

Nussbaumer, Th.: Grundlagen der Holzvergasung, *Heizung Klima 7*
1990, 52-60

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 Gascrackung 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.

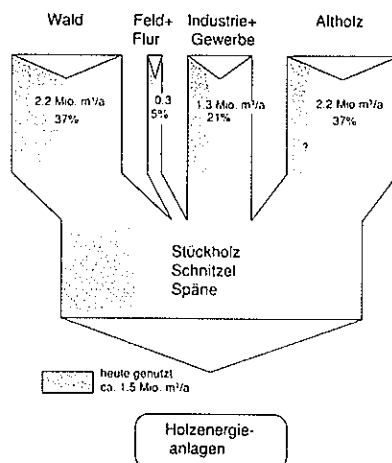


Bild 1 Anteile des Energieholzes in der Schweiz. Die ungenutzte Menge an Altholz ist etwa gleich gross wie die insgesamt genutzte Menge an Energieholz. Quelle: [Holz-Zentralheizungen 1988].

* 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 Kehrlichtverbrennungsanlagen 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

Pyrolyse, Entgasung: Thermische Zersetzung chemischer Verbindungen unter Sauerstoffabschluss. Durch Wärmezufuhr werden die langkettigen, polymerartig aufgebauten Moleküle in kürzere zerlegt.

Vergasung: 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.

Verbrennung: 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.

Cracking, Spaltung: Aufspaltung höhersiedender in niedrigersiedende Verbindungen, also Abbau in kleinere Moleküle. Der Begriff Cracking wird insbesondere für Spaltprozesse der Erdölraffination verwendet. Im Zusammenhang mit der Holzvergasung wird unter Cracking im folgenden der Abbau der makromolekularen Holzbestandteile in möglichst kleine, gasförmige Verbindungen, nämlich CO, H₂, CH₄ und CO₂, verstanden. Da CO₂ 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

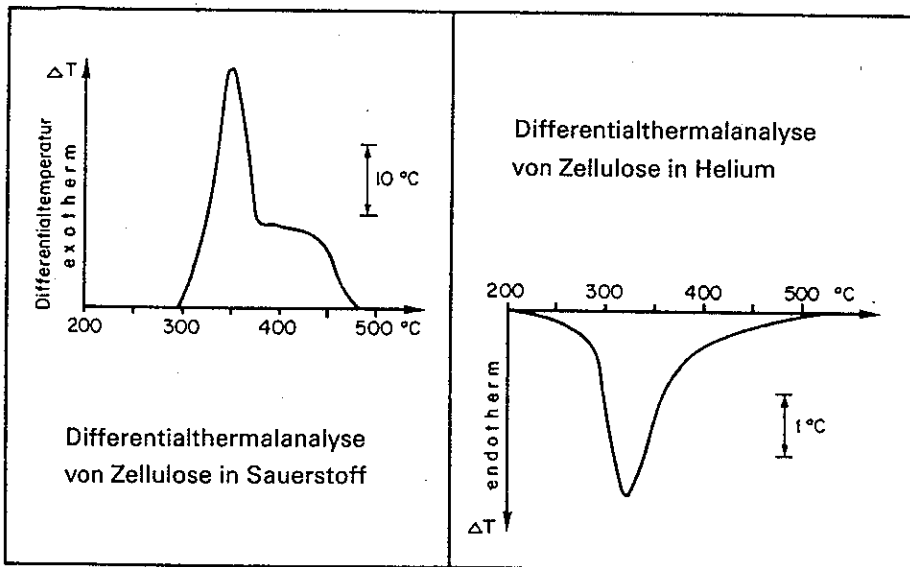


Bild 3 Thermisches Verhalten von Zellulose bei der Verbrennung (links) und bei der Pyrolyse (rechts). Die stark exotherme Verbrennung führt zu einer Temperaturerhöhung um ca. 30 °C, die schwach endotherme Pyrolyse zu einer Temperaturniedrigung um ca. 3 °C (unterschiedlichen Massstab beachten). Quelle: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

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

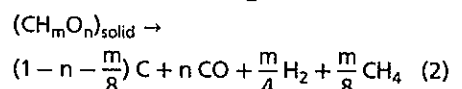
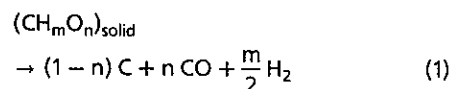
Im Anschluss an die Trocknung, bei der keine chemischen Veränderungen ablaufen, setzt sich die Vergasung von Holz unter Zufuhr von Oxidationsmittel zusammen aus den heterogenen Reaktionen zwischen Feststoff und Gasphase (I+II) und den homogenen Gasphasen-Reaktionen (III):

- 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.

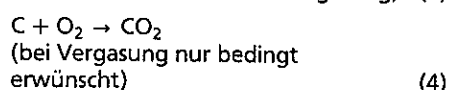
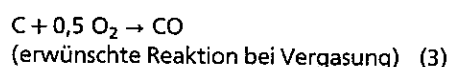
I Pyrolysereaktion unter Zufuhr von Wärme

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

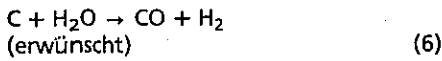
Oxidation von Kohlenstoff



Boudouard-Reaktion



heterogene Wassergasreaktion

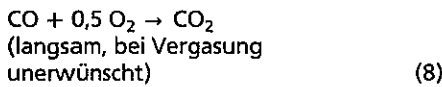


hydrierende Vergasung

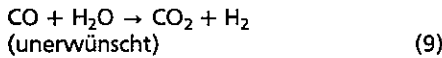


III Homogene Reaktionen Gas/Gas

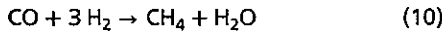
Oxidation von Kohlenmonoxid



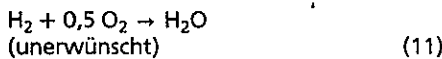
homogene Wassergasreaktion



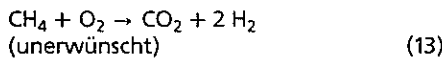
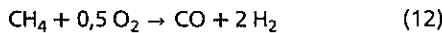
Methanisierung



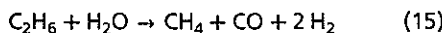
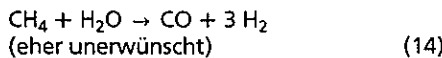
Oxidation von Wasserstoff
(Knallgasreaktion)



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 Gasheizwert 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).

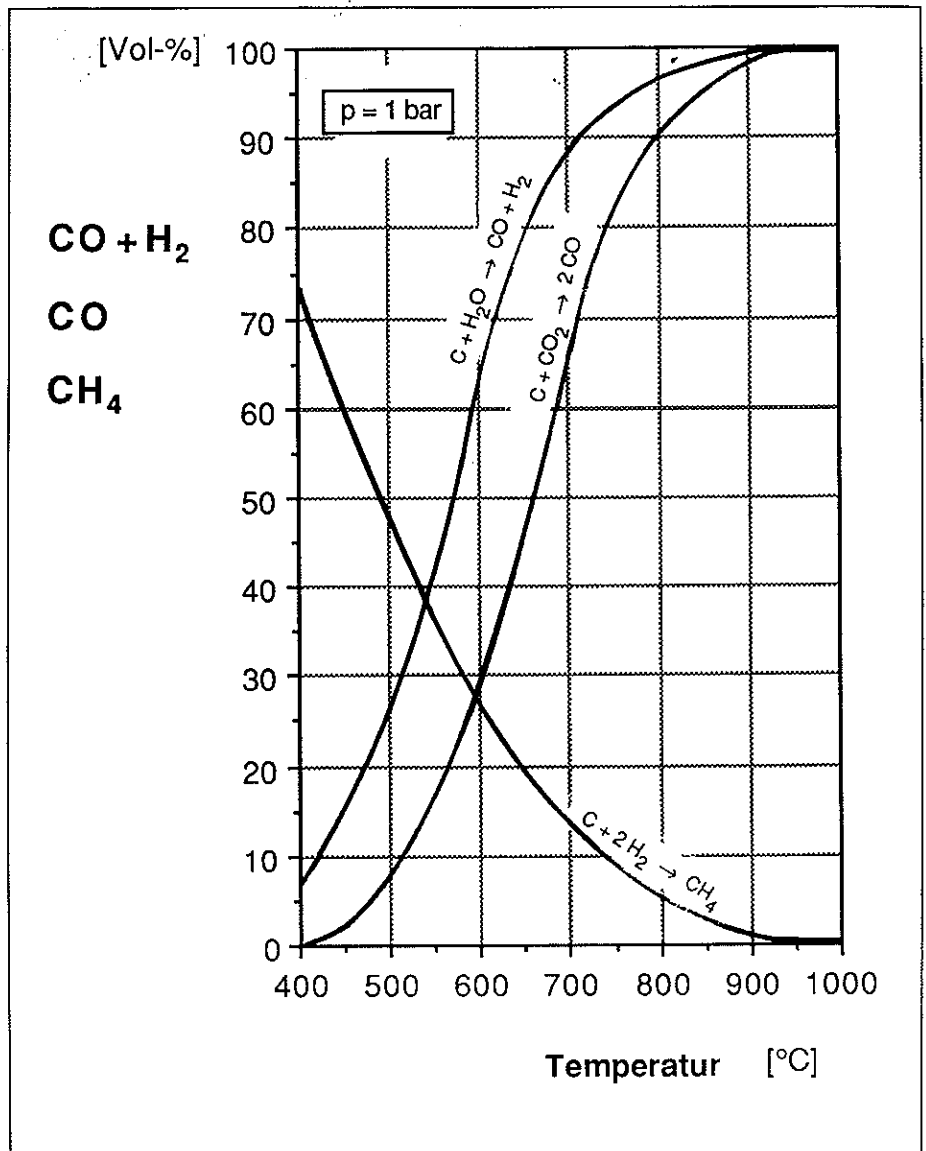


Bild 5 Gleichgewicht der Kohlenstoffvergasung in Abhängigkeit der Temperatur. Boudouard-Reaktion mit CO_2 (im Text: Reaktion (5)), Wassergasreaktion (6), und Reaktion mit Wasserstoff (7). Quelle: [Bilitewski et al. 1985].

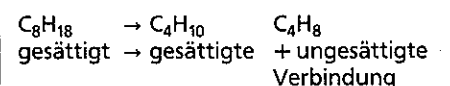
Die Oxidation von Kohlenstoff mit Wasserdampf zu CO und H_2 , die vor allem bei hohem Wasserdampfgehalt wichtig ist, wird als Wassergasreaktion bezeichnet (6). Bei dieser Reaktion liegt das Gleichgewicht bei hohen Temperaturen – ähnlich wie bei der Boudouard-Reaktion – vollständig auf der Seite von CO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

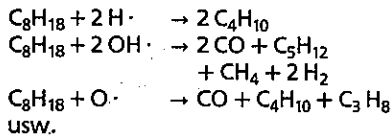
Die stark exothermen homogenen Reaktionen (8), (9), (11) und (13) sind bei der Vergasung unerwünscht, da sie zu einer

Verminderung des Vergasungswirkungsgrads führen.

Da Methan eine hohe Klopffestigkeit 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 Oxidationsmittel unerwünscht, da sie zu ungesättigten Kohlenwasserstoffen mit Doppel-, Dreifach- und Ringbindungen führt. Beispiel:

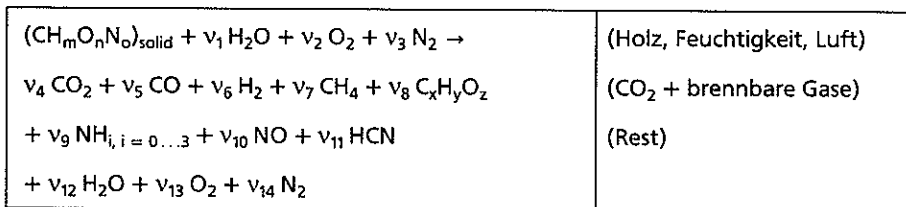


Bei Anwesenheit von H-, OH- oder O-Radikalen ist hingegen ein Abbau höherwertiger Verbindungen zu gesättigten Kohlenwasserstoffverbindungen und Kohlenmonoxid möglich. Beispiel:



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 ($\text{C}_m\text{O}_n\text{N}_o$) 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 «Heizungsklima» Nr. 9/1990 wird auf diese Thematik noch näher eingegangen.

Zusammensetzung der Vergasungsprodukte

Die chemische Bindungsenergie der Vergasungsprodukte verteilt sich auf folgenden 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-

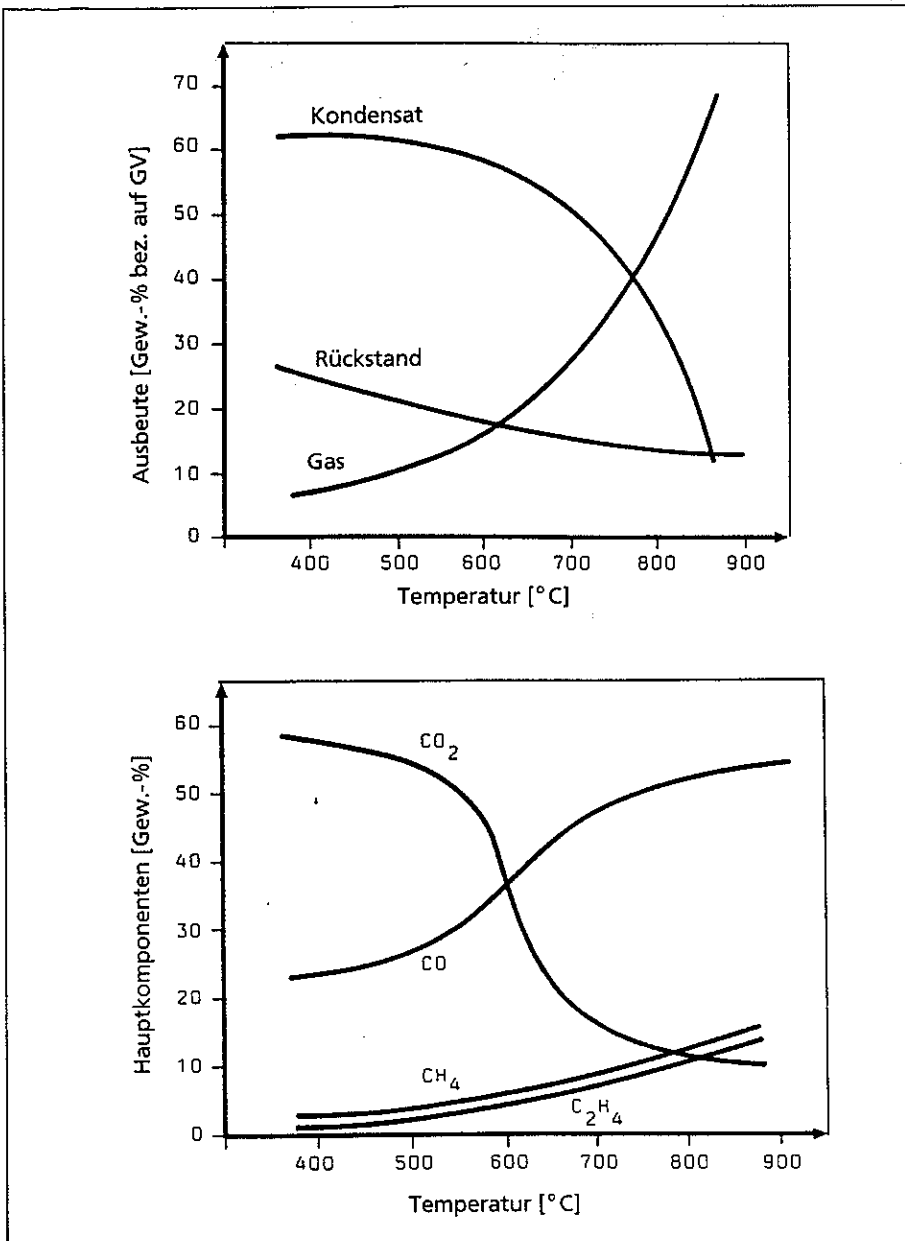


Bild 6 Verteilung der Produktfraktionen (oben) und der Zusammensetzung der Gasphase (unten) in Abhängigkeit der Temperatur bei der Pyrolyse von Klärschlamm. Quelle: [Kistler 1986].

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 konnte.

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 gleichmässige 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.

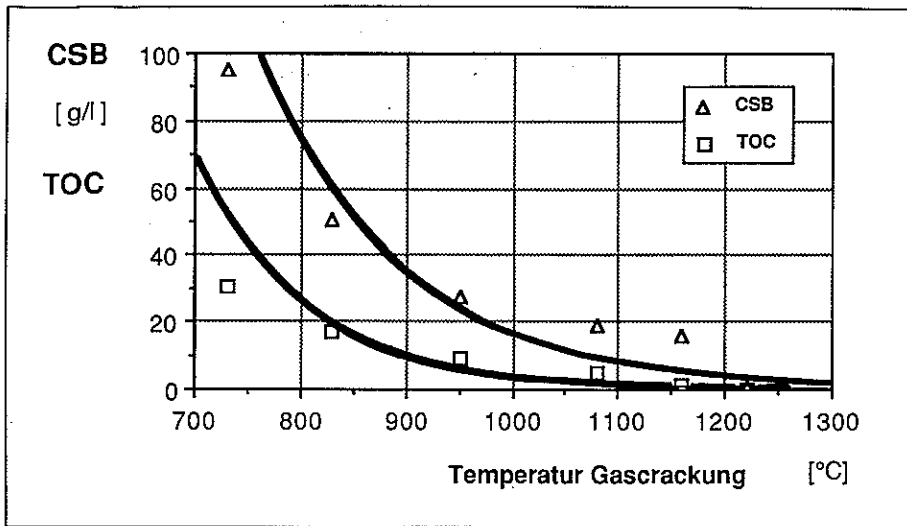


Bild 10 Organische Belastung des Kondensats in Abhängigkeit der Cracktemperatur. TOC = Total Organic Carbon, CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf. Quelle: [Berghoff 1981].

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) [Miché-Kim 1985].
- Festbett-Gleichstromvergaser mit absteigender Vergasung und konstruktiven Massnahmen zur Verhinderung von Brücken- und Kanalbildung beim Ein-

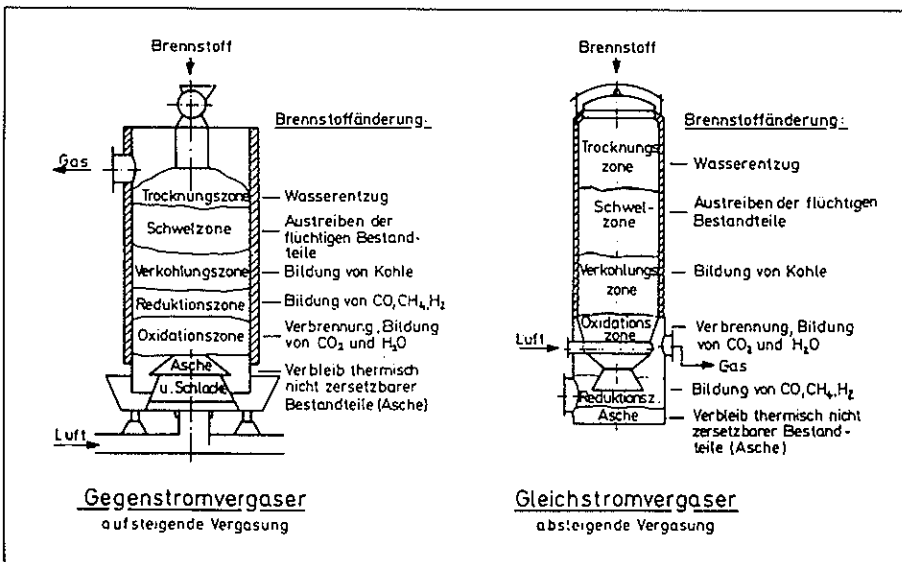


Bild 11 Gegenstrom- und Gleichstromvergaser konventioneller Bauart. Quelle: [Schulze Lammer et al. 1985].

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 «Heizungsklima» 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

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

Bilitewsky, H.; Hårdle, M.; 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-Torrex-System), BMFT-Forschungsbericht T 82-196, November 1982

Gehrmann, J. (Ed.): Thermochemische Gaszerzeugung 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 Haustechnik, Bundesamt für Konjunkturfüragen, 1. Auflage, Bern 1988

Hummelsiep, H.; Heinrich, F.: Vergasung von Haus- und Industriemüll nach dem SFW-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.; Crämer, 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