

Holzenergie

PD Dr. Thomas Nussbaumer, Dipl. Masch.-Ing. ETH, Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zürich

Der Beitrag entstand mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie.

Teil 1: Grundlagen der Holzverbrennung	1
Holz als Brennstoff	1
Wassergehalt und Holzfeuchtigkeit	2
Energieinhalt	2
Teilprozesse der Holzverbrennung	3
Schadstoffe	4
Kohlenmonoxid und Einfluss der Verbrennungsluft	5
Stickoxide	6
Staubemissionen	6
Anforderungen für vollständigen Ausbrand	7
Literatur	8

Teil 1: Grundlagen der Holzverbrennung

Da die Nutzung von Energieholz aus dem Wald und aus der Holzverarbeitung zu einer nachhaltigen Energieversorgung beiträgt, gewinnt Holz als erneuerbarer Energieträger zunehmend an Bedeutung. Obwohl mittelfristig auch die Produktion von Strom und Treibstoff aus Holz und anderen biogenen Energieträgern von Interesse ist, steht im heutigen Umfeld die Wärmeerzeugung im Vordergrund. Holzfeuerungen werden dazu in der Leistungsklasse von handbeschickten Zimmeröfen bis zu automatisch beschickten Grossanlagen in zahlreichen Ausführungen angeboten. Basis für die Konstruktion emissionsarmer Holzfeuerungen ist die Kenntnis des Verbrennungsablaufs über Trocknung, thermische Zersetzung, Vergasung und Ausbrand der Gase sowie die damit verbundene Bildung von Schadstoffen. Der vorliegende Beitrag behandelt die Grundlagen der Holzverbrennung sowie der Schadstoffbildung in Holzfeuerungen. In zwei Folgebeiträgen werden die wichtigsten Typen von handbeschickten und automatischen Holzfeuerungen vorgestellt.

Holz als Brennstoff

Die Holzbrennstoffe unterscheiden sich je nach Herkunft, Aufbereitung und Lagerung vor allem durch die Stückgrösse, den Aschegehalt und den Wassergehalt. Der Wassergehalt variiert von Werten unter 10 Gewichtsprozent für trockenes Restholz bis zu über 50 Gewichtsprozent (also einer Holzfeuchtigkeit von über 100 %) für Rinde oder frische Waldhackschnitzel. Da das Wasser in der Feuerung verdampft werden muss, beeinflusst die Holzfeuchtigkeit den Heizwert (Abbildung 1) und damit die maximal erzielbare Verbrennungstemperatur (Abbildung 2): Bei trockenem Holz werden höhere Verbrennungstemperaturen erzielt als bei nassem Holz, weshalb der Wassergehalt bei der Konstruktion der Feuerung und der Betriebsweise berücksichtigt wird.

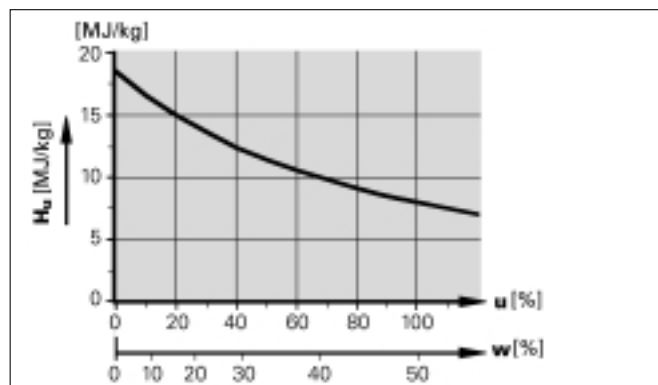


Abbildung 1
Heizwert von Holz in Funktion der Holzfeuchtigkeit u (bezogen auf absolut trockene Holzmasse) und des Wassergehalts w (bezogen auf feuchte Holzmasse)

Illustration 1
Pouvoir calorifique du bois en fonction de son humidité u (par rapport à la masse ligneuse absolument sèche) et de sa teneur en eau w (par rapport à la masse ligneuse humide)

Energie du bois

Dr. Thomas Nussbaumer, privat-docent, ingénieur-mécanicien diplômé EPF, Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zurich

L'article est publié avec le soutien de l'Office fédéral de l'énergie.

Partie 1: fondements de la combustion du bois1	
Le bois comme combustible	1
Teneur en eau et humidité du bois	2
Teneur énergétique	2
Processus partiels de la combustion du bois	3
Substances polluantes	4
Monoxyde de carbone et influence de l'air de combustion	5
Oxydes d'azote	6
Emissions de poussière	6
Exigences requises pour une combustion intégrale	7
Bibliographie	8

Partie 1: fondements de la combustion du bois

Comme l'utilisation de bois de forêt et de bois de transformation contribue à un approvisionnement durable en énergie, le bois prend de plus en plus d'importance comme vecteur énergétique renouvelable. Quand bien même la production d'électricité et de carburant à partir de bois et d'autres vecteurs énergétiques biogènes présente de l'intérêt à moyen terme, la production de chaleur figure au premier plan dans le contexte actuel. Les installations de chauffage au bois sont en outre proposées dans de nombreuses variantes pour des catégories de puissance qui vont du simple poêle de chambre à alimentation manuelle à la grande installation à alimentation automatique. La construction d'installations de chauffage au bois à émissions réduites doit se baser sur la connaissance du processus de combustion en passant successivement par le séchage, la décomposition thermique, la gazéification et la combustion des gaz, y compris la formation correspondante de substances polluantes. Le présent article traite des fondements de la combustion du bois et de la formation de substances polluantes dans des installations de chauffage au bois. Dans les deux articles suivants, nous traiterons des principaux types d'installations de chauffage au bois à alimentation manuelle et automatique.

Le bois comme combustible

En fonction de leur provenance, de leur conditionnement et de leur stockage, les bois de feu se différencient avant tout par la grandeur des pièces, la teneur en cendres et la teneur en eau. Cette dernière varie entre des valeurs inférieures à 10 % du poids pour des sous-produits secs de transformation et supérieures à 50 % du poids (c'est-à-dire une humidité du bois supérieure à 100 %) pour des écorces ou des plaquettes fraîches de bois de forêt. Comme l'eau s'évapore lors de la combustion, l'humidité du bois influence le pouvoir calorifique (illustration 1) et donc la température de combustion maximale atteignable; avec du bois sec, on parvient à des températures de combustion plus élevées qu'avec du bois humide, raison pour laquelle il faut tenir compte de la teneur en eau dans le contexte de la conception et de l'exploitation d'une installation de chauffage au bois.

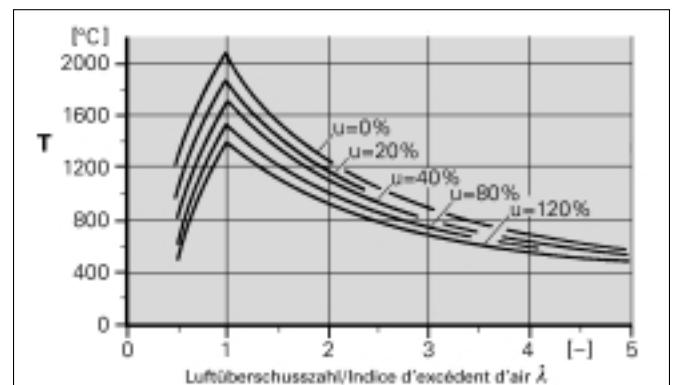


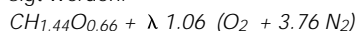
Abbildung 2
Adiabate Verbrennungstemperatur in Funktion der Luftüberschusszahl für Holzfeuchtigkeiten von 0 %, 20 %, 40 %, 80 % und 120 % atro

Illustration 2
Courbes adiabatiques de la température de combustion en fonction de l'indice d'excès d'air pour une humidité du bois de 0 %, 20 %, 40 %, 80 % et 120 % atro

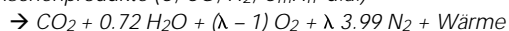
Der Ascheanteil setzt sich zusammen aus den Mineralstoffen wie Kalium, Magnesium und Calcium, Fremdstoffen wie Sand und Steinen sowie bei Restholz allfälligen Zusatzstoffen. Rinde, Nadeln und Blätter weisen einen höheren Mineralstoffgehalt als Stammholz auf. Mineralstoffe und Fremdstoffe können zu Partikelemissionen führen und teilweise auch die unerwünschte Verschlackung im Feuerraum begünstigen.

Schwefel (S) ist im Holz nur in Spuren vorhanden, weshalb Holzfeuerungen nur geringe Emissionen an Schwefeldioxid (SO₂) aufweisen. Naturbelassenes Holz enthält dagegen einen – wenn auch geringen – Anteil Stickstoff (N), der bei der Verbrennung zu Stickoxidemissionen (NO_x) führt. Der hohe Stickstoffgehalt von Bindemitteln in Spanplatten führt bei Restholz zu entsprechend höheren Stickoxidemissionen.

Obwohl die Holzarten in Erscheinung und Eigenschaften deutliche Unterschiede aufweisen, unterscheidet sich der Anteil der Hauptkomponenten – also Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) – nur geringfügig. Holz enthält im Mittel rund 50 Gew.-% Kohlenstoff, 6 Gew.-% Wasserstoff und 44 Gew.-% Sauerstoff, was der Summenformel CH_{1,44}O_{0,66} entspricht. Die vollständige Verbrennung von trockenem Holz mit Luft (21 % Sauerstoff und 79 % Stickstoff) kann damit wie folgt beschrieben werden, wenn die in geringen Konzentrationen vorhandenen Elemente wie Schwefel und Stickstoff vernachlässigt werden:



→ Zwischenprodukte (C, CO, H₂, C_mH_n u.a.)



Die Luftüberschusszahl λ (Lambda) beschreibt dabei das Verhältnis zwischen der effektiv zugeführten und der theoretisch notwendigen Luftmenge und sie beträgt in der Regel zwischen 1,5 und 2,5.

Wassergehalt und Holzfeuchtigkeit

Zur Angabe des Wasseranteils im Holz sind zwei Grössen üblich. Beim Wassergehalt wird das Gewicht des Wassers auf das Gewicht des feuchten Holzes bezogen, während die Holzfeuchtigkeit das Verhältnis zwischen dem Gewicht des Wassers und dem Gewicht der trockenen Holzsubstanz bezeichnet:

$$\text{Wassergehalt } w = \frac{\text{Gewicht des Wassers}}{\text{Gewicht des feuchten Holzes}}$$

$$\text{Holzfeuchtigkeit } u = \frac{\text{Gewicht des Wassers}}{\text{Gewicht des trockenen Holzes}}$$

Für beide Grössen sind Angaben als Dezimale oder in Prozent gebräuchlich. Bei einer Angabe in Prozent gilt für die Umrechnung zwischen w und u:

$$w[\%] = \frac{u[\%]}{100 + u[\%]} \cdot 100 \quad \text{sowie} \quad u[\%] = \frac{w[\%]}{100 + w[\%]} \cdot 100$$

Für die trockene Holzsubstanz oder die Trockenmasse mit w = u = 0 werden auch die Begriffe absolut trocken (atro) oder wasserfrei (wf) verwendet. Mit dem Begriff lufttrocken (lutro) wird Holz bezeichnet, das während rund 2 Jahren getrocknet wurde und einen Wassergehalt von ungefähr 15 % aufweist.

Tabelle 1
Umrechnungstabelle für w und u

w [%]	u [%]
0	0
25	33
40	67
50	100
60	150

Tabelle 2
Typische Werte für w und u

Sortiment	w [%]	u [%]
Naturbelassene Holzschnitzel aus dem Wald	30–60	43–150
Naturbelassene Holzschnitzel unter Dach gelagert	20–30	25–43
Naturbelassene Holzschnitzel lufttrocken	15–20	18–25
Naturbelassenes Restholz aus Sägerei	25–60	33–150
Restholz aus Zimmerei	13–20	15–25
Restholz aus Schreinerei	7–17	7–20

Energieinhalt

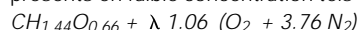
Der Energieinhalt von Holz wird angegeben durch den Heizwert (H_u). Der Heizwert ist die bei der Verbrennung gewinnbare Energie, wenn die Abgase auf die Ausgangstemperatur abgekühlt werden und das Wasser im Abgas in Dampfform vorliegt.

Der Heizwert von absolut trockenem (atro) Holz beträgt im Mittel 18.1 MJ/kg für Laubhölzer und 19.0 MJ/kg für Nadelhölzer. Für vereinfachte Berechnungen wird oft mit 18.3 MJ/kg gerechnet, was dem Heizwert

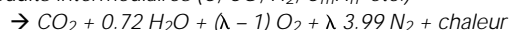
La part de cendres se compose de matières minérales telles que du potassium, du magnésium et du calcium, de corps étrangers tels que du sable et des petites pierres ainsi que d'éventuelles substances additives pour divers déchets de bois. L'écorce, les aiguilles et les feuilles présentent une teneur en matières minérales plus élevée que du bois de tige. Les matières minérales et les corps étrangers peuvent entraîner des émissions de particules et parfois aussi favoriser un dépôt indésirable de scories dans le foyer.

Dans du bois, on ne trouve du soufre (S) que sous forme de traces, raison pour laquelle des installations de chauffage au bois ne génèrent que de faibles émissions de dioxyde de soufre (SO₂). Un bois à l'état naturel contient par contre – même en très faible quantité – une proportion d'azote (N) qui génère des émissions d'oxyde d'azote (NO_x) lors de la combustion. Avec des déchets de bois, la teneur élevée en azote des liants dans des panneaux de particules entraîne très logiquement des émissions d'oxyde d'azote plus importantes.

Même si les différentes essences de bois présentent de nettes différences quant à leur aspect et leurs caractéristiques, la proportion des principaux composants – c'est-à-dire carbone (C), hydrogène (H) et oxygène (O) – ne varie que faiblement. En moyenne, du bois contient pondéralement environ 50 % de carbone, 6 % d'hydrogène et 44 % d'oxygène, ce qui correspond à la formule brute CH_{1,44}O_{0,66}. La combustion complète de bois sec avec de l'air (21 % d'oxygène et 79 % d'azote) peut donc se décrire comme suit si l'on néglige les éléments présents en faible concentration tels que le soufre et l'azote:



→ produits intermédiaires (C, CO, H₂, C_mH_n etc.)



L'indice d'excédent d'air λ (lambda) indique en l'occurrence le rapport entre la quantité d'air effectivement amenée et la quantité d'air théoriquement nécessaire; en règle générale, cet indice se situe entre 1,5 et 2,5.

Teneur en eau et humidité du bois

On utilise ordinairement deux grandeurs pour indiquer la quantité d'eau présente dans du bois. En ce qui concerne la teneur en eau, on rapporte le poids de l'eau au poids du bois humide, alors que l'humidité du bois établit le rapport entre le poids de l'eau et le poids de la matière ligneuse sèche:

$$\text{Teneur en eau } w = \frac{\text{poids de l'eau}}{\text{poids du bois humide}}$$

$$\text{Humidité du bois } u = \frac{\text{poids de l'eau}}{\text{poids du bois sec}}$$

Les deux grandeurs sont usuellement exprimées avec des décimales ou en %. Pour exprimer une valeur en %, on applique la formule de conversion suivante entre w et u:

$$w[\%] = \frac{u[\%]}{100 + u[\%]} \cdot 100 \quad \text{ainsi que} \quad u[\%] = \frac{w[\%]}{100 + w[\%]} \cdot 100$$

Pour désigner une substance ligneuse sèche ou une masse sèche caractérisée par w = u = 0, on utilise également les expressions «absolument sec» (atro) ou «exempt d'eau» (wf). Avec l'expression «séchés à l'air» (lutro), on désigne un bois qui a séché pendant 2 ans environ et qui présente une teneur en eau d'environ 15 %.

Tableau 1
Tableau de conversion pour w et u

w [%]	u [%]
0	0
25	33
40	67
50	100
60	150

Tableau 2
Valeurs caractéristiques pour w et u

Variété	w [%]	u [%]
Plaquettes de bois de forêt à l'état naturel	30–60	43–150
Plaquettes de bois à l'état naturel stockées sous toit	20–30	25–43
Plaquettes de bois à l'état naturel séchées à l'air	15–20	18–25
Déchets de bois de scierie à l'état naturel	25–60	33–150
Déchets de bois de charpenterie	13–20	15–25
Déchets de bois de menuiserie	7–17	7–20

Teneur énergétique

La teneur énergétique du bois est indiquée par son pouvoir calorifique (H_u). Ce pouvoir calorifique correspond à l'énergie qu'il est possible de récupérer par combustion lorsque les gaz effluents sont refroidis à la température de sortie alors que l'eau en suspension dans ces gaz s'évapore.

Le pouvoir calorifique de bois absolument sec (atro) est en moyenne de 18.1 MJ/kg pour du bois de feuillu et de 19.0 MJ/kg pour du bois ré-

von Holz mittlerer Zusammensetzung entspricht. Energieholz enthält Wasser in Form von Holzfeuchtigkeit und allenfalls von Fremdwasser durch die Lagerung. Mit zunehmender Holzfeuchtigkeit nimmt der Heizwert ab (Abbildung 1), da das im Holz enthaltene Wasser verdampft werden muss. Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit kann mit folgender Beziehung ausgedrückt werden:

$$H_u = \frac{H_{u\text{atro}} - 2.5 \frac{u[\%]}{100}}{1 + \frac{u[\%]}{100}} \quad [\text{MJ/kg}]$$

wobei u in [%] angegeben ist und vereinfacht oft mit $H_{u\text{atro}} = 18.3$ MJ/kg gerechnet werden kann. Anstelle von [MJ] kann auch mit [kWh] gerechnet werden: 1 kWh = 3.6 MJ. Gemäss dieser Beziehung nimmt der Heizwert pro kg feuchtes Holz drastisch ab mit steigender Holzfeuchtigkeit. Bezogen auf das Trockengewicht ist die Abnahme jedoch nur gering, weshalb auch der Energieinhalt pro Schüttkubikmeter mit zunehmender Holzfeuchtigkeit nur leicht abnimmt (siehe dazu auch Übersichtsbeitrag).

Die harten Laubhölzer besitzen wegen ihrer grösseren Dichte einen höheren Energieinhalt pro Volumen als Nadelhölzer. Bezogen auf das Trockengewicht sind die Unterschiede zwischen Laub- und Nadelhölzern jedoch gering. Energieholz aus der Holzverarbeitung weist je nach Herkunft sehr grosse Unterschiede in Form und Wassergehalt auf. Sägereiholz weist in der Regel einen hohen Wassergehalt auf, während Restholz aus Schreinerereien und Zimmereien meist sehr trocken ist.

Teilprozesse der Holzverbrennung

Holz ist ein Festbrennstoff mit hohem Flüchtigengehalt. Bei der Erwärmung werden 80 bis 90 Gewichtsprozent der trockenen Holzmasse als Gase freigesetzt. In erster Linie sind dies Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H₂) und Kohlenwasserstoffe (C_mH_n). Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Gewichtsabnahme des Feststoffs mit zunehmender Temperatur.

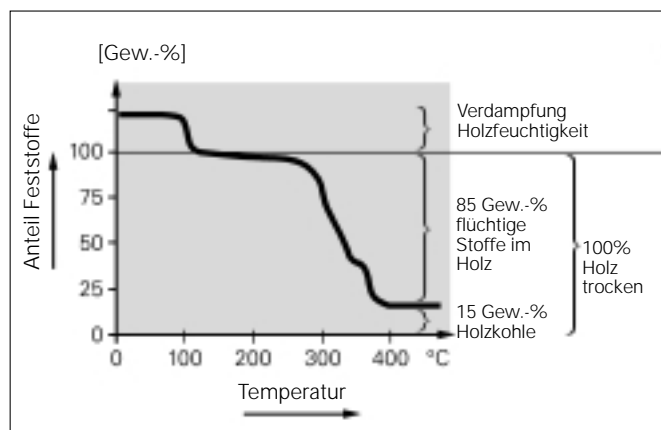


Abbildung 3 Gewichtsabnahme des Feststoffs bei der Erwärmung von Holz (ohne Luftzufuhr) in Funktion der Temperatur. 100% = Masse des absolut trockenen Holzes, im Beispiel beträgt der Wassergehalt rund 20 Gew.-%. Bei der Oxidation der Vergasungsprodukte (85 Gew.-%) werden rund zwei Drittel der Energie, bei der Oxidation der Holzkohle (15 Gew.-%) rund ein Drittel der Energie freigesetzt. Die Oxidation der Holzkohle dauert rund doppelt so lang wie die Vergasung des Holzes.

In einer Holzfeuerung erfolgt die Freisetzung dieser Stoffe durch Vergasung des Holzes (bei $\lambda < 1$) im Glutbett. Anschliessend werden die Gase mit Verbrennungsluft vermischt und in der Brennkammer in einer langen Flamme verbrannt. Für den Ausbrand der Gase wird in der Regel Sekundärluft zugeführt, während für die Umwandlung des Holzes in Gase Primärluft zugeführt wird. Da die Gase in einer langen Flamme ausbrennen, wird Holz als langflammiger Brennstoff bezeichnet. Die Holzkohle im Glutbett brennt dagegen langsam und mit geringer Flammenbildung ab. Bei der Verbrennung von Holz laufen folgende Teilprozesse zum Teil gleichzeitig und zum Teil nacheinander ab:

- Erwärmung des Brennstoffs durch Rückstrahlung von Flamme, Glutbett und Feuerraumwänden
- Trocknung durch Verdampfung und Wegtransport des Wassers (ab 100 °C)
- Zersetzung des Holzes durch Temperatureinwirkung (ab 250 °C)
- Vergasung des Holzes mit Primärluft zu Gasen und festem Kohlenstoff (ab 250 °C)
- Vergasung des Kohlenstoffs (ab 500 °C)
- Oxidation der brennbaren Gase zu Kohlendioxid und Wasser bei Temperaturen ab 700 °C bis rund 1500 °C (maximal rund 2000 °C)
- Wärmeabgabe der Flamme an die umgebenden Wände und den neu zugeführten Brennstoff

sineux. Pour simplifier les calculs, on utilise souvent la valeur de 18.3 MJ/kg, ce qui correspond au pouvoir calorifique d'un bois de composition moyenne. Le bois d'énergie contient de l'eau sous forme d'humidité et à la rigueur de l'eau exogène apportée durant le stockage. Lorsque l'humidité du bois augmente, le pouvoir calorifique diminue (illustration 1), car l'eau contenue par le bois doit s'évaporer. L'influence de l'humidité du bois peut s'exprimer au moyen de la formule suivante:

$$H_u = \frac{H_{u\text{atro}} - 2.5 \frac{u[\%]}{100}}{1 + \frac{u[\%]}{100}} \quad [\text{MJ/kg}]$$

Ici, u est indiqué en [%] et, pour simplifier, on calcule souvent avec $H_{u\text{atro}} = 18.3$ MJ/kg. En lieu et place de [MJ], on peut aussi calculer en [kWh], soit 1 kWh = 3.6 MJ. Conformément à cette relation, le pouvoir calorifique par kg de bois sec diminue considérablement lorsque son humidité augmente. Par rapport au poids sec, la diminution est toutefois relativement faible, raison pour laquelle la teneur énergétique par mètre cube de vrac ne diminue que légèrement lorsque l'humidité du bois augmente (voir également à ce sujet l'article général).

Etant donné leur densité supérieure, les bois durs de feuillus ont une teneur énergétique plus élevée par volume que des bois résineux. Rapportées au poids sec, les différences entre les bois de feuillus et les bois résineux sont toutefois minimes. Selon son origine, du bois d'énergie de transformation peut présenter de très importantes différences quant à sa forme et sa teneur en eau. En règle générale, du bois de scierie présente une teneur élevée en eau, alors que des déchets de menuiseries et de charpenteries sont normalement très secs.

Processus partiels de la combustion du bois

Le bois est un combustible solide à haute teneur en matières volatiles. Par caléfaction, 80 à 90 % en poids de la masse ligneuse sèche est libérée sous forme de gaz, à savoir principalement du monoxyde de carbone (CO), de l'hydrogène (H₂) et des hydrocarbures (C_mH_n). L'illustration 3 présente la courbe de la diminution pondérale de matières solides lorsque la température augmente.

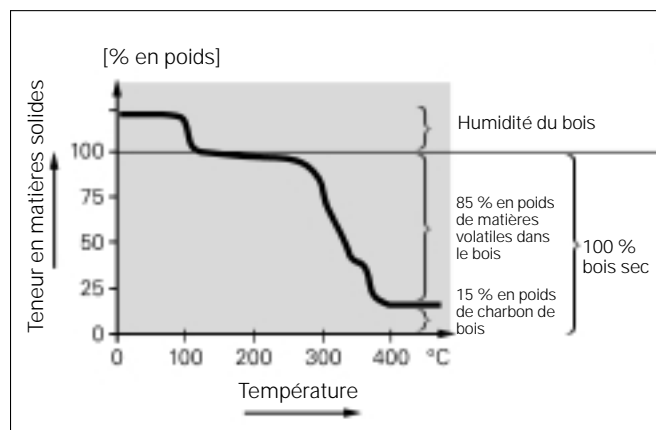


Illustration 3 Diminution pondérale des matières solides par caléfaction du bois (sans apport d'air) en fonction de la température. 100% = masse du bois absolument sec; dans l'exemple, la teneur en eau est d'environ 20% du poids. L'énergie est libérée à raison de deux tiers environ par oxydation des produits de gazéification (85% du poids) et un tiers environ par oxydation du charbon de bois. L'oxydation du charbon de bois dure approximativement deux fois plus longtemps que la gazéification du bois.

Dans une installation de chauffage au bois, la libération de ces matières par gazéification du bois (pour $\lambda < 1$) s'opère dans un lit de braises. Ensuite, les gaz sont mélangés à l'air comburant et brûlés en une longue flamme à l'intérieur de la chambre de combustion. Pour brûler les gaz, on prévoit généralement un apport d'air secondaire, alors qu'un apport d'air primaire est nécessaire pour convertir le bois en gaz. Comme les gaz brûlent en une longue flamme, on donne au bois le nom de combustible à longue flamme. Dans le lit de braises, le charbon de bois se consomme au contraire lentement et avec un faible dégagement de flammes. Lors de la combustion de bois, les processus partiels suivants se déroulent parfois simultanément et parfois successivement:

- Caléfaction du combustible par rétro-rayonnement de la flamme, du lit de braises et des parois du foyer
- Séchage par évaporation et élimination de l'eau (dès 100 °C)
- Décomposition du bois par action de la chaleur (dès 250 °C)
- Gazéification du bois avec de l'air primaire pour former des gaz et du carbone solide (dès 250 °C)
- Gazéification du carbone (dès 500 °C)
- Oxydation des gaz combustibles en dioxyde de carbone et en eau pour des températures dès 700 °C et jusqu'à 1500 °C environ (maximum 2000 °C environ)
- Transmission de la chaleur de la flamme aux parois du foyer et au combustible de réalimentation

Schadstoffe

Wie bei jedem Verbrennungsprozess können auch bei der Holzverbrennung Schadstoffe gebildet werden. Die Schadstoffbildung ist abhängig von der Brennstoffzusammensetzung und von den Verbrennungsbedingungen. Durch die Wahl einer guten Feuerung und durch sachgemässen Betrieb – insbesondere durch Verwendung eines geeigneten Brennstoffs – können die Schadstoffe auf ein geringes Mass vermindert werden.

Die Holzverbrennung ist ein zweistufiger Vorgang mit Vergasung des Holzes als erstem und Oxidation von Gasen und Holzkohle als zweitem Teilprozess (Abbildung 4). Die Schadstoffe können entsprechend diesen Teilschritten unterteilt werden in eine *erste Gruppe der Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung*: Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Teer und Russ (brennbarer Staub) und eine *zweite Gruppe der Schadstoffe aus vollständiger Verbrennung*: Kohlendioxid, Stickoxide und Aschepartikel (unbrennbarer Staub). Aufgrund der verschiedenen Bildungsarten der Schadstoffe müssen auch unterschiedliche Massnahmen zu deren Vermeidung getroffen werden:

- Die Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung können durch eine geeignete Verbrennungsführung vermieden werden. Dies erfordert eine hohe Temperatur und eine gute Vermischung der Gase mit der Verbrennungsluft. In handbeschickten Feuerungen kann nur mit trockenem Holz eine ausreichend hohe Temperatur erzielt werden, nasses Holz verbrennt dagegen unvollständig. In grösseren automatischen Feuerungen mit heisser Brennkammer und Betrieb bei tiefem Luftüberschuss können auch Brennstoffe mit hohem Wassergehalt verbrannt werden.
- Zur Verminderung der Partikelemissionen ist ein vollständiger Ausbrand erforderlich. In grösseren Anlagen werden zudem Staubscheideverfahren eingesetzt.
- Die Emission an Kohlendioxid ist proportional zur umgesetzten Brennstoffmenge und damit direkt abhängig von der bereitzustellenden Nutzenergie und dem Anlagennutzungsgrad. Eine Verminderung der CO₂-Emissionen kann somit durch Energiesparmassnahmen und Verbesserung des Nutzungsgrads erzielt werden.
- Die Stickoxidemissionen, die aus dem Brennstoffstickstoff stammen, können in grösseren Feuerungen durch feuerungstechnische Massnahmen bis zu einem gewissen Grad reduziert, jedoch nicht vollständig verhindert werden. In handbeschickten Feuerungen sind die Stickoxidemissionen nur von untergeordneter Bedeutung.

Bei Verbrennung von Altholz oder belastetem Restholz können weitere Schadstoffe gebildet werden, insbesondere Salzsäure (HCl) und Schwermetalle aus den entsprechenden Verunreinigungen im Brennstoff. In Altholzfeuerungen müssen diese Schadstoffe in der Abgasreinigung abgeschieden und die Asche sachgerecht entsorgt werden. In gewöhnlichen Holzfeuerungen ist die Verbrennung von Altholz verboten, ebenso die Verbrennung von brennbaren Abfällen, die zusätzlich hohe Dioxinmissionen verursacht. Beides verursacht unzulässige Emissionen, eine frühzeitige Zerstörung der Feuerung und giftige Ascherückstände.

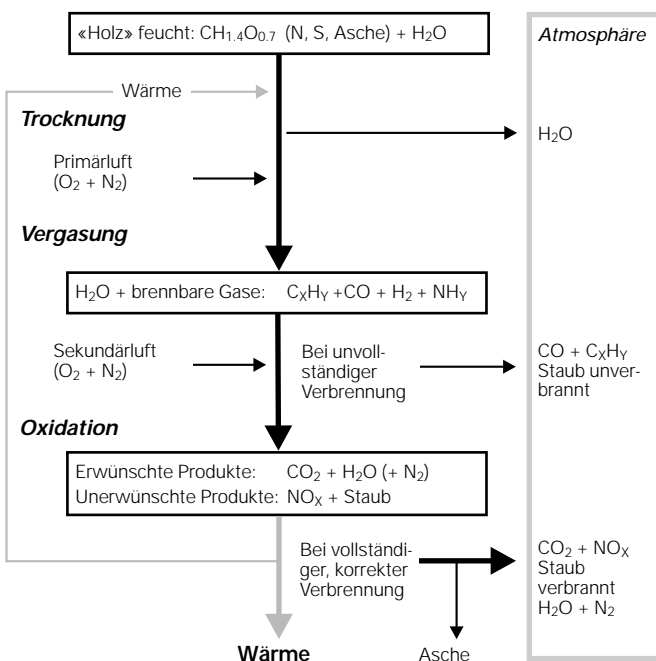


Bild 4
Abbrandverhalten von Holz über Trocknung, Vergasung mit Primärluft und Oxidation der Gase mit Sekundärluft. Nicht eingezeichnet ist der parallel zum Gasausbrand ablaufende Abbrand des Kohlenstoffs auf dem Rost mit Primärluft.

Substances polluantes

Comme pour tout processus de combustion, des substances polluantes peuvent également se dégager en brûlant du bois. La formation de substances polluantes dépend de la composition du combustible et des conditions de combustion. En optant pour une bonne installation de chauffage et en l'exploitant dans les règles de l'art – notamment en utilisant un combustible approprié –, il est possible de réduire les émissions polluantes à un strict minimum.

Le combustion du bois est un processus biétagé avec gazéification du bois dans une première phase, puis oxydation des gaz et du charbon de bois dans une deuxième phase (illustration 4). Conformément à ces deux processus partiels, les substances polluantes peuvent se subdiviser en un *premier groupe de substances polluantes provenant d'une combustion incomplète*, à savoir monoxyde de carbone, hydrocarbures, goudron et suie (poussière combustible), et un *deuxième groupe de substances polluantes provenant d'une combustion complète*, à savoir dioxyde de carbone, oxydes d'azote et particules de cendres (poussière incombustible). Etant donné les divers modes de formation des substances polluantes, il convient également de prendre différentes mesures pour les éviter:

- Il est possible d'éviter des substances polluantes provenant d'une combustion incomplète moyennant une gestion appropriée de cette dernière, ce qui nécessite une température élevée et un bon mélange des gaz avec l'air comburant. Avec des installations de chauffage à alimentation manuelle, il n'est possible d'atteindre une température suffisamment élevée qu'avec du bois sec, du bois humide se consommant en l'occurrence incomplètement. Avec de grandes installations automatiques dotées d'une chambre de combustion très chaude et fonctionnant avec un faible excédent d'air, il est également possible de brûler des combustibles à teneur élevée en eau.
- Il est nécessaire de pouvoir tabler sur une combustion complète pour réduire les émissions de particules. Dans de grandes installations, on utilise en outre des procédés de séparation de la poussière.
- L'émission de dioxyde de carbone est proportionnelle à la quantité de combustible convertie et dépend donc directement de l'énergie utilisable à préparer et du rendement de l'installation. Il est en l'occurrence possible de réduire les émissions de CO₂ en appliquant des mesures d'économie d'énergie et en améliorant le rendement de l'installation.
- Dans de grandes installations, il est possible de réduire dans une certaine mesure les émissions d'oxydes d'azote provenant de l'azote du combustible, mais pas de les éviter complètement. Dans des installations à alimentation manuelle, les émissions d'oxydes d'azote n'ont qu'une importance secondaire.

En brûlant du vieux bois ou des déchets de bois souillés, d'autres substances polluantes peuvent se former, et notamment de l'acide chlorhydrique (HCl) et des métaux lourds provenant de souillures du combustible. Dans des installations de chauffage alimentées avec du vieux bois, ces substances polluantes doivent être séparées par épuration des gaz effluents et les cendres doivent être éliminées dans les règles de l'art. Dans des installations de chauffage ordinaires, il est interdit de brûler du vieux bois ainsi que des déchets combustibles provoquant d'importantes émissions de dioxine. Dans les deux cas, il en résulte des émissions polluantes inadmissibles, une usure prématurée de l'installation et des résidus toxiques dans les cendres.

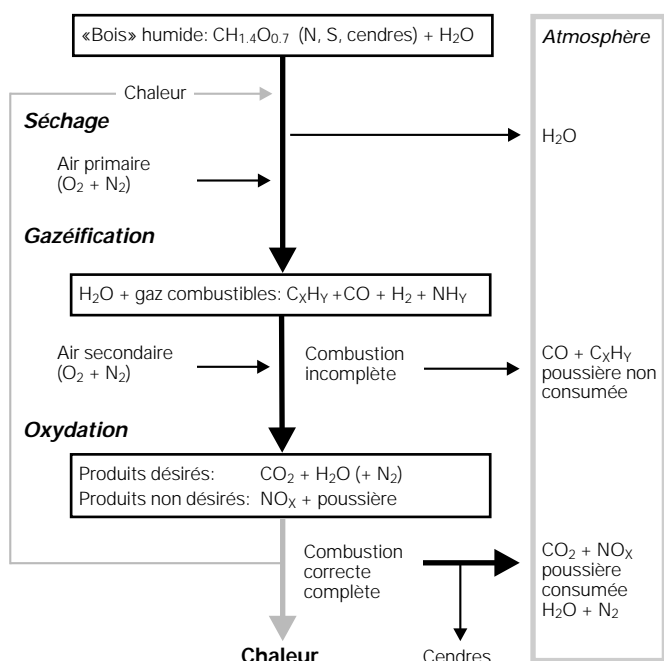


Illustration 4
Comportement du bois à la combustion lors des phases de séchage, de gazéification avec de l'air primaire et d'oxydation des gaz avec de l'air secondaire. La combustion du carbone sur la grille avec de l'air primaire, combustion qui se déroule parallèlement à la combustion des gaz, n'est pas indiquée ici.

Kohlenmonoxid und Einfluss der Verbrennungsluft

Das Verhältnis zwischen zugeführter Luft- und Brennstoffmenge, angegeben mit dem Luftüberschuss λ , ist eine wichtige Betriebsgrösse, die die Emissionen und den Wirkungsgrad beeinflusst. Für eine vollständige Verbrennung muss der Luftüberschuss grösser als eins sein, da sonst örtlich nicht genügend Sauerstoff für den Ausbrand zur Verfügung steht. Ist der Luftüberschuss jedoch sehr hoch (über 2 bis 3), so kann die Flamme durch die unnötig zugeführte Luft gekühlt werden und die Verbrennung infolge zu tiefer Temperatur unvollständig sein.

Da die Vermischung zwischen Brenngasen und Luft bei festen Brennstoffen schwieriger zu regeln ist als bei flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, werden Holzfeuerungen bei höherem Luftüberschuss betrieben als Öl- und Gasfeuerungen. Der Luftüberschuss beträgt typischerweise zwischen 1,5 und 2,5 und er beeinflusst die Verbrennungstemperatur. Bei Feuerungen mit guter Vermischung von Luft und Gasen ist ein Betrieb bei niedrigem Luftüberschuss und niedrigem CO-Gehalt möglich, während eine offene Feuerstelle mit einem sehr hohen Gesamtluftüberschuss betrieben wird.

Da sich die meisten unverbrannten Schadstoffe ähnlich verhalten wie das mengenmässig wichtigste Kohlenmonoxid, wird CO als Indikator der Ausbrandqualität verwendet. Das Verbrennungsverhalten von Feuerungsanlagen kann deshalb anschaulich beschrieben werden durch die Kennlinie im CO/Lambda-Diagramm (Abbildung 5). Am Beispiel eines Stückholzkessels (Kurve b) können darin drei verschiedene Bereiche wie folgt unterschieden werden:

1. Ein Bereich mit unvollständiger Verbrennung bei grossem Luftüberschuss und tiefer Verbrennungstemperatur, im Beispiel b) bei $\lambda > 2.5$.
2. Der Bereich $1.5 < \lambda < 2.5$: Mit sinkendem Luftüberschuss steigt die Verbrennungstemperatur. Da Luft und Gase noch ausreichend vermischt werden und immer noch Sauerstoff im Überschuss vorhanden ist, wird die Ausbrandqualität deutlich besser. Der Kohlenmonoxidgehalt nimmt in diesem Bereich mit zunehmender Temperatur ab infolge der durch die hohe Temperatur begünstigten Verbrennungsreaktionen.
3. Der Bereich $\lambda < 1.5$: Mit weiter sinkendem Luftüberschuss treten Zonen mit lokalem Sauerstoffmangel auf, die Verbrennungsqualität wird deshalb drastisch schlechter. Bis zu einer Luftüberschusszahl von 1 steigt die theoretische Verbrennungstemperatur weiter an. Die in einer realen Anlage erzielte Temperatur steigt ebenfalls an, jedoch wegen der unvollständigen Verbrennung weniger stark als die berechnete (adiabate) Temperatur. Die Kohlenmonoxidemissionen sind in diesem Bereich nicht Folge einer unzureichenden Temperatur, sondern der unzureichenden Vermischung von Verbrennungsluft und brennbaren Gasen. Aus diesem Grund ist ein Betrieb der Feuerung mit zu wenig Verbrennungsluft durch geeignete Einstellung oder Regelung zu verhindern.

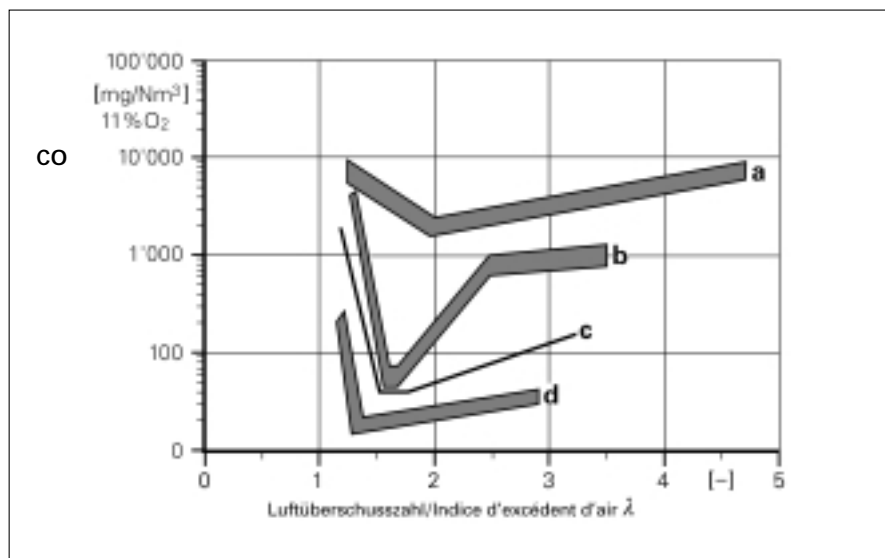


Abbildung 5
Kohlenmonoxidemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl (CO/Lambda-Diagramm) für verschiedene Feuerungstechniken

Monoxyde de carbone et influence de l'air de combustion

Exprimé par l'indice d'excédent d'air λ , le rapport entre la quantité d'air et la quantité de combustible est un important paramètre d'exploitation qui influence les émissions et le rendement. Pour que la combustion soit complète, l'excédent d'air doit être supérieur à un, sans quoi il peut exister des déficits localisés d'oxygène qui perturbent la combustion. Si l'excédent d'air est par contre très élevé (plus de 2 à 3), la flamme peut se refroidir par l'action de l'air excédentaire inutile et la combustion rester incomplète en raison d'une trop basse température.

Comme il est plus difficile de régler le mélange des gaz comburants et de l'air avec des combustibles solides qu'avec des combustibles liquides ou gazeux, les installations de chauffage au bois sont exploitées avec un excédent d'air plus élevé que des installations au mazout ou au gaz. L'excédent d'air s'établit typiquement entre 1,5 et 2,5; il influence bien entendu la température de combustion. Des installations de chauffage qui présentent un bon mélange d'air et de gaz comburants peuvent s'exploiter avec un faible excédent d'air et une faible teneur en CO, alors qu'un foyer ouvert s'exploite avec un excédent d'air extrêmement élevé.

Comme la plupart des substances polluantes non consommées se comportent à l'instar du monoxyde de carbone, substance quantitative-ment la plus importante, on se sert du CO comme indicateur de la qualité de la combustion. Le comportement d'installations de chauffage en matière de combustion peut donc se décrire d'une manière très claire par la ligne caractéristique tracée dans le diagramme CO/lambda (illustration 5). En prenant pour exemple une chaudière à bûches (courbe b), il est possible de distinguer les trois plages suivantes:

1. Plage de combustion incomplète avec important excédent d'air et basse température de combustion, dans exemple b) avec $\lambda > 2.5$.
2. Plage de $1.5 < \lambda < 2.5$. Lorsque l'excédent d'air diminue, la température de combustion augmente. Comme l'air et les gaz se mélangent bien et que l'on trouve toujours de l'oxygène en excédent, la qualité de la combustion est nettement meilleure. Dans cette plage, la teneur en monoxyde de carbone diminue lorsque la température augmente en raison des réactions de combustion favorisées par une température élevée.
3. Plage $\lambda < 1.5$. Lorsque l'excédent d'air continue de diminuer, il se produit des zones avec déficit localisé d'oxygène et la qualité de la combustion se dégrade considérablement. Jusqu'à un indice de combustion d'air de 1, la température théorique de combustion continue d'augmenter. La température atteinte dans une véritable installation augmente également, mais moins fortement que la température calculée (adiabatique) en raison de la combustion incomplète. Dans cette plage, les émissions de monoxyde de carbone ne résultent pas d'une température insuffisante, mais du mélange insuffisant de l'air de combustion et des gaz combustibles. C'est la raison pour laquelle il faut éviter d'exploiter l'installation avec une trop faible quantité d'air de combustion moyennant un réglage approprié.

Illustration 5
Emissions de monoxyde de carbone en fonction de l'indice d'excédent d'air (diagramme CO/lambda) pour différentes techniques de combustion

- a) Einfache handbeschickte Holzfeuerung
 - b) Stückholzkessel mit unterem Abbrand
 - c) Automatische Holzfeuerung mit Verbrennungstechnik Stand 1990
 - d) Automatische Holzfeuerung mit optimierter Verbrennungstechnik (ab 1995)
- a) Installation de chauffage au bois simple à alimentation manuelle
 - b) Chaudière à bûches à combustion inférieure
 - c) Installation automatique de chauffage au bois avec technique de combustion à l'état de l'année 1990
 - d) Installation automatique de chauffage au bois avec technique de combustion optimisée (dès 1995)

Stickoxide

Stickoxide (NO und NO₂ zusammengefasst als NO_x) stammen hauptsächlich aus Verbrennungsprozessen in Motoren und Feuerungen. Sie tragen zur Bildung von bodennahem Ozon und sauren Niederschlägen bei. Quelle des Stickstoffs in Verbrennungsprozessen sind der Stickstoff in der Luft sowie allenfalls im Brennstoff gebundener Stickstoff. Die wichtigsten Bildungswege sind:

1. *Thermische Stickoxide* entstehen bei hohen Temperaturen aus molekularem Stickstoff und Sauerstoff der Verbrennungsluft.
2. *Prompt-Stickoxide* werden in Kohlenwasserstoff-Flammen bei hoher Temperatur ebenfalls aus Luftstickstoff und Luftsauerstoff gebildet.
3. *Brennstoffstickoxide* entstehen beim Abbau stickstoffhaltiger Brennstoffe aus chemisch gebundenem Stickstoff.

Da Pflanzen Stickstoff in Form von Proteinen und Aminen enthalten, werden bei deren Verbrennung Stickoxide aus dem Brennstoffstickstoff gebildet. Die Stickoxidemissionen von Holzfeuerungen sind deshalb höher als bei modernen Öl- und Gasfeuerungen und sie sind vor allem vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs abhängig. Typische Werte bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz (Stickstoffgehalt 0,1–0,2 Gew.-%) betragen zwischen 100 und 250 mg/Nm³ (bei 11 Vol.-% O₂), während bei Restholz aus UF-Spanplatten (Stickstoffgehalt um 3 Gew.-%) mehr als doppelt so hohe Werte erreicht werden.

Zur NO_x-Minderung kommen sowohl Primärmassnahmen ohne Verwendung von Zusatzstoffen als auch Sekundärmassnahmen mit Einsatz eines Reduktionsmittels zum Einsatz. Die wichtigsten Primärmassnahmen sind Luftstufung und Brennstoffstufung. Dabei wird die Umwandlung des Brennstoffstickstoffs zu molekularem Stickstoff (N₂) durch eine unter Sauerstoffmangel betriebene Zone, in der die stickstoffhaltigen Zwischenprodukte reagieren, gefördert. Beide Verfahren setzen die Einhaltung einer unterstöchiometrischen Zugabe von Primärluft und einer guten Vermischung der Gase in der Reduktionszone voraus. Bei der Luftstufung ist zudem eine Temperatur von rund 1100 °C erforderlich zur Erzielung einer massgeblichen Stickoxidminderung.

Luftstufung kommt vor allem für Brennstoffe ohne ausgeprägte Verschlackungsneigung und für Anlagen ab etwa 100 kW zum Einsatz, während die Brennstoffstufung noch in der Entwicklung ist und eher für grössere Anlagen in Frage kommt. Sofern der Einsatz von Primärmassnahmen nicht möglich oder ihre Minderung nicht ausreichend ist, kommen als Sekundärmassnahmen das selektive nicht-katalytische sowie das selektive katalytische Reduktionsverfahren (SNCR, SCR) zum Einsatz. Bei beiden Verfahren erfolgt die NO_x-Minderung durch Eindüsung von Ammoniak oder Harnstofflösung. Für das SNCR-Verfahren, das für Anlagen ab 500 kW eingesetzt wird, ist die Einhaltung enger Temperaturgrenzen entscheidend. Im Weiteren besteht bei Verwendung von Harnstoff die Gefahr von Lachgasbildung. Der Einsatz des SCR-Verfahrens, das die höchste Abscheidung erzielt, ist aus Kostengründen auf besondere Anwendungen und grössere Anlagen beschränkt.

Staubemissionen

Feinstäube und Aerosole aus Verbrennungsprozessen entstehen als Produkte einer unvollständigen Umsetzung des Brennstoffs und als Flugaschepartikel aus den mineralischen Bestandteilen. Die *Aerosole aus unvollständiger Verbrennung* umfassen unverbrannte Holzbestandteile und Holzkohle, kohlenstoffhaltige Zersetzungsprodukte sowie Russ und polyaromatische Kohlenwasserstoffe, die in der Flamme entstehen können. Unter schlechten Verbrennungsbedingungen können in Holzfeuerungen erhebliche Mengen an unverbrannten Aerosolen emittiert werden. Vor allem ältere Untersuchungen an einfachen Öfen und offenen Kaminen zeigten grosse Mengen an Aerosolen aus unvollständiger Verbrennung auf, die über 100 mg/Nm³ (bei 11 Vol.-% O₂) und bis über 90 % der Gesamtemission ausmachen können. Gleichzeitig zeigen neuere Untersuchungen, dass die Partikelemissionen bei gut betriebenen automatischen Holzfeuerungen hauptsächlich auf Aschebestandteile zurückzuführen sind. Die Kohlenstoffgehalte der Partikelemissionen betragen hier in der Regel zwischen 11 Gew.-% und 10 Gew.-% bei Gesamtemissionen unter 150 mg/Nm³.

Aerosole aus vollständiger Verbrennung umfassen Verbindungen aus der Holzasche (z.B. CaO, Al₂O₃, SiO₂, KCl, K₂SO₄, Nitrate), schwerflüchtige Verunreinigungen aus Sand und Erde sowie bei Altholz und bei gewissen Sortimenten von Restholz Schwermetalle.

Auf den Oberflächen von Partikeln können unverbrannte Kohlenwasserstoffe angelagert sein, weshalb insbesondere die lungengängigen Aerosole mit Korngrössen unter 1 µm toxikologisch relevant sind. Der Hauptteil der Stäube aus Holzfeuerungen weist Korngrössen zwischen 0,05 µm und 0,2 µm auf und liegt somit im Grössenbereich unter 1 µm, in dem eine Abscheidung mit Trägheitsentstaubern praktisch wirkungslos ist.

Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO et NO₂ réunis sous forme de NO_x) proviennent principalement des processus de combustion propres aux moteurs et aux installations de chauffage. Ils contribuent à la formation d'ozone près du sol ainsi qu'au phénomène des pluies acides. Dans un processus de combustion, l'azote trouve sa source dans l'atmosphère et parfois aussi dans l'azote lié au combustible. Les principaux mode de formation sont les suivants:

1. Les oxydes d'azote thermiques sont générés à de hautes températures à partir de l'azote moléculaire et de l'air de combustion.
2. Les oxydes d'azote prompts sont également générés à de hautes températures dans les flammes d'hydrocarbures à partir de l'azote et de l'oxygène de l'air.
3. Les oxydes d'azote du fait du combustible sont générés à partir de l'azote lié chimiquement lors de la décomposition de combustibles contenant de l'azote.

Comme les plantes contiennent de l'azote sous forme de protéines et d'amines, des oxydes d'azote sont générés lors de leur combustion à partir de l'azote du combustible. Les émissions d'oxydes d'azote par des installations de chauffage au bois sont donc plus importantes que celles produites par des installations de chauffage modernes au mazout et au gaz; elles dépendent surtout de la teneur en azote du combustible. Les valeurs caractéristiques relatives à la combustion de bois à l'état naturel (teneur en azote de 0.1 à 0.2 % du poids) se situent entre 100 et 250 mg/Nm³ (pour 11 % en volume O₂), alors que l'on parvient à des valeurs plus que doublées pour la combustion de déchets de panneaux de particules UF (teneur en azote de l'ordre de 3 % du poids).

Pour atténuer la formation de NO_x, on utilise aussi bien des mesures primaires sans employer des additifs que des mesures secondaires assorties de l'emploi d'un agent de réduction. Les principales mesures primaires résident dans l'étagement de l'air et du combustible. En l'occurrence, la conversion de l'azote du combustible en azote moléculaire (N₂) est favorisée par une zone déficitaire en oxygène dans laquelle les produits intermédiaires nitrés et nitreux réagissent. Les deux processus présupposent le respect d'une adjonction sous-stoechiométrique d'air primaire et un bon mélange des gaz dans la zone de réduction. En ce qui concerne l'étagement de l'air, il est en outre indispensable de travailler avec une température de l'ordre de 1100 °C pour parvenir à une diminution sensible des oxydes d'azote.

L'étagement de l'air s'utilise surtout pour des combustibles sans tendance marquée à la scorification et des installations à partir d'environ 100 kW, alors que l'étagement du combustible est encore en phase de développement et s'applique plutôt à des installations encore plus puissantes. Si l'application de mesures primaires n'est pas possible ou reste insuffisante, on applique des mesures secondaires sous la forme d'un processus de réduction sélectif non-catalytique ou catalytique (SNCR, SCR). Avec les deux processus, la réduction de NO_x s'opère par injection d'ammoniac ou d'une solution d'urée. Avec le processus SNCR qui s'utilise pour des installations à partir de 500 kW, le respect de limites de température plus étroites est déterminant. En utilisant de l'urée, il existe en outre un risque de formation de gaz hilarant. Pour des raisons de coût, l'utilisation du processus SCR garantissant une précipitation maximale est réservée à des applications particulières et de très grosses installations.

Emissions de poussière

Le processus de combustion génère des poussières fines et des *aérosols*, produits d'une conversion incomplète du combustible ainsi que particules de cendres volantes provenant d'éléments constitutifs minéraux. Les aérosols provenant d'une combustion incomplète comprennent des éléments constitutifs ligneux non consommés, du charbon de bois, des produits de décomposition carbonés ainsi que de la suie et des hydrocarbures polyaromatiques qui peuvent se former dans la flamme. Avec de mauvaises conditions de combustion, une installation de chauffage au bois peut dégager des quantités considérables d'aérosols non consommés. D'anciens essais effectués sur des poêles simples et des foyers de cheminée ouverts ont notamment révélé d'importantes quantités d'aérosols provenant d'une combustion incomplète, aérosols qui peuvent se chiffrer à plus de 100 mg/Nm³ (pour 11 % en volume O₂) et jusqu'à plus de 90 % des émissions totales. Simultanément, des essais récents font ressortir que les émissions de particules produites par des installations automatiques de chauffage au bois bien réglées sont principalement imputables à des éléments constitutifs cendreux. En règle générale, la teneur en carbone des émissions de particules se situe en l'occurrence entre 1 à 10 % du poids pour des émissions globales inférieures à 150 mg/Nm³.

Les aérosols provenant d'une combustion complète comprennent des composés provenant de cendres de bois (par exemple CaO, Al₂O₃, SiO₂, KCl, K₂SO₄, nitrates), des corps étrangers peu volatils sableux et terreux ainsi que du vieux bois et certaines variétés de déchets contenant des métaux lourds.

Des hydrocarbures non consommés peuvent se déposer à la surface des particules, raison pour laquelle les aérosols d'un calibre inférieur à 1 µm et capables de parvenir jusqu'aux poumons sont toxicologiquement dangereux. La majeure partie des poussières produites par une installation de chauffage au bois présente un calibre compris entre 0,05 µm et 0,2 µm, se situant ainsi dans la plage inférieure à 1 µm où une précipitation par des dépoussiéreurs inertiels est pratiquement inefficace.

Anforderungen für vollständigen Ausbrand

Aus dem Abbrandverhalten ergeben sich folgende Anforderungen für einen vollständigen Ausbrand:

- Da Holz einen hohen Flüchtigengehalt aufweist und die Gase und der feste Kohlenstoff getrennt verbrennen, wird die Verbrennungsluft in Primär- und Sekundärluft aufgeteilt. Die Primärluft wird für die Vergasung benötigt, während die Sekundärluft den Ausbrand der Gase unterstützt. Eine Auftrennung der Verbrennungsluft ermöglicht auch eine verbesserte Regelung, indem die Primärluft vor allem die Leistung beeinflusst und die Sekundärluft den Ausbrand der Gase sicherstellt.
- Für eine vollständige Verbrennung ist die Zufuhr von Sauerstoff im Überschuss erforderlich. Bei modernen Holzfeuerungen liegt der optimale Luftüberschuss in der Regel im Bereich von 1,4 bis 1,8. Wenn der Luftüberschuss unter den optimalen Wert sinkt, führen Zonen mit Sauerstoffmangel zu einem Anstieg der Emissionen. Bei zu grossem Luftüberschuss sinkt die Verbrennungstemperatur ab und die Flamme wird durch die Sekundärluft gekühlt, gleichzeitig wird der Wirkungsgrad vermindert. Da der Luftüberschuss eine sensitive Grösse für die Emissionen ist, verfügen moderne Feuerungsanlagen über Regelsysteme, die einen Betrieb bei optimalem Brennstoff/Luft-Verhältnis gewährleisten. Zum Einsatz kommen Regelungen mittels Messung von Temperatur, CO, Lambda bzw. O₂ sowie von Kombinationen dieser Grössen.
- Durch die hohe Zähigkeit der Gase im Feuerraum (heisse Gase haben eine höhere Zähigkeit als kalte) wird die Vermischung von brennbaren Gasen und Sekundärluft erschwert. Die Ausbrandqualität in Holzfeuerungen ist deshalb in den meisten Fällen durch die Vermischung limitiert, während die Verbrennung in der Gasphase bei Temperaturen über 850 °C sehr rasch (im Bereich von Millisekunden) abläuft. Um einen vollständigen Ausbrand zu erzielen, muss die Sekundärluft möglichst gut mit den brennbaren Gasen vermischt werden. Massnahmen dazu sind hohe Einströmgeschwindigkeiten und Vermischungseinrichtungen im Feuerraum.
- Für eine vollständige Verbrennung sind eine genügend hohe Temperatur und eine ausreichende Verweilzeit der Gase in der heissen Zone erforderlich. Als Richtwerte gelten eine Verweilzeit von rund 0,5 Sekunden bei einer Temperatur von mindestens 850 °C. Nebst der Einhaltung einer mittleren Flammentemperatur ist auch darauf zu achten, dass die Flamme nicht an kalten Wänden oder durch lokal zu grosse Luftmengen abgekühlt wird. In automatischen Feuerungen werden in der Regel ausreichend hohe Temperaturen gewährleistet. In Kleinanlagen schränkt die Forderung nach hoher Temperatur dagegen den Einsatz von feuchten Brennstoffen ein. Die Verweilzeit der Gase in der heissen Zone ist nicht nur von der Grösse der Brennkammer, sondern auch von deren Gestaltung abhängig: Eine grosse Brennkammer nutzt nichts, wenn sie einseitig durchströmt wird.

Zusammengefasst müssen für einen vollständigen Ausbrand die Bedingungen Verweilzeit, Temperatur, Mischung und Sauerstoffangebot erfüllt sein. Sofern genügend Verbrennungsluft zugeführt wird – also bei sachgerechtem Betrieb –, ist die Ausbrandqualität meistens durch die Mischung limitiert. In den vergangenen Jahren wurde die Technik jedoch laufend verbessert und dabei auch die Mischung zwischen Verbrennungsluft und Gasen optimiert. Dies hat dazu beigetragen, dass heutige Feuerungen im Vergleich zu früheren um bis zu einem Faktor zehn tiefere Kohlenmonoxidemissionen aufweisen und bei korrektem Betrieb nicht zu Geruchsbelästigung führen. In modernen Holzfeuerungen sind die erwähnten Bedingungen somit weitgehend berücksichtigt. Um einen emissionsarmen Betrieb mit hohem Wirkungsgrad zu gewährleisten, muss jedoch auch ein der Feuerung angepasster Brennstoff verwendet und die Anlage korrekt eingestellt werden.

Moderne und sachgerecht betriebene Holzfeuerungen sind damit emissionsarm und sie können durch die Verwertung des nachwachsenden Energieträgers Holz zu einer Verminderung des Treibhauseffekts beitragen.

Exigences requises pour une combustion intégrale

En se basant sur le comportement à la combustion, on peut affirmer que les exigences suivantes sont requises pour garantir une combustion complète:

- Comme le bois présente une teneur élevée en substances volatiles et comme les gaz et le carbone solide se consomment séparément, l'air de combustion se subdivise en air primaire et air secondaire. L'air primaire est utilisé pour la gazéification, alors que l'air secondaire favorise la combustion des gaz. Une dissociation de l'air de combustion permet d'améliorer le réglage de l'installation en ce sens que l'air primaire influence surtout la puissance, alors que l'air secondaire assure la combustion des gaz.
- Pour garantir une combustion complète, il est indispensable de réaliser un apport excédentaire d'oxygène. Avec des installations modernes de chauffage au bois, l'excédent d'air optimal se situe généralement dans une plage de 1,4 à 1,8. Si l'excédent d'air est inférieur à la valeur optimale, des zones déficitaires en oxygène entraînent une augmentation des émissions polluantes. Si l'excédent d'air est trop important, la température de combustion diminue et la flamme est refroidie par l'air secondaire, ce qui a pour effet de réduire le rendement de l'installation. Comme l'excédent d'air est une grandeur sensitive relativement aux émissions, les installations de chauffage modernes disposent de systèmes de régulation qui garantissent une exploitation optimale moyennant un rapport combustible/air optimisé. Les systèmes de régulation se basent en l'occurrence sur la mesure de la température, du CO, du lambda ou de l'O₂ ainsi que des combinaisons de ces grandeurs.
- Etant donné la densité élevée des gaz dans le foyer (des gaz chauds ont une densité plus élevée que des gaz froids), le mélange des gaz combustibles et de l'air secondaire est rendu plus difficile. Dans la plupart des cas, la qualité de la combustion d'une installation de chauffage est donc limitée par le mélange, alors que la combustion en phase gazeuse s'opère très rapidement (en quelques millisecondes) à des températures supérieures à 850 °C. Pour parvenir à une combustion complète, l'air secondaire doit se mélanger le mieux possible aux gaz combustibles. Dans ce contexte, on prendra des mesures pour garantir des vitesses d'écoulement élevées et des dispositifs de mélange appropriés dans le foyer.
- Pour garantir une combustion complète, il est nécessaire de pouvoir compter sur une température suffisamment élevée et un temps de séjour suffisamment long des gaz dans la zone chaude. Comme valeurs indicatives, on tablera sur un temps de séjour de l'ordre de 0,5 seconde pour une température minimale de 850 °C. Outre le respect d'une température moyenne minimale de la flamme, on veillera à ce que la flamme ne se refroidisse pas sous l'action de parois froides ou de trop grandes quantités localisées d'air. Des installations automatiques de chauffage au bois garantissent généralement des températures suffisamment élevées. Dans de petites installations, la température élevée requise limite par contre l'utilisation de combustibles humides. Le temps de séjour des gaz dans la zone chaude dépend non seulement de la grandeur de la chambre de combustion, mais aussi de son architecture; une chambre de combustion volumineuse ne sert à rien si le courant ou l'écoulement s'opère unilatéralement.

Pour résumer les choses, une combustion complète présuppose de répondre à différentes conditions en matière de temps de séjour, température, mélange et apport en oxygène. Tant que l'apport d'air de combustion est suffisant - ce qui signifie que l'exploitation obéit aux règles de l'art -, la qualité de la combustion est limitée par le paramètre du mélange. Au cours de ces dernières années, on a toutefois constamment amélioré la technique et optimisé le mélange d'air de combustion et de gaz. Comparativement à d'anciennes installations, il en résulte que des installations modernes présentent un facteur d'émissions de monoxyde de carbone jusqu'à 10 fois inférieur et ne provoquent pas de nuisance olfactive si leur exploitation est correcte. Avec des installations modernes de chauffage au bois, ces paramètres sont très largement pris en compte. Pour garantir une exploitation à émissions réduites assortie d'un rendement élevé, il faut cependant aussi utiliser un combustible approprié et régler correctement l'installation.

Des installations de chauffage au bois modernes et correctement exploitées sont peu polluantes; en utilisant du bois comme vecteur énergétique renouvelable, elles peuvent contribuer à réduire l'effet de serre.

Literatur/bibliographie

Biollaz, S.:

Messen des Verweilzeitspektrums in der Nachbrennkammer von Holzfeuerungen zur Modellierung der Kohlenmonoxid-Oxidation, Diss. ETH 12383, Zürich 1997

Good, J:

Verbrennungsregelung bei automatischen Holzfeuerungen, Diss. ETH 9771, Zürich 1992

Kaufmann, H., und Nussbaumer, Th.:

Characteristics and Formation of Fly Ash Particles in Biomass Furnaces. Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, June 8–11 1998, Würzburg, 1326–1329

Marutzky, R.:

Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten, WKI-Bericht Nr. 26, Braunschweig 1991

Nussbaumer, Th., und Hasler, P.:

Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen, Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999) 13–22

Nussbaumer, Th.:

Primär- und Sekundärmassnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen, Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen, Springer-VDI, Düsseldorf 1997, 279–308

Nussbaumer, Th.:

Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Diss. ETH 8838, Zürich 1989

Nussbaumer, Th.:

Stickoxide bei der Holzverbrennung, Heizung Klima, 12 1988, 51–62

Nussbaumer Th.; Good, J.; Jenni, A.; Koch P.:

Projektieren automatischer Holzfeuerungen, Pacer, EDMZ Nr. 724.237 d, Bern 1995, 191 S. (auch in F und I erhältlich)

Nussbaumer Th.; Good, J.; Jenni, A.; Koch P.:

Etudes et projets de chauffage automatique au bois, Pacer, EDMZ Nr. 724.237 f, Berne 1995, 200 p.

Nussbaumer Th.; Good, J.; Jenni, A.; Koch P.:

La progettazione di impianti automatici di combustione a legna, Pacer, EDMZ Nr. 724.237 i, Bern 1995, 198 p.

Nussbaumer, Th.; Good, J.; Jenni, A.; Bühler, R.:

Planung automatischer Holzfeuerungen, Bundesamt für Energie und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000

Nussbaumer, Th.; Neuenschwander, P.; Hasler, Ph.; Bühler, R.;

Jenni, A.:

Energie aus Holz – Vergleich der Verfahren zur Produktion von Wärme, Strom und Treibstoffen aus Holz, Bundesamt für Energie, Bern 1997

Bildquellen

1 bis 5: Verenum

Source des illustrations

1 à 5: Verenum