

Thomas Nussbaumer

Grundlagen der Holzvergasung

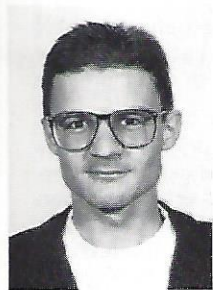
Separatdruck aus «HeizungKlima» Nr. 7/1990

Anlagentechnik der Holzvergasung und offene Fragen beim Einsatz von belastetem Altholz

Separatdruck aus «HeizungKlima» Nr. 9/1990

Grundlagen der Holzvergasung

Thomas Nussbaumer*



Der vorliegende Artikel behandelt die Grundreaktionen der Holzvergasung sowie den Einfluss der Gleich- und Gegenstrombauart und der wichtigsten Betriebsbedingungen auf die Gasqualität.

In der nächsten Ausgabe von «HeizungKlima» werden im Artikel «Anlagentechnik der Holzvergasung und offene Fragen beim Einsatz von belastetem Altholz» aktuelle Anlagenkonzepte sowie die Problematik der Nutzung von Altholz vorgestellt. 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 Luftthygiene 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

Im Leistungsbereich von 2 bis 5 MWth kommen zur Vergasung von Biomasse vor allem Festbettvergaser zum Einsatz. Die Gaszusammensetzung und der Vergasungswirkungsgrad hängen in entscheidendem Mass von der Bauart und den Betriebsbedingungen ab. Gleichstromvergaser erzielen in der Regel eine vollständigere Umsetzung des Kohlenstoffs in gasförmige Produkte als Gegenstromvergaser. Bei beiden Bauarten ist eine hohe Vergasungstemperatur erforderlich für eine möglichst weitgehende Umsetzung in gasförmige Produkte.

Da der Luftüberschuss zur Erzielung eines heizwertreichen Gases so gering als möglich – in der Regel um 0,3 – sein muss, wird die Vergasungstemperatur zum Beispiel durch Vorwärmung der Vergasungsluft angehoben. Falls das Rohgas nicht direkt

verbrannt wird, sondern für eine höherwertige Nutzung eingesetzt werden soll, ist eine nachgeschaltete Gasaufbereitung erforderlich. Zum Abbau der kondensierbaren Teere und Phenole kann dazu eine thermische oder thermisch/katalytische Gascracking eingesetzt werden.

Bei kondensierenden Anlagen, insbesondere also bei einer motorischen Nutzung des Gases, wird eine vollständige Vergasung angestrebt, da die für organische Verbindungen im Kondensat erforderliche Abwasseraufbereitung die Wirtschaftlichkeit grundsätzlich in Frage stellen kann.

In bezug auf die Verbrennungsqualität besteht nicht zum vornherein ein grundlegender Unterschied zwischen der Vergasung mit direkt nachgeschalteter Brennkammer und der zweistufigen Verbrennung in einer modernen Holzfeuerung. Dagegen können im Vergasungsprozess gewisse Schwermetalle reduziert und in den festen Rückstand eingebunden werden, was beim Einsatz von Altholz von Vorteil sein kann. Im weiteren besteht bei der Vergasung die Möglichkeit, den Brennstoffstickstoff abzuscheiden oder das Gas gestuft zu verbrennen, wodurch die Stickoxidemissionen verringert werden können. Auf diese Thematik wird im Folgeartikel in der nächsten Ausgabe von «HeizungKlima» näher eingegangen.

Einleitung

Im letzten Weltkrieg, als fossile Brennstoffe knapp waren, wurde die Holzvergasung vor allem für den Antrieb von Fahrzeugen eingesetzt. In der damaligen Zeit wurde der Umweltbelastung kaum Beachtung geschenkt. Eine heutige Vergasungsanlage muss dagegen hohe Anforderungen bezüglich Belastung von Luft, Boden und Wasser erfüllen und gleichzeitig eine grosse Bedienerfreundlichkeit aufweisen. Die von früher bekannten Techniken waren die Basis für Entwicklungsarbeiten, die vor allem in der zweiten Hälfte der 70er Jahre aufgenommen wurden. In den 80er Jahren wurden in Deutschland umfangreiche Untersuchungen über das Betriebsverhalten solcher Anlagen durchgeführt [Dirks et al. 1982, Gehrman (Ed.) 1981, Hedden et al. 1986, Hummelsiep et al. 1982, Klöckner et al. 1986, Mehrling et al. 1986]. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Teergehalt im Gas und der Anfall von belastetem Abwasser den Einsatz der Holzvergasung grundlegend in Frage stellen können. Im weiteren traten im praktischen Einsatz oft Betriebsstörun-

gen auf, zum Beispiel, weil die Regelung und Automatisierung nicht befriedigend gelöst war, oder weil dem Scale-up zu wenig Beachtung geschenkt worden war. Jedenfalls wurden die untersuchten Anlagen nach den Versuchen wieder stillgelegt, entweder weil sie Schadstoffgrenzwerte der Abluft oder des Abwassers nicht erfüllten, oder weil sie für den praktischen Einsatz nur ungenügend funktionstauglich waren. Dennoch werden heute von verschiedenen Firmen vor allem aus Deutschland und Skandinavien Anlagen zur Vergasung von Holz angeboten. Für die Beurteilung der Verfahren sind allerdings folgende Einschränkungen zu beachten:

- Nur wenige Anlagen sind für den Einsatz des Gases in Verbrennungsmotoren vorgesehen.
- Eine abschliessende Beurteilung der Anlagen ist in den meisten Fällen nicht möglich, da keine zuverlässigen Untersuchungen von Referenzanlagen zur Verfügung stehen.

Der Weg des Energieholzes

Das theoretisch nutzbare Energieholzpotential der Schweiz beträgt ca. 6 Mio. m³/a (Festmeter pro Jahr). Dies entspricht einer Ölmenge von ca. 1,3 Mio. t oder rund 13% des heutigen Energieverbrauchs für Raumheizung.

Als Brennholz aus dem Wald werden heute ca. 800 000 m³/a genutzt. Dies entspricht ca. 2% des heutigen Energieverbrauchs für Raumheizung. Zusammen mit den anderen Energieholzsortimenten liegt die heutige Nutzung bei ca. 1,5 Mio. m³/a.

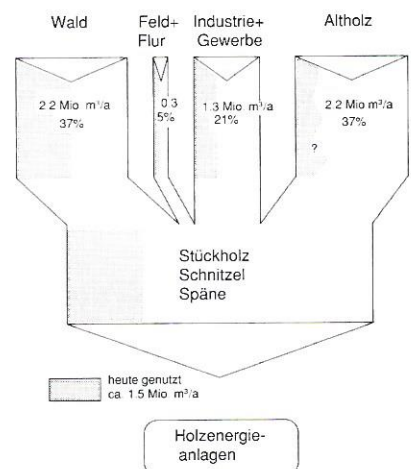


Bild 1 Anteile des Energieholzes in der Schweiz. Die ungenutzte Menge an Altholz ist etwa gleich gross wie die insgesamt genutzte Menge an Energieholz. Quelle: [Holz-Zentralheizungen 1988].

* Dr. Th. Nussbaumer, dipl. Masch.-Ing. ETH Ingenieurbüro, Geerenstr. 23, 8185 Winkel; Institut für Energietechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich

- Bei der für eine motorische Nutzung des Gases erforderlichen Kondensation fällt Abwasser an, das mehr oder weniger stark mit organischen Verbindungen, Ammonium und Cyaniden verunreinigt sein kann. Bei den bisherigen Entwicklungen wurde der Aufbereitung dieses Abwassers kaum Beachtung geschenkt.

Aufgrund der zahlreichen technischen Probleme sowie als Folge der tiefen Energiepreise ist die Vergasungstechnik in den letzten Jahren eher wieder in Vergessenheit geraten. Obwohl auch die heutigen Energiepreise kaum einen Anreiz zum Einsatz von Holz darstellen, ist die Vergasungstechnik vor allem aus folgenden Gründen erneut von Interesse:

- Techniken für eine *hochwertige energetische Nutzung von Biomasse* sind wünschenswert und ökologisch sinnvoll, weil die nachhaltige Nutzung von Biomasse nicht zu einem Anstieg der Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre führt. Die Vergasung von Biomasse zur Wärme-Kraft-Kopplung könnte somit einen Beitrag zur sinnvollen Nutzung von biogenen Brennstoffen leisten.
- In der Schweiz fallen pro Jahr rund *1,5 bis 2,2 Mio. m³ Altholz* an [Stahel et al. 1987, Holz-Zentralheizungen 1988]. Wie aus Bild 1 hervorgeht, wird heute mehr als die Hälfte des Altholzes ohne Nutzung beseitigt, obwohl die Altholzmenge rund doppelt so gross ist wie die heute genutzte Menge an Brennholz aus dem Wald. Da Holzabfälle nicht in Kehrichtverbrennungsanlagen oder Deponien entsorgt werden können (Abfalleitbild sowie Kapazitätsmangel), ist Altholz zu einem akuten Entsorgungsproblem geworden. Gleichzeitig stellt das Altholz aber auch ein grosses Potential zur Substitution fossiler Energieträger dar, das es in Zukunft möglichst umfassend auszuschöpfen gilt. Da geeignete Technologien für eine hohe energetische Wertschöpfung von Altholz nur beschränkt zur Verfügung stehen, ist auch die Vergasungstechnik als mögliche Nutzungsart von Interesse.

Der Vergasungsprozess

Die *Verbrennung* bezeichnet die Reaktion eines oxidierbaren Stoffes bei erhöhter Temperatur mit Sauerstoff. Dagegen bezeichnet die *Pyrolyse* oder *Entgasung* die thermische Zersetzung unter Ausschluss von Sauerstoff. Bei der thermischen Spaltung eines organischen Ausgangsstoffs – zum Beispiel Holz – werden die höhermolekularen Verbindungen in kleinere, vorwiegend gasförmige Bruchstücke aufgespalten. Die wichtigsten Produkte sind

<i>Pyrolyse, Entgasung:</i>	Thermische Zersetzung chemischer Verbindungen unter Sauerstoffabschluss. Durch Wärmezufuhr werden die langkettigen, polymerartig aufgebauten Moleküle in kürzere zerlegt.
<i>Vergasung:</i>	Partielle Oxidation unter Zufuhr eines Vergasungsmittels wie Luft, Sauerstoff oder Wasserdampf. Je nach Menge des Vergasungsmittels wird dabei ein Teil der in der Biomasse vorhandenen Kohlenwasserstoffe oxidiert.
<i>Verbrennung:</i>	Dem Prozess wird mehr Oxidationsmittel zugeführt, als zur vollständigen Oxidation minimal notwendig ist. Die Verbrennung eines festen Brennstoffes setzt sich zusammen aus den Teilprozessen der Entgasung (thermische Zersetzung ohne Oxidationsmittel) bzw. Vergasung (Zersetzung unter Zufuhr von Oxidationsmittel) und der anschliessenden Oxidation der gasförmigen, flüssigen und festen Zersetzungsprodukte.
<i>Crackung, Spaltung:</i>	Aufspaltung höhersiedender in niedrigersiedende Verbindungen, also Abbau in kleinere Moleküle. Der Begriff Cracken wird insbesondere für Spaltprozesse der Erdölraffination verwendet. Im Zusammenhang mit der Holzvergasung wird unter Cracken im folgenden der Abbau der makromolekularen Holzbestandteile in möglichst kleine, gasförmige Verbindungen, nämlich CO, H ₂ , CH ₄ und CO ₂ , verstanden. Da CO ₂ als Produkt der vollständigen Oxidation keinen Beitrag zum Heizwert leistet, soll dessen Anteil möglichst klein sein. Unerwünscht sind ferner höherwertige und ringförmige Kohlenwasserstoffverbindungen (Teer, Phenole) sowie Russ, da diese eine Nutzung des Gases erschweren. Teer, Phenole und Russ werden im folgenden unter dem Begriff ungecrackte Verbindungen zusammengefasst.

$$\text{Luftüberschusszahl } \lambda: \lambda = \frac{\text{effektiv vorhandene Menge Oxidationsmittel}}{\text{stöchiometrische Menge Oxidationsmittel}}$$

Bild 2 Erläuterung der wichtigsten Begriffe.

Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Kohlendioxid, Methan, Ethan usw., daneben organische Säuren, Teere und der zurückbleibende feste Kohlenstoff (Bild 2).

Mit Hilfe der Luftüberschusszahl λ , dem Verhältnis der effektiv vorhandenen Menge Oxidationsmittel zu der stöchiometrischen Menge, lassen sich die drei Bereiche Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung wie folgt charakterisieren:

$\lambda = 0$	Pyrolyse oder Entgasung
$0 < \lambda < 1$	Vergasung (unterstöchiometrisch)
$\lambda > 1$	Verbrennung (überstöchiometrisch).

Die Umsetzung mit $\lambda = 1$ wird als stöchiometrische Verbrennung bezeichnet.

Während die Verbrennung stark exotherm ist (es wird Reaktionswärme frei), ist die Pyrolyse der meisten Stoffe schwach endotherm oder annähernd energieneutral. Für Zellulose, den Hauptbestandteil von Holz, ist in Bild 3 das unterschiedliche Verhalten bei der Verbrennung bzw. bei der Pyrolyse dargestellt. Bild 4 zeigt, dass die Vergasung zwischen

der endothermen Pyrolyse und der exothermen Verbrennung eingeordnet werden kann.

In der Praxis sind die Übergänge zwischen Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung fließend. So werden zum Teil auch Prozesse als Pyrolyse-Verfahren bezeichnet, bei denen Oxidationsmittel zugeführt wird. Gleichzeitig werden Oxidationsreaktionen bei knapp unterstöchiometrischen Bedingungen, zum Beispiel bei brennstoffreichem Betrieb von Otto-Motoren, als Verbrennung bezeichnet. Im weiteren muss berücksichtigt werden, dass zur Beurteilung einer Reaktion der Luftüberschuss eines Teilprozesses nicht mit demjenigen des Gesamtprozesses übereinstimmen muss. So laufen zum Beispiel bei einer Verbrennung (Gesamtprozess $\lambda > 1$) lokal auch Vergasungs- und Pyrolyseprozesse ab (lokal $\lambda < 1$ bzw. $\lambda = 0$).

Bei einem eigentlichen Pyrolyseverfahren muss die zur Reaktion notwendige Energie von aussen zugeführt werden. Im Gegensatz dazu wird bei einem Vergasungsverfahren die erforderliche Energie oder zumindest ein Teil derselben durch Teiloxidation im Pyrolysegut freigesetzt. Dazu

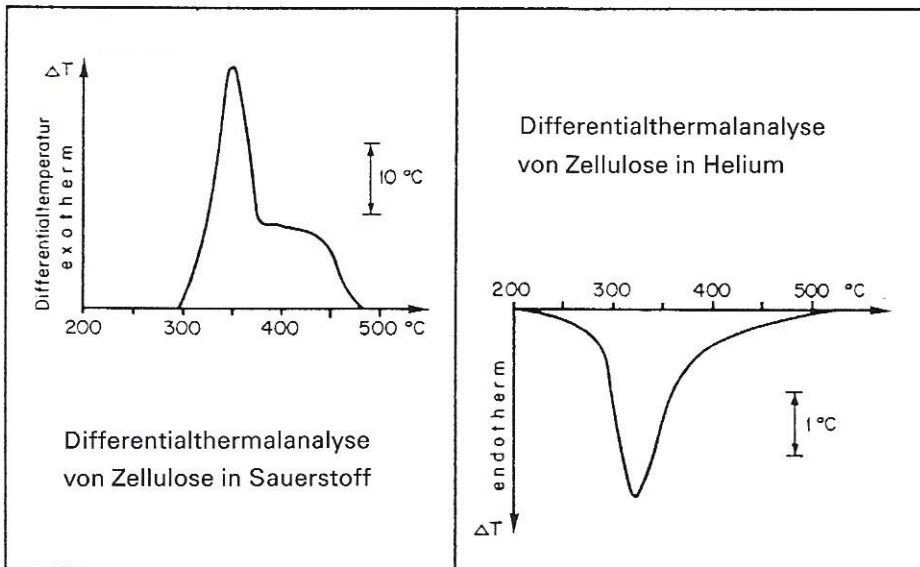


Bild 3 Thermisches Verhalten von Zellulose bei der Verbrennung (links) und bei der Pyrolyse (rechts). Die stark exotherme Verbrennung führt zu einer Temperaturerhöhung um ca. 30 °C, die schwach endotherme Pyrolyse zu einer Temperaturerniedrigung um ca. 3 °C (unterschiedlichen Massstab beachten). Quelle: [Braun et al. 1975].

wird dem Reaktor Luft, Sauerstoff oder Wasserdampf in unterstöchiometrischer Dosierung ($\lambda < 1$) zugeführt. Mit den bei der Teiloxidation freigesetzten heißen Gasen wird die eintretende feuchte Biomasse getrocknet und pyrolysiert.

Die Verbrennung von Holz ist charakterisiert durch die Auftrennung in Pyrolyse und Vergasung, die vorwiegend im Glutbett am Feststoff ablaufen, und die Oxidation, die vorwiegend in der Gasphase abläuft. Da der Anteil flüchtiger Bestandteile im Holz mit ca. 75–85 Gew.-% gross ist, ist die direkte Oxidation des Feststoffs nur von untergeordneter Bedeutung [Schulze Lammers 1984, Hellwig 1988]. In modernen Feuerungssystemen wird dieser Tatsache Rechnung getragen, indem die Verbrennung örtlich aufgetrennt wird in die Vergasung mit Zufuhr von Primärluft (in der Regel $\lambda < 1$) und die Oxidation mit Zufuhr von Sekundärluft ($\lambda > 1$) [Nussbaumer 1989]. Der Übergang zwischen der technisch realisierten Zweistufenverbrennung und der Vergasung mit anschliessender Verbrennung in einer separaten Brennkammer ist daher fließend. In bezug auf den Schadstoffauswurf besteht somit nicht a priori ein grundlegender Unterschied zwischen einer Feuerung und ei-

ner Vergasungsanlage mit nachgeschalteter Verbrennung. Der Einsatz einer Vergasungsanlage ist nur dann gerechtfertigt, wenn dank geeigneter Prozessführung ökologische oder wirtschaftliche Vorteile gegenüber der Verbrennung erzielt werden. Für die Vergasung von Holz sind dabei vor allem die bereits erwähnten Möglichkeiten zur motorischen Nutzung und zur Stickoxidminderung von Bedeutung. Zum Erreichen eines hohen Heizwertes muss die Vergasung bei möglichst geringem Luftüberschuss durchgeführt werden. Für die Vergasung von Holz gelten folgende Richtwerte:

$$\lambda < 0.3:$$

Aufgrund des hohen Heizwertes des Gases sind verschiedene Nutzungsarten möglich, die Vergasung kann damit einen grundlegenden Vorteil gegenüber der Verbrennung aufweisen.

$$\lambda > 0.5-0.6:$$

Der Heizwert des Gases ist für andere Nutzungsarten als der direkten Verbrennung zu gering, die Vergasung weist damit keinen grundlegenden Vorteil mehr auf gegenüber einer Feuerung mit Zweistufenverbrennung.

Verfahren	λ	Reaktion	Gasvolumen	Nutzbare Energie der Produkte
Pyrolyse	0	endotherm	klein	chem. Bindungsenergie
Vergasung	0–1	endo-/exotherm	mittel	chem. Bindungsenergie/Wärme
Verbrennung	> 1	exotherm	gross	Wärme

Bild 4 Unterscheidung zwischen Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung.

Vergasungsprozess ohne Berücksichtigung des Brennstoffstickstoffs

Im Vergaser werden entsprechend den Teilprozessen der Vergasung folgende Zonen unterschieden:

- Trocknung
- Pyrolyse (Zersetzung)
- Oxidation
- Reduktion

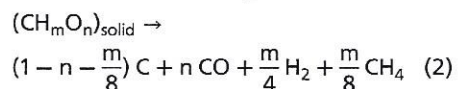
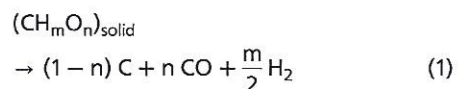
Im Anschluss an die Trocknung, bei der keine chemischen Veränderungen ablaufen, setzt sich die Vergasung von Holz unter Zufuhr von Oxidationsmittel zusammen aus den heterogenen Reaktionen zwischen Feststoff und Gasphase (I+II) und den homogenen Gasphasen-Reaktionen (III):

- I Zersetzung von Holz zu Gasen und Kohlenstoff (Pyrolyse)
- II Umsetzung des Kohlenstoffs zu Gasen
- III Reaktionen in der Gasphase

In einer kontinuierlich betriebenen Vergasungsanlage laufen die Teilprozesse gleichzeitig ab, wobei je nach Konstruktionsprinzip eine mehr oder weniger ausgeprägte örtliche Trennung zwischen homogenen und heterogenen Reaktionen erreicht wird. Im folgenden werden die wichtigsten Reaktionen beschrieben, die bei der Pyrolyse unter Wärmeeinwirkung und bei der Vergasung bei Anwesenheit von Sauerstoff und Wasserdampf ablaufen und die Zusammensetzung des Gases bestimmen.

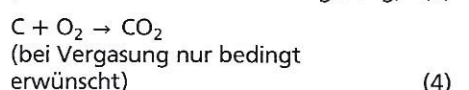
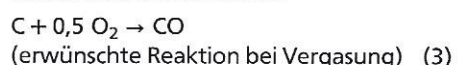
I Pyrolysereaktion unter Zufuhr von Wärme

Unter Zufuhr von Wärme werden die makromolekularen Bestandteile des Holzes – Lignin, Zellulose und Hemizellulose – zersetzt zu niedermolekularen Verbindungen. Unter Vernachlässigung des Stickstoffs kann die Pyrolyse vereinfacht durch die folgenden Parallelreaktionen beschrieben werden [Jüntgen et al. 1981]:



II Heterogene Reaktionen Feststoff/Gas

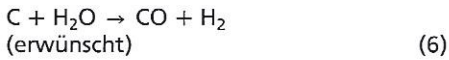
Oxidation von Kohlenstoff



Boudouard-Reaktion



heterogene Wassergasreaktion

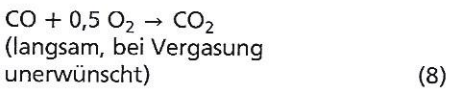


hydrierende Vergasung

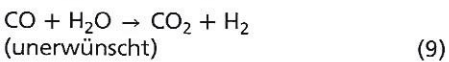


III Homogene Reaktionen Gas/Gas

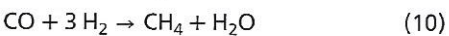
Oxidation von Kohlenmonoxid



homogene Wassergasreaktion



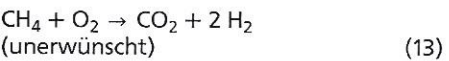
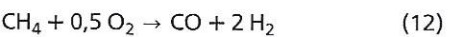
Methanisierung



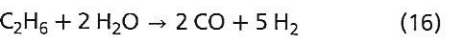
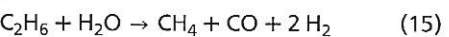
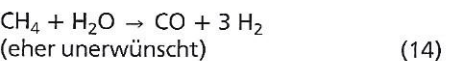
Oxidation von Wasserstoff
(Knallgasreaktion)



Oxidation von Methan, Abspaltung von Wasserstoff



Spaltung von Kohlenwasserstoffen mit Wasser



analoge Reaktionen bei höherwertigen Kohlenwasserstoffen erwünscht

Im Oxidationsbereich des Vergasers (Ort der Luftzufuhr) laufen vorwiegend die heterogenen Reaktionen zwischen Gas und Feststoff ab. Die vollständige Oxidation der Holzkohle (4) ist dabei in einem Vergasungsreaktor nur bedingt erwünscht. Dagegen ist die als Boudouard-Reaktion bezeichnete Rückreaktion von CO_2 zu CO an Kohlenstoff (5) erwünscht, da dadurch der Gaseiswert erhöht wird. Die Boudouard-Reaktion läuft im Vergaser hinter der Oxidationszone ab, wenn der Sauerstoff verbraucht ist und CO_2 über glühende Holzkohle geleitet wird. Das Reaktionsgleichgewicht liegt bei Temperaturen über $1000^\circ C$ praktisch vollständig beim Kohlenmonoxid (Bild 5).

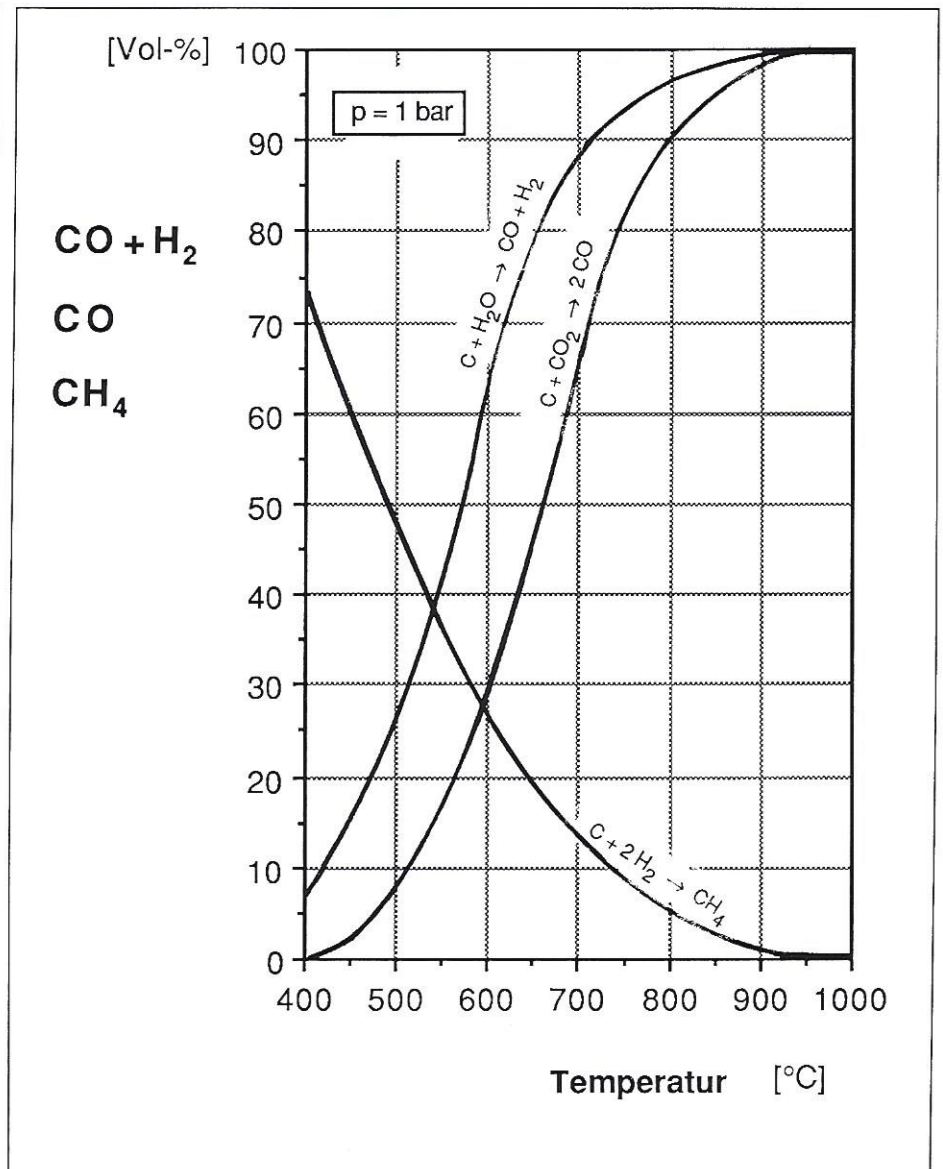


Bild 5 Gleichgewicht der Kohlenstoffvergasung in Abhängigkeit der Temperatur. Boudouard-Reaktion mit CO_2 (im Text: Reaktion (5)), Wassergasreaktion (6), und Reaktion mit Wasserstoff (7). Quelle: [Bilitewski et al. 1985].

Die Oxidation von Kohlenstoff mit Wasserdampf zu CO und H_2 , die vor allem bei hohem Wasserdampfgehalt wichtig ist, wird als Wassergasreaktion bezeichnet (6). Bei dieser Reaktion liegt das Gleichgewicht bei hohen Temperaturen – ähnlich wie bei der Boudouard-Reaktion – vollständig auf der Seite von CO und H_2 (Bild 5).

Das Gleichgewicht der Vergasung mit Wasserstoff unter Bildung von Methan (7) liegt bei hohen Temperaturen auf der Seite des Wasserstoffs, weshalb der Methanengehalt im Gas in der Regel deutlich geringer ist als der Gehalt an CO und H_2 (Bild 5).

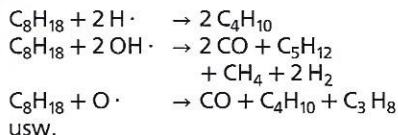
Die stark exothermen homogenen Reaktionen (8), (9), (11) und (13) sind bei der Vergasung unerwünscht, da sie zu einer

Verminderung des Vergasungswirkungsgrads führen.

Da Methan eine hohe Klopfestigkeit aufweist, ist Reaktion (14) in der Regel nicht oder nur bedingt erwünscht. Die analog zu (15) und (16) verlaufende oxidative Spaltung höherwertiger Kohlenwasserstoffe ($n > 2-4$) ist dagegen erwünscht, da hochsiedende Verbindungen zu einer Verschmutzung der Anlage führen können. Im Gegensatz dazu ist die thermische Spaltung von Kohlenwasserstoffen ohne Verbrauch von Oxidationsmitteln unerwünscht, da sie zu ungesättigten Kohlenwasserstoffen mit Doppel-, Dreifach- und Ringbindungen führt. Beispiel:

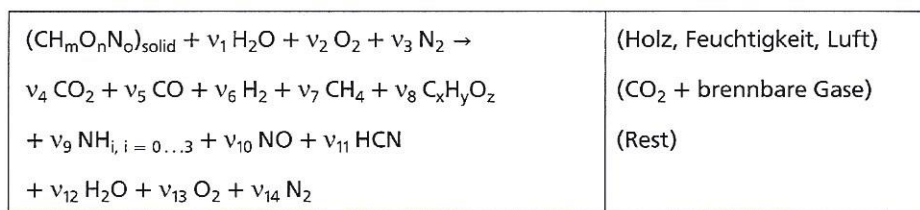


Bei Anwesenheit von H-, OH- oder O-Radikalen ist hingegen ein Abbau höherwertiger Verbindungen zu gesättigten Kohlenwasserstoffverbindungen und Kohlenmonoxid möglich. Beispiel:



Vergasungsprozess mit Berücksichtigung des Brennstoffstickstoffs

Zur Abschätzung von Fragen im Zusammenhang mit der energetischen Umsetzung von Holz (Heizwert, Temperaturverlauf usw.) kann der Brennstoffstickstoff in der Regel vernachlässigt werden. In den vorhergehenden Ausführungen wurde er deshalb nicht berücksichtigt. Bezüglich der Emissionsproblematik kann der Brennstoffstickstoff jedoch von Bedeutung sein. Bei der Verbrennung kann er zu einem grossen Teil zu Stickoxiden umgesetzt werden, weshalb die Stickoxide von Holzfeuerungen zum überwiegenden Teil aus dem organisch gebundenen Holzstickstoff stammen [Nussbaumer 1988]. Bei der Vergasung liegt der Brennstoffstickstoff dagegen hauptsächlich in Form von NH-Verbindungen und Cyaniden vor, ein geringer Teil kann auch zu NO umgesetzt werden. Unter Berücksichtigung des Brennstoffstickstoffs kann die Vergasung von feuchter Biomasse vereinfacht mit folgender Reaktionsgleichung beschrieben werden:



$v_1 \dots v_3$ = stöchiometrische Faktoren der Edukte [-]
 $v_4 \dots v_{14}$ = stöchiometrische Faktoren der Produkte [-]

Der Sauerstoffgehalt des Produktgases ist bei guter Prozessführung praktisch vernachlässigbar ($v_{13} \approx 0$). Für die Zusammensetzung von Holz ($\text{CH}_m\text{O}_n\text{N}_o$) gilt vereinfachend:

Laub- und Nadelholz:	$m \approx 1,4$ $n \approx 0,7$	(C: 50 Gew.-%, H: 6 Gew.-%, O: 44 Gew.-%)
Laubholz:	$o \approx 0,035$	(N-Gehalt: $\approx 0,2$ Gew.-%)
Nadelholz:	$o \approx 0,009-0,017$	(N-Gehalt: $\approx 0,05-0,1$ Gew.-%)

Weil der Brennstoffstickstoff unter den reduzierenden Bedingungen im Vergasungsprozess vorwiegend in Form von NH-Verbindungen vorliegt, besteht die Möglichkeit zur Verminderung der Stickoxidemissionen aus dem Brennstoffstickstoff, indem Ammoniak abgeschieden wird oder das Gas gestuft verbrannt wird. Im Folgeartikel in «HeizungKlima» Nr. 9/1990 wird auf diese Thematik noch näher eingegangen.

Zusammensetzung der Vergasungsprodukte

Die chemische Bindungsenergie der Vergasungsprodukte verteilt sich auf folgende Bestandteile:

- gasförmig: Generatorgas
- flüssig: Phenole und Teere (Pyrolyseöl, ölartiges Kondensat)
- fest: feste Kohlenstoffrückstände (Holzkohle, Russ, evtl. Graphit, Karbonate)

Für eine motorische Nutzung des Gases wird angestrebt, einen möglichst grossen Anteil des Energieinhalts in chemischer Bindungsenergie im Produktgas einzubinden. Der Prozess sollte somit bei möglichst kleinem Luftüberschuss durchgeführt werden, und der Anteil an flüssigen und festen Rückständen sollte so gering wie möglich sein. Je nach wirtschaftlichen Randbedingungen kann aber auch erwünscht sein, als Neben- oder Hauptprodukt Holzkohle herzustellen.

Die Zusammensetzung der bei der Vergasung gebildeten Produkte hängt massgeblich von der Prozessführung ab, insbesondere von:

- Bauart (Gleichstrom/Gegenstrom)
- Temperatur
- Luftüberschuss
- Verweilzeit und Verweilzeitspektrum
- Aufheizrate
- Mischungsintensität von Brennstoff und Vergasungsluft
- spezifische Oberfläche der Brennstoffteilchen
- Wasserdampfgehalt

Daneben wird die Zusammensetzung der Vergasungsprodukte auch durch die Anwesenheit katalytisch wirkender Stoffe beeinflusst (zum Beispiel metallische Verbindungen wie CaCO₃, ZnCl₂, NaHCO₃ usw.).

Einfluss der Temperatur

Mit zunehmender Vergasungstemperatur wird die Produktverteilung zu einem höheren Anteil gasförmiger Komponenten verschoben. Bild 6 zeigt die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Klärschlamm in Abhängigkeit der Pyrolysetemperatur [Kistler 1986]. Ein ähnliches Verhalten kann auch bei anderen Reststoffen, zum Beispiel bei der Pyrolyse von Altreifen, beobachtet werden [Bilitewski et al. 1985]. Obwohl die Verhältnisse nicht quantitativ auf Holz übertragen werden können, hat der qualitative Verlauf der Abhängigkeit auch für Holz Gültigkeit.

Die Temperaturabhängigkeit zeigt, dass der Gasanteil der Produkte mit zunehmender Pyrolysetemperatur steigt und auch der Anteil an brennbaren Gasen in der Gasphase zunimmt. Dieses Verhalten, das qualitativ auch bei Zufuhr von Oxidationsmitteln auftritt, weist darauf hin, dass zur Erzielung einer möglichst vollständigen Vergasung eine hohe Vergasungstemperatur erforderlich ist. Dies kann erreicht werden, indem der Luftüberschuss der Vergasung angehoben wird, was jedoch der Forderung nach möglichst hoher Umsetzung des Brennwertes in die chemische Bindungsenergie der Gasphase entgegenläuft. Um dennoch eine ausreichend hohe Vergasungstemperatur zu erzielen, wird in der Regel die Vergasungsluft vorgewärmt oder, vor allem bei Pyrolyseanlagen, der Reaktor von aussen beheizt.

Einfluss der Holzfeuchtigkeit und des Wasserdampfes

Wasserdampf, der bei hohen Temperaturen zu H- und OH-Radikalen dissoziiert, kann den Abbau höherwertiger Verbindungen massgeblich beeinflussen und zur Verminderung ungecrackter Verbindungen – insbesondere zyklischer und ungesättigter Kohlenwasserstoffe – beitragen. Wasserdampf ist zur Unterstützung der Vergasung deshalb von zentraler Bedeutung. Falls der Gehalt im Reaktor zu ge-

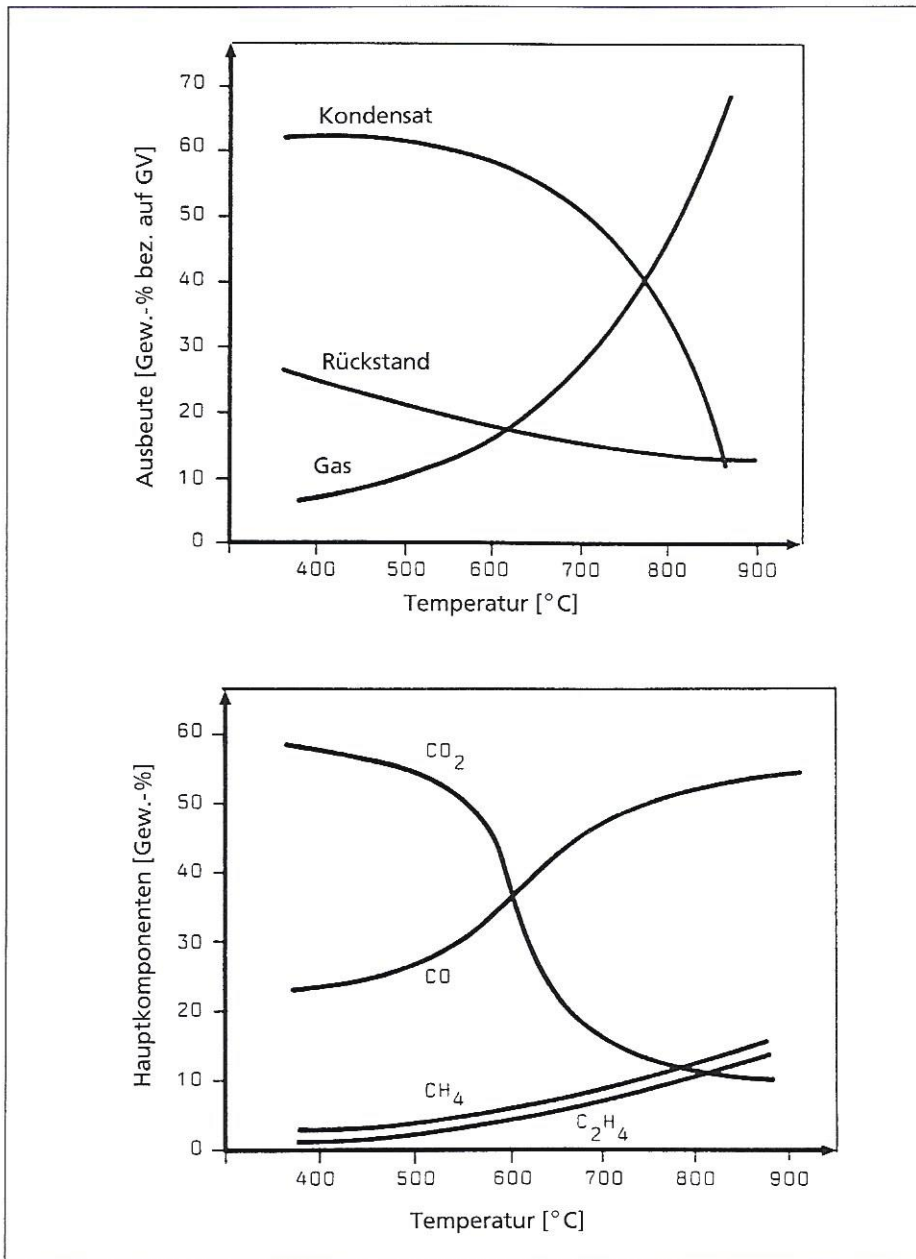


Bild 6 Verteilung der Produktfraktionen (oben) und der Zusammensetzung der Gasphase (unten) in Abhängigkeit der Temperatur bei der Pyrolyse von Klärschlamm. Quelle: [Kistler 1986].

ring ist, kann er durch Zugabe von aussen, zum Beispiel durch Beladung der Vergasungsluft, angehoben werden. Aus verschiedenen Untersuchungen ist auch bekannt, dass der Vergasungsprozess durch einen hohen Feuchtegehalt des Brennstoffs stabilisiert und aufgrund der vollständigeren Vergasung der Gasheizwert erhöht werden kann. Ein hoher Feuchtegehalt kann den Vergasungsvorgang auch dadurch vorteilhaft beeinflussen, dass durch den Energiebedarf der Verdampfung der Temperaturverlauf im Vergaser homogenisiert wird [Hummelsiep et al. 1982, Schulze Lammers et al. 1985].

Heizwert, Verluste und Vergasungswirkungsgrad

Die eingebrachte Energie des Brennstoffs wird bei der Vergasung aufgetrennt auf die Energie im Gas, im Kondensat und im festen Rückstand. Falls die Gaserzeugung im Vordergrund steht, sind die Energieinhalte von Kondensat und Rückstand als Verluste einzusetzen. Der Kohlenstoffgehalt dieser Fraktionen muss also so gering wie möglich sein. Diese Forderung ergibt sich nicht nur aus energetischer Sicht, sondern noch verstärkt aus Gründen der späteren Entsorgung, da organisch vorliegender Kohlenstoff das Langzeitverhalten der

Reststoffe negativ beeinflussen kann [Brunner 1989]. Der Energiegehalt des Gases verteilt sich auf die chemische Bindungsenergie, die für eine motorische Nutzung maximal zur Verfügung steht, sowie die thermische Energie in Form von latenter und fühlbarer Wärme. Bei nicht kondensierender Prozessführung ist die Kondensationswärme – wie bei konventionellen Feuerungen – verloren, während sie bei kondensierender Betriebsweise zurückgewonnen werden kann. Je nach Anwendungszweck und Temperaturniveau der Wärmenutzung kann allerdings nur ein bestimmter Anteil der Wärme tatsächlich verwertet werden. Bei Verwendung eines feuchten Brennstoffs kann ein Teil der Abwärme zur Vortrocknung eingesetzt werden.

Bestimmung des Gasheizwertes

Der Heizwert des Gases (frühere Bezeichnung: unterer Heizwert) setzt sich zusammen aus den Heizwertanteilen der einzelnen Komponenten. Unter Annahme eines idealen Gasgemisches kann der Gemischheizwert wie folgt berechnet werden:

$$H_{UG} = \sum v_i H_{ui}$$

H_{UG} = Heizwert des Gases in [kJ/m³]
 v_i = Volumenanteil der Komponente i im Gas
 H_{ui} = Heizwert der Komponente i in [kJ/m³]

In Bild 7 sind die Heizwerte der wichtigsten Gaskomponenten dargestellt. Bei der Vergasung von Holz mit Luft werden typische Gemischheizwerte von 4000 bis 6000 kJ/m³ erzielt. Das Gas wird somit als Schwachgas bezeichnet (Schwachgas: $H_u < 8500$ kJ/m³, Mittelgas: $8500 > H_u < 21000$ kJ/m³). Höhere Heizwerte können erreicht werden, wenn die Vergasung mit Sauerstoff oder mit angereicherter Luft durchgeführt wird.

Bestimmung des Vergasungswirkungsgrades

Der Vergasungswirkungsgrad beschreibt die Effizienz der Umwandlung des Brennstoffs in die chemische Bindungsenergie des Gases. Der Eigenbedarf an Hilfsenergie der Vergasungsanlage ist dabei nicht berücksichtigt. Da bei der Berechnung des Wirkungsgrades vom Heizwert und nicht vom Brennwert ausgegangen wird, ist auch die Kondensationswärme des Gases nicht als Verlust berücksichtigt.

$$\eta_v = \frac{H_{UG} \dot{V}_G}{H_{UH} \dot{m}_H}$$

η_v = Vergasungswirkungsgrad
 \dot{V}_G = Volumenstrom des Gases in [m³/s]

H_{uH} = Heizwert Holz in [kJ/kg]
 \dot{m}_H = Massenstrom Holz in [kg/s]

In Bild 8 sind typische Werte der Verluste und Vergasungswirkungsgrade aufgeführt, die an verschiedenen Anlagen gemessen wurden [Schulze Lammers et al. 1985, Mehrling et al. 1986]. Die grössten Unterschiede bestehen bei den Verlusten an nicht umgesetztem Kohlenstoff, der in Form hochsiedender Verbindungen in das Kondensat oder in den Rückstand eingebunden wird. Bei einer guten Prozessführung sind diese Verluste gering, während sie bei einer unvollständigen Vergasung sehr gross werden können.

Gascrackung

Weil die Vergasung im Hauptreaktor oft nicht effizient genug verläuft, werden verschiedene Verfahren zur nachträglichen Crackung oder Spaltung der hochsiedenden Verbindungen eingesetzt. Das Ziel einer nachgeschalteten Gascrackung besteht vorwiegend darin, die Belastung der Anlage und insbesondere des Kondensates mit organischen Verbindungen und Teeren massgeblich zu vermindern. Daneben können aber durch eine Gascrackung auch der Gasheizwert und der Vergasungswirkungsgrad erhöht werden. Im weiteren kann mit einer nachgeschalteten

Kondensat	CSB [g/l]	Phenol [g/l]	TOC [g/l]
ohne Gascrackung	180	2,3	74,1
mit Gascrackung	8,1	0,011	0,4

Bild 9 Einfluss der Gascrackung auf die organische Belastung des Kondensats bei einem absteigenden Vergaser (ca. 1000 °C und 2 s Verweilzeit). CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf, TOC = Total Organic Carbon. Quelle: [Schulze Lammers et al. 1985]

Gascrackung auch der Anfahrprozess aus kaltem Betriebszustand verbessert werden.

Die thermische Crackung des Rohgases aus einer Versuchsanlage bei ca. 1000 °C und 2 s Verweilzeit führte zu einer Heizwertsteigerung von etwa 4% [Schulze Lammers et al. 1985]. Bild 9 zeigt, dass gleichzeitig die organische Belastung des Kondensats drastisch verringert werden konnte.

Die Effizienz der Gascrackung hängt – wie die Vergasung selbst – entscheidend von der Temperatur ab [Berghoff 1981]. Für eine vollständige Umsetzung zu niedermolekularen Verbindungen sind auch bei der nachgeschalteten Spaltung hohe Temperaturen erforderlich. Bild 10 zeigt, dass die organische Belastung des Kondensats bei hoher Cracktemperatur entscheidend vermindert wird.

Nebst der thermischen Spaltung wird vor allem die katalytisch unterstützte Gascrackung eingesetzt, wobei zum Beispiel Dolomit (Studsvik, [Patel et al. 1990]), Koks [Michel-Kim 1985], eisenhaltige Erze und andere Materialien zur Anwendung kommen.

Vergaserbauarten

Die Anlagen zur Holzvergasung lassen sich aufgrund ihres Funktionsprinzips unter anderem nach folgenden Kriterien unterscheiden:

- Gleichstrom-/Gegenstromvergasung
- aufsteigende/absteigende Vergasung
- Festbett-/Wirbelschichtvergasung

Im Leistungsbereich bis 5 MWth werden vorwiegend Festbettvergaser eingesetzt. Die wichtigsten konventionellen Vergaserbauarten sind Gegenstromvergaser mit aufsteigender und Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung (Bild 11). Daneben existieren zahlreiche Kombinationen und Abwandlungen dieser Bauarten [Korhonen (Ed.) 1990, Corté 1989, Bierter et al. 1982].

Gegenstromvergaser mit aufsteigender Vergasung (konventionelle Bauart)

Vorteil: Anlagen dieser Bauart können in der Regel ein bezüglich Stückigkeit breites Brennstoffsortiment verarbeiten, insbesondere auch feinkörniges Material.

Nachteil: Gegenstromvergaser weisen meist nur geringe Vergaserwirkungsgrade auf und erzeugen ein stark teer- und phenolhaltiges Gas, das nicht geeignet ist für den Einsatz in Verbrennungsmotoren, und bei dessen Kondensation ein organisch belastetes Abwasser anfällt. Die unvollständige Vergasung ist in erster Linie eine Folge des Gegenstromprinzips, das zu einer ungleichmässigen Verweilzeit im Reaktor führt. Insbesondere können die am oberen Ende des Vergasers gebildeten Pyrolyseprodukte in das Rohgas gelangen, ohne die Reduktionszone, in der sie abgebaut werden sollten, zu passieren.

Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung (konventionelle Bauart)

Vorteil: Gleichstromvergaser weisen eine gleichmässigeren Verweilzeit im Reaktor auf. Sämtliche Pyrolyseprodukte durch-

Gaskomponente	Heizwert H_u in [kJ/m ³]
Kohlenmonoxid CO	12 600
Wasserstoff H ₂	10 800
Methan CH ₄	35 900
Ethan C ₂ H ₆	64 500
Propan C ₃ H ₈	93 500

Bild 7 Heizwerte der wichtigsten Gaskomponenten.

Verluste und Vergasungswirkungsgrad	Typische Werte	Zielwert
Strahlung und Konvektion	5–12%	
Fühlbare Wärme des Gases	5–10%	
Verluste im Kondensat und Rückstand (u. a. nicht umgesetzter Kohlenstoff)	2–35%	< 1%
Total der Verluste	15–50%	< 15%
Vergasungswirkungsgrad	50–85%	> 85%

Verlust durch Kondensationswärme des Gases	8–25%*	
Eigenbedarf der Anlage für Elektromotoren, Pumpen und Gebläse	3– 5%	< 5%

Bild 8 Typische Werte und Zielwert Verluste und Vergasungswirkungsgrad. Typische Werte, Quellen: [Schulze Lammers et al. 1985, Mehrling et al. 1986] Kondensationswärme, Quelle: [Petersen et al. 1989]

* Die Kondensationswärme hängt von der Holzfeuchtigkeit ab. Sie ist im Vergasungswirkungsgrad nicht berücksichtigt, da die Wirkungsgradberechnung auf dem Heizwert basiert.

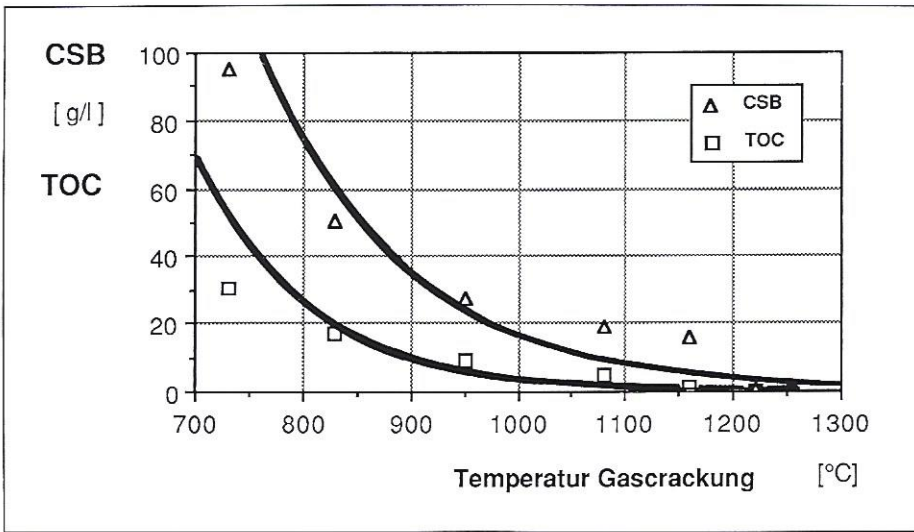


Bild 10 Organische Belastung des Kondensats in Abhängigkeit der Cracktemperatur. TOC = Total Organic Carbon, CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf. Quelle: [Berghoff 1981].

wandern die Oxidations- und Reduktionszone, so dass ein Gas mit einem geringen Gehalt an ungecrackten Verbindungen erzielt werden kann.

Nachteil: Konventionelle Anlagen mit absteigender Vergasung sind in der Regel nur geeignet für Hartholzstücke unformer Abmessungen. Feinkörniges Material kann nicht verwendet werden, da es durch den Reaktor durchfallen oder zu einer Verstopfung des Brennstoffbetts führen kann. Die Anlagenleistung konventioneller Vergaser mit absteigender Vergasung ist begrenzt wegen der Gefahr von Brücken- und Kanalbildung sowie wegen der unzureichenden Verteilung der Vergasungsluft im Brennstoffschacht.

Weitere Bauarten

Nebst den konventionellen Bauarten existiert eine grosse Zahl weiterer Festbettvergaser, bei denen die oben aufgeführten Nachteile durch konstruktive Massnahmen eliminiert werden sollen. Beispiele besonderer Bauformen:

- Querstromvergaser («Kompromiss» zwischen Gleich- und Gegenstrom).
- Festbett-Gleichstromvergaser mit aufsteigender Vergasung. Beispiel: Schwelm/EFEU (Deutschland) [Michelim 1985].
- Festbett-Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung und konstruktiven Massnahmen zur Verhinderung von Brücken- und Kanalbildung beim Ein-

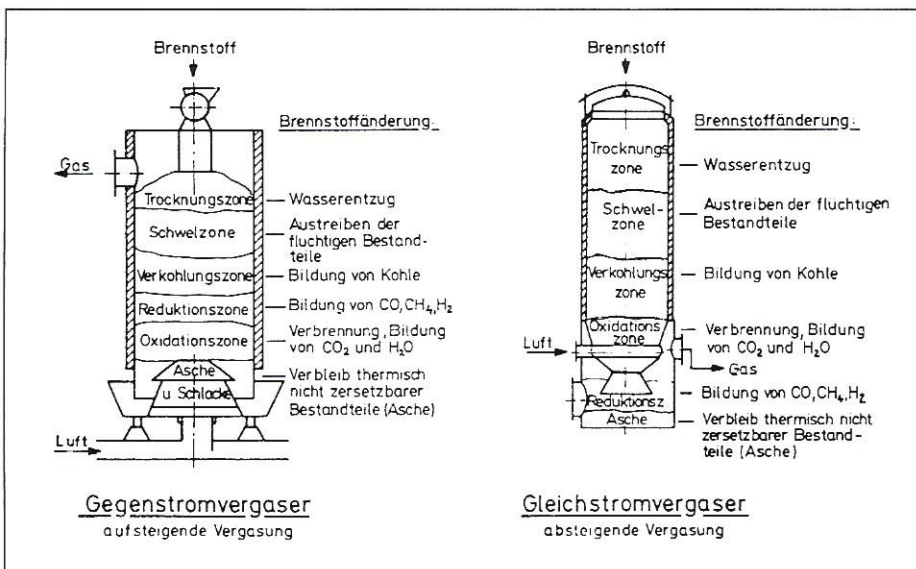


Bild 11 Gegenstrom- und Gleichstromvergaser konventioneller Bauart. Quelle: [Schulze Lammers et al. 1985].

satz von feinem Material. Beispiele: Ahlstrom/Bioneer (Finnland) [Salo 1990]; KFA Thermo-Prozess (Deutschland) [Jennebach 1988]; Juch (Schweiz) [Baumann 1989].

Im grösseren Leistungsbereich (ab ca. 20/50 MWth bis über 500 MWth) werden auch Wirbelschichtverfahren zur Vergasung von Kohle, Torf und Biomasse eingesetzt. Einige Hinweise dazu werden im Folgeartikel in der nächsten Ausgabe von «HeizungKlima» angegeben.

Literatur

Baumann, D.: Helmut Juchs Vielstoff-Vergaser wäre ein Beitrag zur umweltgerechten Entsorgung «Oltner Tagblatt» 168 (1989)

Berghoff, R.: Zur Pyrolyse häuslicher Abfälle, Diss D 82 TH Aachen 1981

Bierter, W.: Gaegauf, Ch.: Holzvergasung, Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1982

Bitlowsky; Härdle; Marek: Grundlagen der Pyrolyse von Reststoffen, in: Thomé-Kozmiensky, K. (Ed.), Pyrolyse von Abfällen, EF-Verlag, Berlin 1985, 1-77

Braun, R.; Brunner, P.: Beseitigung von Abfallstoffen durch Pyrolyse, Sonderdruck aus «Müll und Abfallbeseitigung», Kennzahl 8310, 34. Lfg (1975) Separatum Nr. 511

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

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

Dirks, E.; Hillebrand, P.: Versuchsanlage zur Pyrolyse von festen und pastösen Abfällen mit flüssigem Schlackenabzug (Andco-Torrax-System), BMFT-Forschungsbericht T 82-196, November 1982

Gehrmann, J. (Ed.): Thermochemische Gaszerlegung aus Biomasse – Vergasung und Entgasung, Vorträge eines Seminars der Projektleitung Energieforschung, Jülich 1981

Hedden, K.; Heike, Th.; Rao, B.: Erprobung und Optimierung von kommerziellen Biomasse-Vergasern, BMFT-Forschungsbericht 03E-8062-A, Dezember 1986

Hellwig, M.: Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe, Diss TU München, MEG-Bericht 145, Weihenstephan 1988, ISSN-Nr. 0931-6264

Holz-Zentralheizungen, Impulsprogramm Haushalttechnik, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1. Auflage, Bern 1988

Hummelsiep, H.; Heinrich, F.: Vergasung von Haus- und Industriemüll nach dem SPW-Funk-Verfahren, BMFT-Forschungsbericht T 82-117, August 1982

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

Jüntgen, H.; van Heek, K.: Kohlevergasung, Grundlagen und technische Anwendung, Verlag Karl Thieme, München 1981

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

Klöckner, P.; Rauchfuss, H.; Krämer, U.: Vergasung von Biomasse zur Energieerzeugung, BMFT-Forschungsbericht T 86-203, Dezember 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

Mehrling, P.; Reimert, R.: Entwicklung eines Verfahrens zur Vergasung von Biomasse nach dem Prinzip der Zirkulierenden Wirbelschicht, BMFT-Forschungsbericht T 86-009, Januar 1986

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

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

Nussbaumer, Th.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Diss ETH Nr. 8838, Zürich 1989

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, 275–334

Petersen, B.; Evald, A.; Vogel, G.; Bisgard, Ch.: Røggaskondensering med varmepumpe på flisfyrede kedelanlæg, Energiministeriets Forskningsudvalg for produktion og fordeling af el og varme, ISBN 87-88266-10-9 Innosys Energi & Miljø K/S, Danmark 1989

Salo, K.: Applications of Bioneer Updraft Gasification Technology, in: Korhonen (Ed.), Low-grade fuels, Vol. 2, VTT Symposium 108, Espoo (SF) 1990, 365–378

Schulze Lammers, P.: Kenngrößen der thermischen Gegenstromvergasung von Weizenstroh und ausgewählten Holzbrennstoffen, Diss TU München, MEG-Bericht 98, Weihenstephan 1984

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

Stahel, R.; Schuler, O.; Ledergerber, E.: Altholz – eine vernachlässigte Ressource, NFP 12-Projekt Nr. 4.633.0. 83.12, Verlag Rüegger, Grösch 1987

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

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 MW_{th}. 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 MW_{th}» 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, Abwasseraufbereitung 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 Abwasseraufbereitung 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 (Bauschuttholz) 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 × 20 mm × 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 inerter 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 nichtflüchtig).
- 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 Fahrtrieb 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 uniformer 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

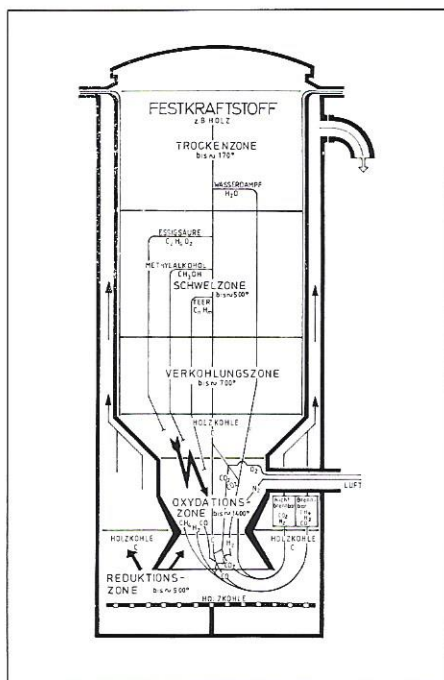


Bild 3 Vergasersystem Imbert.

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 Koksbedts 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 Holzschnitzel 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 1 (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_2 - 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_mH_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, NH_3 : 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 N_2 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 $800\text{--}900^\circ\text{C}$ liegt, herrschen somit ähnliche Bedingungen wie bei den Verfahren zur selektiven nichtkatalytischen Reduktion (SNCR) der Stickoxide. Bei SNCR-Verfahren werden

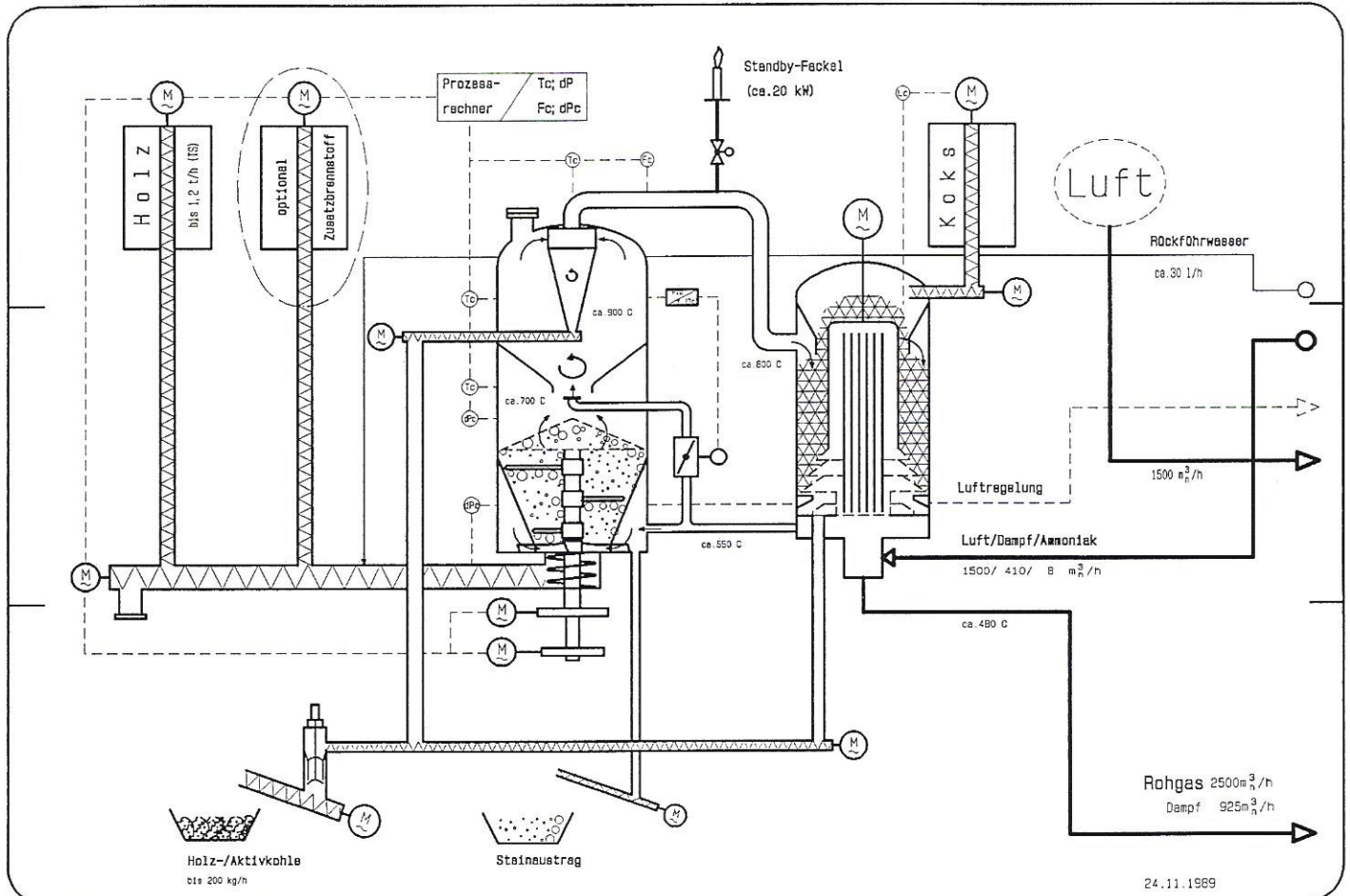
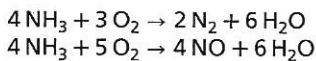


Bild 4 Vergasersystem Michel-Kim (Vergasungsanlage EFEU/Schwelm).

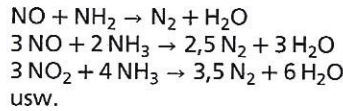
die NH-Verbindungen durch von aussen zugeführten Harnstoff oder Ammoniak erzeugt. Als optimale Temperatur zur Reduktion der Stickoxide gelten Werte um 900 °C, der Bereich der Literaturangaben variiert zwischen 850 und 1100 °C [Schu 1990, Hannes et al. 1987, Schultess 1987, Menig 1987].

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]:

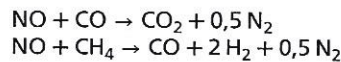


Am Eintrittsort der Vergasungsluft werden zudem aus dem Brennstoffstickstoff des Holzes – über HCN als Zwischenpro-

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 MWeI, 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

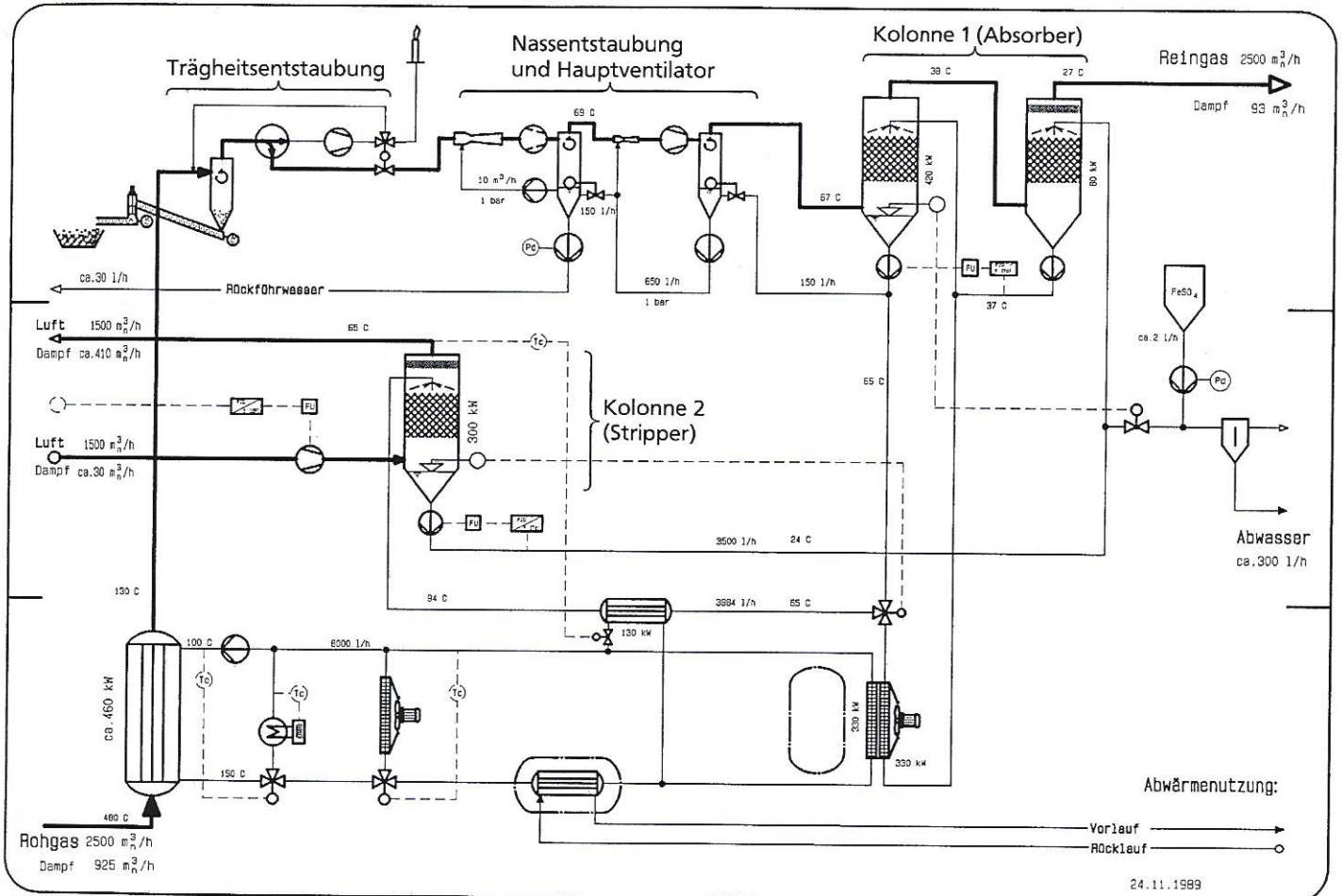


Bild 5 Gasreinigungsteil der Vergasungsanlage EFEU/Schwelm.

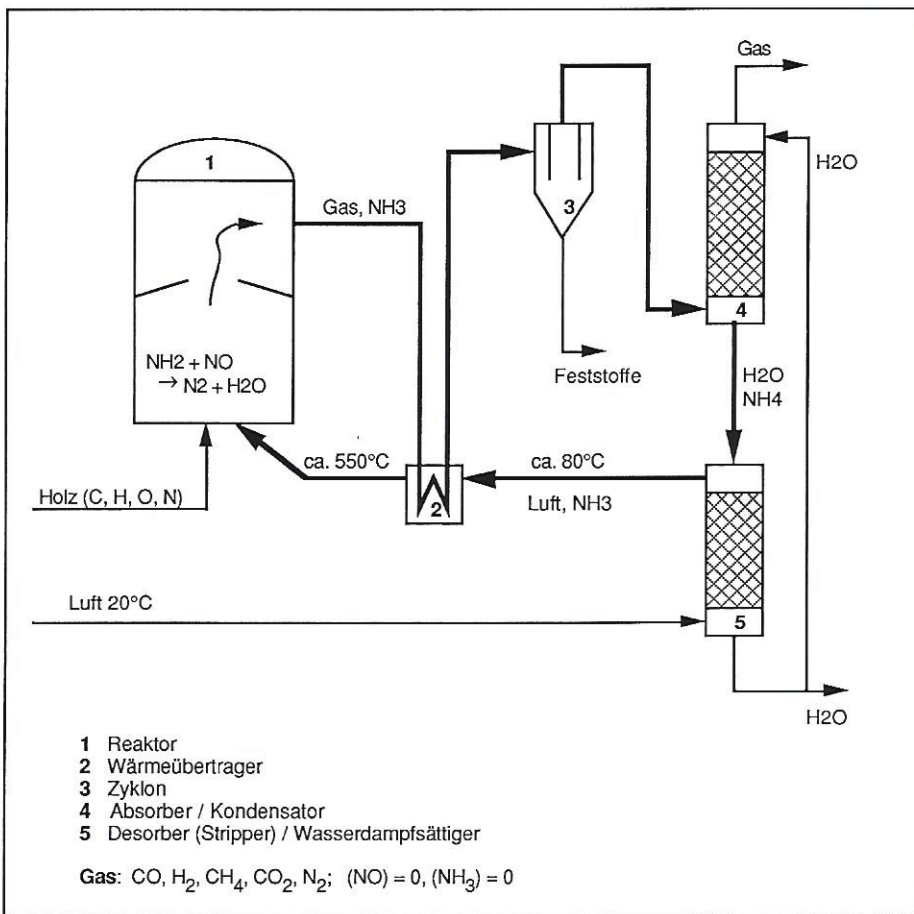


Bild 7 Stickstoffkreislauf bei der Holzvergasung mit Rückführung in den Prozess. Der Brennstoffstickstoff wird im Absorber als NH₃ ausgewaschen und liegt im Waschwasser als NH₄ vor. Im Stripper wird die Vergasungsluft mit NH₃ beladen. Im Reaktor können NO- und NH-Verbindungen zu N₂ umgesetzt werden. 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

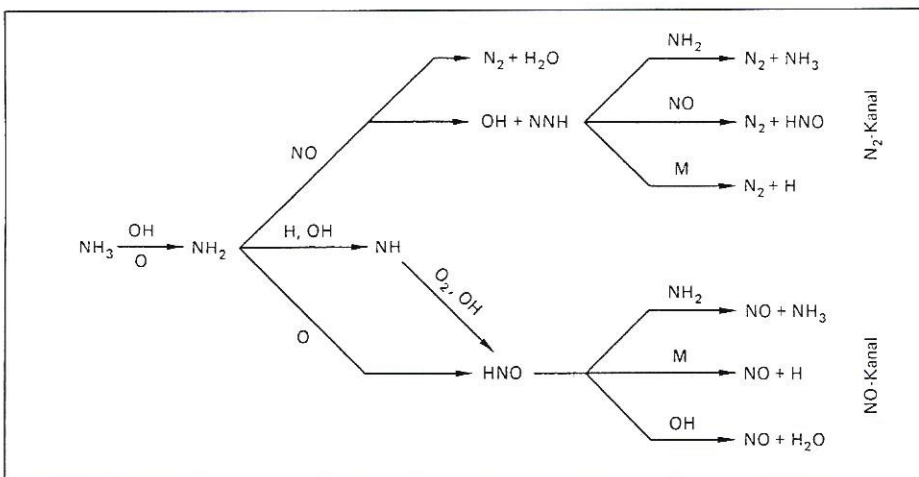


Bild 8 Reaktionsmechanismus der Entstickungsreaktion mit Ammoniak. Quelle: [Schu 1990].

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 Brennstoffstickstoff 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 *Studsвик* 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 öffentli-

chen Bauten des Kantons Zürich, Amt für Gewässer-
schutz 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 Opti-
mierung von kommerziellen Biomasse-Vergasern
BMFT-Forschungsbericht O3E-8062-A, Dezember
1986 Holz-Zentralheizungen, Impulsprogramm Haus-
technik, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1. Auflage,
Bern 1988
Ide, H.; Zerbin, W.; Linneborn, H.; Lohmann, J.: Ent-
wicklung einer Energiegewinnungsanlage zur Erzeu-
gung von Wärme, mechanischer und elektrischer Ener-
gie durch Vergasung von Holz und Stroh im Stückver-
gaser (Imbert), Abschlussbericht Nr. 384-77-9 ESD /
661-78-7 ESD, Kommission der Europäischen Gemein-
schaften, Luxemburg 1981
Jansohn, P.; Kolb, Th.; Leuckel, W.: Bildung von Stick-
stoffoxiden aus Brennstoffstickstoff in turbulenten
Diffusionsflammen und deren Reduktion durch feue-
rungstechnische Massnahmen, «Chem.-Ing.-Tech.» 61
(1989), Nr. 11, MS 1801/89
Jennebach, M.: Untersuchung einer neuentwickelten
mehrstufigen Verbrennungsanlage, Kernforschungs-
anlage Jülich, Bericht Nr. 464, Jülich 1988

Keller, J.; Meis, R.: Combined-Cycle Power Generation
from Coal, Peat and Biomass using the High-Tempera-
ture 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 Sym-
posium 107, Espoo (SF) 1990
Korhonen, M. (Ed.): Low-grade fuels, Vol. 2, VTT Sym-
posium 108, Espoo (SF) 1990
Menig, H.: Emissionsminderung und Recycling, 2. Auf-
lage, Ecomec Verlag, Landsberg/Lech 1987
Michel-Kim, H.: Michel-Kim-Verfahren, in: Thomé-
Kozmiensky, K. (Ed.), Pyrolyse von Abfällen, EF-Ver-
lag, Berlin 1985, S. 224–243
Münch, P.: Graströcknungsanlage Steinmaur – Lang-
zeitversuche 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 Holzverbren-
nung, «HeizungKlima» Nr. 12 1988, S. 51–62
Nussbaumer, Th.; Bühler R.; Jenni, A.: Holzverga-
sungsanlagen 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 Schlak-
ke, Endlagerung von Reststoffen aus Sondermüll-Ver-
brennungsanlagen, «Energie», Jahrg. 41, Nr. 9, Sep-
tember 1989
Schu, G. F.: Betriebserfahrungen mit dem SNCR-Ver-
fahren an einem mit Heizöl 5 gefeuerten Flammrohr-
kessel, «Brennstoff Wärme Kraft» 42 (1990) Nr. 3, Spe-
cial 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 Bio-
masse und Nutzung des Gases zum Antrieb von Moto-
ren, 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-Verbrennungs-
verfahren zur thermischen Verwertung von Abfallstof-
fen, «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