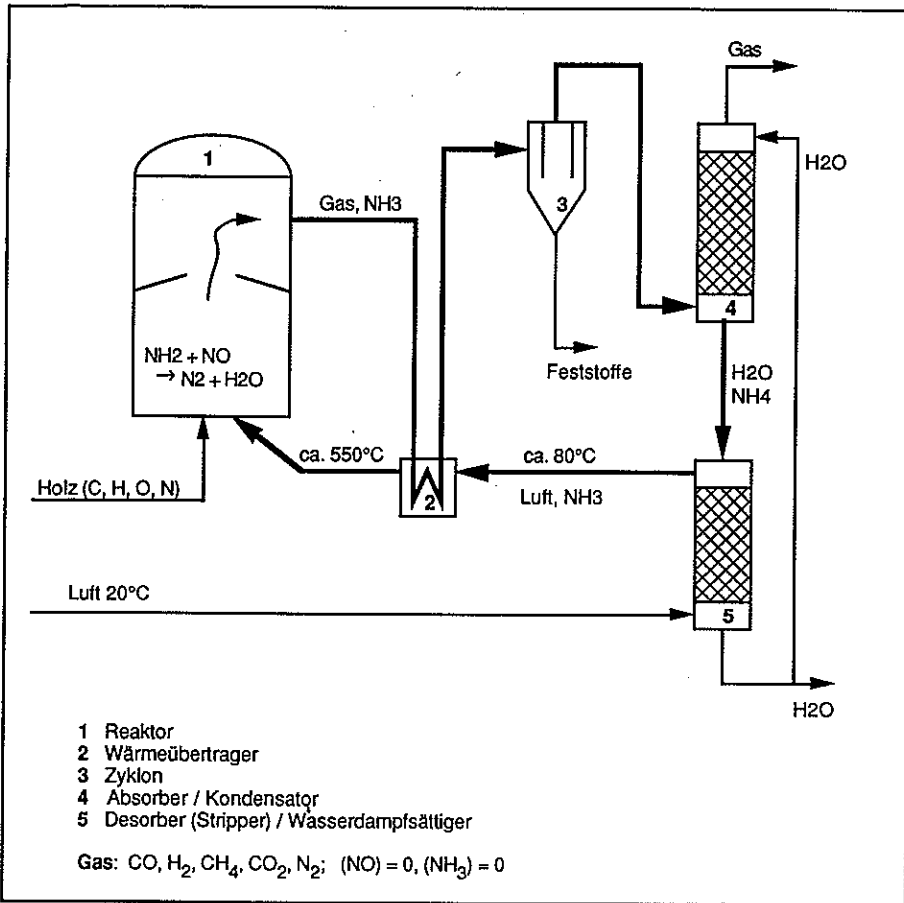


Bild 7 Stickstoffkreislauf bei der Holzvergasung mit Rückführung in den Prozess. Der Brennstoffstickstoff wird im Absorber als NH_3 ausgewaschen und liegt im Waschwasser als NH_4 vor. Im Stripper wird die Vergasungsluft mit NH_3 beladen. Im Reaktor können NO - und NH -Verbindungen zu N_2 umgesetzt werden. Falls diese Umsetzung in ausreichendem Mass abläuft, sind Gas und Kondensat annähernd frei von NO sowie von NH - und CN -Verbindungen.

bei einer optimalen Auslastung wirtschaftlich sein beim Einsatz von Altholz, für das heute mit einer Entsorgungsgebühr von ca. Fr. 80.- bis Fr. 100.-/t gerechnet werden muss. Für das aufbereitete und an Ort gelieferte Altholz ist deshalb anzunehmen, dass keine Kosten entstehen oder sogar ein Entsorgungsbeitrag eingesetzt

werden kann. Wenn der erzeugte Strom entsprechend dem EKZ-Tarif eingesetzt wird, ergibt sich für die Nutzung des Altholzes in einer Vergasungsanlage mit Wärme-Kraft-Kopplung ein Wärmepreis, der mit ca. 2–3 Rp./kWh in der gleichen Größenordnung liegt wie beim Einsatz in einer konventionellen Schnitzelfeuerung, die

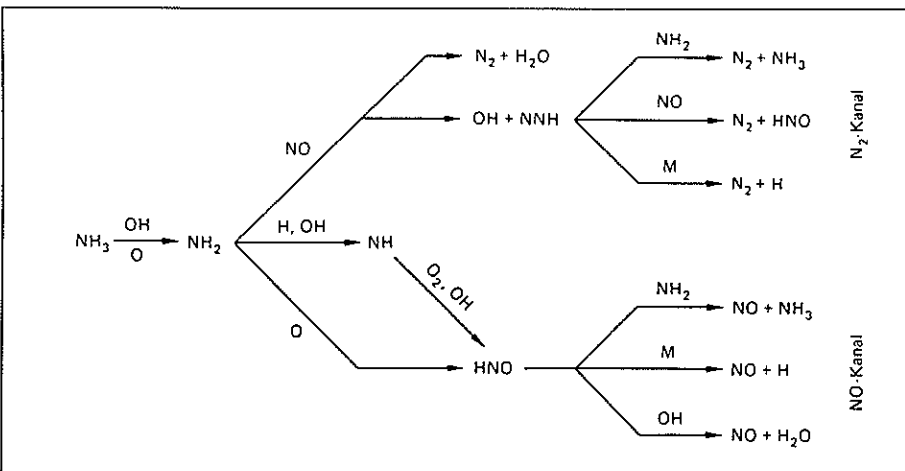


Bild 8 Reaktionsmechanismus der Entstickungsreaktion mit Ammoniak. Quelle: [Schu 1990].

mit Elektrofilter zur Abscheidung des schwermetallhaltigen Staubes ausgerüstet ist. Als Vergleich dazu liegt der Wärmepreis beim Einsatz von Erdöl heute in der Größenordnung von 5 Rp./kWh. Bei nicht optimaler Auslastung des BHKW kann sich der angegebene Wärmepreis der Vergasung mehr als verdoppeln. Wenn die Holzvergasung nur für eine thermische Nutzung ausgelegt ist, liegt der Wärmepreis über demjenigen einer Schnitzelfeuerung.

Zusammenfassung

Das Michel-Kim-Verfahren ermöglicht aufgrund der Gleichstromvergasung und des katalytisch wirkenden Koksreaktors eine annähernd teerfreie Vergasung. Dank der Beschickung mit einer Unterschubschnecke können auch gewöhnliche Schnitzel und feinkörniges Material verarbeitet werden.

Der Vergasungsteil wird ergänzt durch eine umfangreiche Gasreinigung und -kondensation. Das bei der Kondensation anfallende Abwasser ist mit Ammonium aus dem Brennstoffstickstoff belastet. Über eine Desorptionsstufe wird das Ammonium von der Vergasungsluft aufgenommen. Der Brennstoffstickstoff wird mit der Vergasungsluft in den Reaktor zurückgeführt zur Umsetzung zu molekularem Stickstoff. Falls diese Umsetzung in ausreichendem Mass abläuft, sind Gas und Kondensat annähernd frei von NO sowie von NH - und CN -Verbindungen. Diese Prozessführung ermöglicht somit eine Verminderung der Stickoxidemissionen aus dem Brennstoffstickstoff.

Aufgrund des Konstruktionsprinzips ist der Einsatz von Altholz grundsätzlich möglich. Zur Beurteilung der Umweltauswirkungen müssen jedoch die noch offenen Fragen bezüglich Verhalten von Schwermetallen, Chlor und Brennstickstoff abgeklärt werden. Falls die Entsorgung von Altholz ohne entscheidende Zusatzaufwendungen möglich ist, kann das Verfahren in Kombination mit einem BHKW wirtschaftlich sein.

Bio-Alternative S.A.

Funktionsprinzip: Gegenstromvergaser mit aufsteigender Vergasung
Vergaserleistungen: Versuchsanlage: ca. 300 kWth, Anlage in Betrieb: ca. 6 MWth

Verfahrensbeschreibung

Die Bio-Alternative-Anlage ist für den Einsatz verschiedenartiger Brennstoffe und Stückigkeiten geeignet, insbesondere kann auch feines Material eingesetzt werden. Da der Prozess nicht auf vollständige Spaltung der hochsiedenden Verbindungen ausgelegt ist, ist der apparative Aufwand der Anlage vergleichsweise klein. Die Konstruktion entspricht in etwa einem

konventionellen Gegenstromvergaser mit aufsteigender Vergasung, wie er im Artikel «Grundlagen der Holzvergasung» beschrieben wurde [Nussbaumer 1990]. Die Biomasse wird in der Karbonisierungsanlage unter Zufuhr von Vergasungsluft aufgetrennt in die drei Fraktionen fester Rückstand, Pyrolyseöl und Gas. Das Verfahren ist primär zur Kohleherstellung ausgelegt. Als Nebenprodukte fallen das Pyrolyseöl und das Holzgas an. Während das Gas wegen seiner kleinen Leistungsdichte sofort genutzt werden muss, stehen die Kohle und das Öl als speicherbare Energieträger zur Verfügung. Die Anteile an Kohle, Öl und Gas sind einerseits von der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe abhängig, und sie können andererseits in gewissen Grenzen über die Reaktionsbedingungen (Temperatur, Luftmenge, Durchsatz) gesteuert werden. Die Energie und die Masse der Ausgangsstoffe verteilen sich bei normaler Betriebsweise etwa wie folgt auf die Produkte:

	Energieanteil	Massenanteil
Feste Fraktion (Kohle)	48%	22%
Pyrolyseöl	19%	11%
Gas	20%	67
Verluste	13%	—

Bei nicht-kontaminiertem Holz kann die Holzkohle mit einer Brikettieranlage zu Grillkohle verarbeitet oder als Adsorptionsmittel eingesetzt werden. Das Öl kann in einem Brenner genutzt und das Holzgas in einer Feuerung oder zur Kraft-erzeugung in einem Verbrennungsmotor eingesetzt werden. Es wurden Versuche mit einem auf Gasbetrieb umgerüsteten Ford-Escort-Motor durchgeführt. Das abgekühlte Gas wurde dabei, nach Abscheidung des Kondensats im Zyklon/Kondensator-Teil, über Papier- und Ölfilter gereinigt.

Aufgrund des Gegenstromprinzips weist das Rohgas einen hohen Anteil hochsiedender Verbindungen auf. Weil der Prozess mit trockenem Material (Wassergehalt um 10%) geführt wird, ist der Anfall an Kondensat gering und der Heizwert des Kondensats hoch (ca. 23 MJ/kg oder etwa die Hälfte des Heizwerts von Heizöl EL). Falls das Kondensat als Energieträger eingesetzt wird, kann das Bio-Alternative-Verfahren auch bei einer motorischen Nutzung des Gases abwasserlos geführt werden. Im Gegensatz dazu fällt bei der reinen Vergasung viel Kondensat mit geringem Heizwert an, so dass für eine allfällige Entsorgung durch Verbrennung bis zur Hälfte der bei der Vergasung erzeug-

ten Energie aufgewendet werden muss [Schulze Lammers et al. 1985]. Für den Betrieb einer Vergasungsanlage, bei der Abwasser anfällt, ist somit entscheidend, dass dieses mit vertretbarem Aufwand aufbereitet werden kann.

Zusammenfassung

Das Bio-Alternative-Verfahren ermöglicht die Auftrennung der Ausgangsstoffe in die drei Fraktionen Kohle, Öl (lagerbare Energieträger) und Gas (nicht lagerbar). Da die Anlage vorwiegend zur Kohleerzeugung ausgelegt ist, werden rund 50% der Energie und über 20% der Masse in die Kohle eingebunden. Die Verteilung der Produkte kann jedoch durch die Reaktionsführung in gewissen Grenzen beeinflusst werden. Damit das Verfahren zur Nutzung von Altholz und zur Einbindung von Schwermetallen im Rückstand in Frage kommt, ist eine drastische Verminderung des Anteils an Rückstand erforderlich.

Da das Gas einen grossen Anteil schwer-siedender Verbindungen aufweist, fällt als Kondensat ein wasserhaltiges, aber heizwertreiches Öl an, das als Energieträger genutzt werden kann. Der Prozess ist damit auch bei einer motorischen Nutzung des Gases abwasserlos.

Aufgrund des Konstruktionsprinzips ist der Einsatz von Altholz in der Bio-Alternative-Anlage grundsätzlich möglich. Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeit von Altholz muss jedoch noch abgeklärt werden, in welchem Bereich die Produktverteilung beeinflusst werden kann und wie weit eine Verminderung des Energie- und Massenanteils des festen Rückstands möglich ist. Im weiteren müssten auch bei diesem Verfahren die noch offenen Fragen bezüglich Verhalten von Schwermetallen, Chlor und Brennstoffstickstoff abgeklärt werden.

Weitere Verfahren

In Finnland bietet *Ahlstrom* Festbett-Gegenstromvergaser mit aufsteigender Vergasung nach System Bioneer mit Leistungen von 1 bis 15 MWth an [Salo 1990]. Der *Ahlstrom*-Vergaser ergibt ein für das Gegenstromprinzip typisches Rohgas mit hohem Teergehalt. Es existieren nur Referenzanlagen mit direkter thermischer Nutzung des Gases. In Deutschland wird der von der *Forschungsgesellschaft Jülich GmbH* entwickelte KFA-Thermo-Prozess angeboten. Beim KFA-Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung wird der Brennstoff im Reaktor vergast und in der nachgeschalteten Zyklonbrennkammer direkt verbrannt. Da ein guter Ausbrand erreicht wird, eignet sich das Verfahren zur Verbrennung verschiedener Reststoffe [Jennebach 1988]. Daneben bieten zahlreiche weitere Hersteller Anlagen zur Ver-

gasung von Biomasse und Abfällen an, wobei in den meisten Fällen jedoch nur eine direkte thermische Nutzung des Gases vorgesehen ist.

Die vorliegende Untersuchung bezieht sich vorwiegend auf Anlagen im Leistungsbereich von ca. 2 bis 5 MWth. Eine Übersicht über die aktuelle Technik von Grossanlagen liefern die Tagungsbände «Low-grade fuels», Volume 1 & 2 [Korhonen (Ed.) 1990] sowie die Zusammenstellung von Corté [Corté 1989]. Im grösseren Leistungsbereich wird die Vergasung vor allem für Kohle (Deutschland) und Torf (Finnland) eingesetzt, wobei die Verfahren in der Regel auch für den Einsatz von Biomasse in Frage kommen. Die *Rheinische Braunkohlenwerke AG* hat das Hoch-Temperatur-Winkler-(HTW-)Verfahren zur Vergasung von Kohle, Torf und Biomasse entwickelt [Keller et al. 1990, Theis et al. 1990]. Das Verfahren basiert auf einem Wirbelschichtvergaser, der bei 20 bis 25 bar betrieben wird und über einen Kombi-Prozess zur Stromerzeugung oder zur Methanolsynthese eingesetzt wird. *Lurgi* bietet Wirbelschichtanlagen im Leistungsbe-reich ab ca. 20 MWth an [Patel 1990]. In Schweden befasst sich *Studsvik* mit der Wirbelschichtvergasung von Biomasse in einer 2-MW-Pilotanlage [Patel 1990].

Gegenüber der Festbettvergasung können in der Wirbelschicht aufgrund des guten Wärme- und Stoffaustausches homogenere Reaktionsbedingungen eingehalten werden. Heute wird die Wirbelschicht-technologie jedoch vorwiegend im Leistungsbereich von ca. 50 bis 500 MWth eingesetzt. Kleinere Anlagen sind zwar technisch realisierbar, aber zum heutigen Zeitpunkt nicht von Bedeutung und vermutlich wegen des grossen apparativen Aufwands wirtschaftlich nicht interessant. Da im Leistungsbereich der Wirbelschicht-verfahren Gas- und Dampfturbinen zur Krafterzeugung eingesetzt werden, liegen für die Nutzung des Gases in Verbrennungsmotoren praktisch keine Erfahrungen vor.

Die Vergasung von Altholz in Grossanlagen zur Methanolsynthese oder zur Stromerzeugung ist eine prüfungswerte Alternative zu mittleren Anlagen, wobei zusätzlich vor allem die Fragen eines möglichen Standorts und der Verwertbarkeit der Abwärme abgeklärt werden müssten. Die Substitution von Erdöl durch Methanol aus Kohle muss dagegen in Frage gestellt werden, da bei der Verwendung von Methanol aus Kohle rund zweimal soviel Kohlendioxid freigesetzt wird wie bei der Verwendung von Dieseltreibstoff aus Erdöl [Wettstein 1990].

Literatur

Arbeitsgemeinschaft Altholzkonzept Kanton Zürich: Konzeptstudie Altholzverwertung Kanton Zürich, Zwischenbericht August 1989, Direktion der öffent-

chen Bauten des Kantons Zürich, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau (Schlussbericht in Bearbeitung)

Bender, J.: Schlacke hält Metalle zurück, «Chemische Rundschau» Nr. 14, 8. April 1988

Brunner, P.: Die Herstellung von umweltverträglichen Reststoffen als neues Ziel der Müllverbrennung, «Müll und Abfall», Nr. 4 (1989), S. 166–180

Corté, P.: Gasifier Development in France, «Biomass» Nr. 18 (1989), S. 179–196

Hannes, K.; Schmahl, K.-H.; Weiler, H.: Möglichkeiten zur NO_x-Minderung für grosse Feuerungsanlagen, «Brennstoff Wärme Kraft» 39 (1987) Nr. 10, Special NO_x-Minderung in Rauchgasen, R 15–R 22

Hedden, K.; Heike, Th.; Rao, B.: Erprobung und Optimierung von kommerziellen Biomasse-Vergasern BMFT-Forschungsbericht 03E-8062-A, Dezember 1986 Holz-Zentralheizungen, Impulsprogramm Haustechnik, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1. Auflage, Bern 1988

Ide, H.; Zerbin, W.; Linneborn, H.; Lohmann, J.: Entwicklung einer Energiegewinnungsanlage zur Erzeugung von Wärme, mechanischer und elektrischer Energie durch Vergasung von Holz und Stroh im Stückvergaser (Imbert), Abschlussbericht Nr. 384-77-9 ESD / 661-78-7 ESD, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg 1981

Jansohn, P.; Kolb, Th.; Leuckel, W.: Bildung von Stickstoffoxiden aus Brennstoffstickstoff in turbulenten Diffusionsflammen und deren Reduktion durch feuerungstechnische Massnahmen, «Chem.-Ing.-Tech.» 61 (1989), Nr. 11, MS 1801/89

Jennebach, M.: Untersuchung einer neuentwickelten mehrstufigen Verbrennungsanlage, Kernforschungsanlage Jülich, Bericht Nr. 464, Jülich 1988

Keller, J.; Meis, R.: Combined-Cycle Power Generation from Coal, Peat and Biomass using the High-Temperature Winkler (HTW) Technology, in: Korhonen (Ed.), Low-grade fuels, Vol. 2, VTT Symposium 108, Espoo (SF) 1990, S. 335–346

Kistler, R.: Das Verhalten der Schwermetalle bei der Pyrolyse von Klärschlamm, Diss ETH Nr. 7954, Zürich 1986

Korhonen, M. (Ed.): Low-grade fuels, Vol. 1, VTT Symposium 107, Espoo (SF) 1990

Korhonen, M. (Ed.): Low-grade fuels, Vol. 2, VTT Symposium 108, Espoo (SF) 1990

Menig, H.: Emissionsminderung und Recycling, 2. Auflage, Ecomec Verlag, Landsberg/Lech 1987

Michel-Kim, H.: Michel-Kim-Verfahren, in: Thomé-Kozmiensky, K. (Ed.), Pyrolyse von Abfällen, EF-Verlag, Berlin 1985, S. 224–243

Münch, P.: Graastrocknungsanlage Steinmaur – Langzeitversuche mit dem Holzgasgenerator, Institut für Lebensmittelwissenschaften, ETH Zürich 1985

Nussbaumer, Th.: Grundlagen der Holzvergasung, «HeizungKlima» Nr. 7/1990, S. 52–60

Nussbaumer, Th.: Stickoxide bei der Holzverbrennung, «HeizungKlima» Nr. 12 1988, S. 51–62

Nussbaumer, Th.; Bühler R.; Jenni, A.: Holzvergasungsanlagen in Europa im Bereich 2 bis 5 MWth, Forschungsprojekt Holzvergasung-Altholz Phase 1, Bundesamt für Energiewirtschaft, 1990

Patel, J. G.; Mensinger, M. C.: Recent Developments in Gasification of Low-grade fuels, in: Korhonen (Ed.), Low-grade fuels, Vol. 1, VTT Symposium 108, Espoo (SF) 1990, S. 275–334

Salo, K.: Applications of Bioneer Updraft Gasification Technology, in: Korhonen (Ed.), Low-grade fuels, Vol.

2, VTT Symposium 108, Espoo (SF) 1990, 365–378

Schlegel, R.: Schwermetalle – Gefangen in der Schlacke, Endlagerung von Reststoffen aus Sondermüll-Verbrennungsanlagen, «Energie», Jahrg. 41, Nr. 9, September 1989

Schu, G. F.: Betriebserfahrungen mit dem SNCR-Verfahren an einem mit Heizöl 5 gefeuerten Flammrohrkessel, «Brennstoff Wärme Kraft» 42 (1990) Nr. 3, Special Betriebserfahrungen REA, L 29–L 35

Schulthess, W.: Möglichkeiten zur NO_x-Minderung für kleine und mittlere Anlagen, «Brennstoff Wärme Kraft» 39 (1987) Nr. 10, Special NO_x-Minderung in Rauchgasen, R 23–R 29

Schulze Lammers, P.; Leuchs, M.: Vergasung von Biomasse und Nutzung des Gases zum Antrieb von Motoren, BMFT-Forschungsbericht T 85-066, Juli 1985

Seeger, K.: Energietechnik in der Holzwirtschaft, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen 1989

Stahel, R.; Schuler, O.; Ledergerber, E.: Altholz – eine vernachlässigte Ressource, NFP-12-Projekt Nr. 4.633.0.83.12, Verlag Rüegger, Grösch 1987

Stämpfli, D. et al.: Reactions of Bottom Ashes from Municipal Solid Waste Incinerators and Construction Waste Samples with Water, Final Report Project 3335, EAWAG, Dübendorf 26. 2. 90

Steinrück, P.: Ein neues Wirbelschicht-Verbrennungsverfahren zur thermischen Verwertung von Abfallstoffen, «Chem.-Ing.-Tech.» 61 (1989), Nr. 11, S. 889–891

Theis, K.; Lambert, J.: State of Development of the HTW Process regarding its suitability for combined-cycle Power Stations, in: Korhonen (Ed.), Low-grade fuels, Vol. 2, VTT Symposium 108, Espoo (SF) 1990, 347–360

Wettstein, A.: Dieseltreibstoff und die Alternativen, «Neue Zürcher Zeitung» 56 (1990), S. 99–100