

## Holzenergie

Thomas Nussbaumer, PD Dr. sc. techn.  
Hochschule Luzern – Technik & Architektur  
Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zürich

## Energie-bois

Thomas Nussbaumer, privat-docent, Dr. sc. techn.  
Haute Ecole Spécialisée de Lucerne – ingénierie et architecture  
Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zurich

### Teil 4: Automatische Holzheizungen

1	Bauarten und Einsatzgebiete	2
2	Feuerungssysteme	4
3	Regelung und Betrieb	9
4	Emissionen	11
5	Feinstaubabscheidung	12
6	Wirtschaftlichkeit	13
7	Anwendungsbeispiele	14
7.1	Siedlung Chienbergreben in Gelterkinden	14
7.2	Nahwärmeverbund Bülach	14
8	Ausblick	15
9	Literatur	16

### Partie 4: installations automatiques de chauffage au bois

1	Types et domaines d'application	2
2	Systèmes de combustion	4
3	Régulation et exploitation	9
4	Emissions polluantes	11
5	Séparation des poussières fines	12
6	Rentabilité	13
7	Exemples d'application	14
7.1	Cité Chienbergreben à Gelterkinden	14
7.2	Réseau de chauffage à distance de Bülach	14
8	Perspectives	15
9	Bibliographie	16

### Teil 4: Automatische Holzheizungen

Automatische Holzfeuerungen werden in einem breiten Leistungsspektrum angeboten. Die Techniken reichen von automatischen Holz-schnitzelfeuerungen zur Beheizung grösserer Gebäude bis zu mit Holz befeuerten Dampfkesselanlagen in Kraftwerken. Die häufigsten Anwendungen in der Schweiz umfassen Anlagen im mittleren Leistungsbereich zwischen 200 kW und 5 MW, wobei als Brennstoff sowohl Waldhackschnitzel als auch Restholz aus der Holzverarbeitung eingesetzt werden.

### Partie 4: installations automatiques de chauffage au bois

Des installations automatiques de chauffage au bois sont proposées dans une très large gamme de puissance. Les techniques vont de l'installation automatique à plaquettes de bois pour le chauffage d'un seul immeuble à la chaudière à bois de force motrice. En Suisse, les applications les plus fréquentes se situent dans une plage de puissance moyenne comprise entre 200 kW et 5 MW, le combustible utilisé pouvant consister aussi bien en des plaquettes de bois d'origine forestière qu'en des sous-produits de l'industrie de transformation du bois.

# 1 Bauarten und Einsatzgebiete

Die Feuerungsanlagen können aufgrund der Strömungsart unterteilt werden in Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromverfahren (Bild 1, [1]). Bei geringer Anströmgeschwindigkeit wird der Brennstoff langsam von Luft durchströmt, ohne dass dadurch das Brennstoffbett merklich aufgelockert wird. Dieser Zustand stellt sich in einer Unterschub- oder Rostfeuerung ein und wird als Festbett oder auch als Bewegtbett bezeichnet. Bei noch weiterer Erhöhung der Gasgeschwindigkeit werden die Brennstoffpartikel aufgelockert und angehoben, bis sie in einer stationären Wirbelschicht durch die Luftströmung in Schwebelage gehalten werden und ein ähnliches Strömungsbild wie eine brodelnde Flüssigkeit aufweisen. Bei noch weiterer Erhöhung der Gasgeschwindigkeit erfolgt ein Austrag von Bettmaterial und Brennstoff aus dem Brennraum, so dass eine Abscheidung und Rückführung der Partikel erforderlich ist. Ein solches System wird als zirkulierende Wirbelschicht bezeichnet. Wenn der Brennstoff zerkleinert und mit dem Gasstrom eingeblasen wird, findet die Verbrennung im Flugstrom statt. Entsprechende Feuerungen werden auch als Staubfeuerung bezeichnet.

Tabelle 1 zeigt die Einsatzgebiete für die verschiedenen Bauarten von automatischen Holzfeuerungen. Im mittleren Leistungsbereich kommen vor allem Unterschubfeuerungen mit einer Verbrennungsretorte sowie Rostfeuerungen mit einem bewegten Vorschubrost zum Einsatz. Daneben existieren auch zahlreiche Sonderbauarten sowie Feuerungen, welche die Merkmale von Unterschub- und Rostfeuerungen verbinden, also Unterschubfeuerungen mit nachgeschaltetem Rost oder Rostfeuerungen mit Unterschubbeschickung. Wirbelschicht- und Staubfeuerungen sind betrieblich aufwändiger und kommen vor allem für grössere Leistungen von meist deutlich über 5 MW zum Einsatz. Für die Auswahl der geeigneten Holzfeuerung ist die Kenntnis des Energieholzsortiments entscheidend. Die entsprechenden Kriterien umfassen den Wassergehalt, den Aschegehalt, die Korngrösse sowie den Anteil an Überlängen, Feinanteil und Rinde.

# 1 Types et domaines d'application

En fonction du type de soufflage ou d'écoulement, les installations de chauffage peuvent se subdiviser en installations à lit fixe, installations à lit fluidisé et installations à courant aérien (figure 1, [1]). Avec une faible vitesse de soufflage, l'air comburant circule sur le combustible sans carboniser sensiblement le lit de combustible. Cet état s'établit dans une installation à poussée inférieure ou grille avec spécification de lit fixe ou mobile. En augmentant la vitesse de soufflage, les particules de combustible sont dispersées et soulevées jusqu'à ce qu'elles puissent rester en suspension pour autant que le lit fluidisé soit stationnaire et qu'elles présentent une allure d'écoulement similaire à celle d'un fluide en ébullition. En majorant encore la vitesse des gaz, il se produit une distribution du matériau du lit et du combustible, de sorte qu'une séparation et un retour des particules libérées sont nécessaires. Un système pareil est qualifié de lit fluidisé à circulation. Si le combustible est fractionné et entraîné avec le flux de gaz, la combustion se déroule dans le flux d'air. De telles installations sont également qualifiées d'installations de chauffage à charbon pulvérisé.

Le tableau 1 présente les domaines d'application de différents types d'installations automatiques de chauffage au bois. Dans la plage de puissance moyenne, on utilise surtout des installations à poussée inférieure avec corne de combustion ainsi que des installations à grille d'alimentation mobile. Il existe en outre de nombreux types spéciaux qui allient les caractéristiques des installations à poussée inférieure et des installations à grille, c'est-à-dire fourneau à poussée inférieure avec grille en aval ou fourneau à grille avec alimentation inférieure. Les installations à lit fluidisé ainsi que les installations à charbon pulvérisé sont plus compliquées à exploiter et s'utilisent surtout pour de grosses puissances généralement supérieures à 5 MW. Le type de bois d'énergie disponible revêt une importance capitale quant à la sélection de l'installation automatique de chauffage qui convient. Les critères essentiels incluent la teneur en eau, la teneur en cendres, le calibre des éléments ainsi que la proportion de surlongueurs, écorces et parties fines.

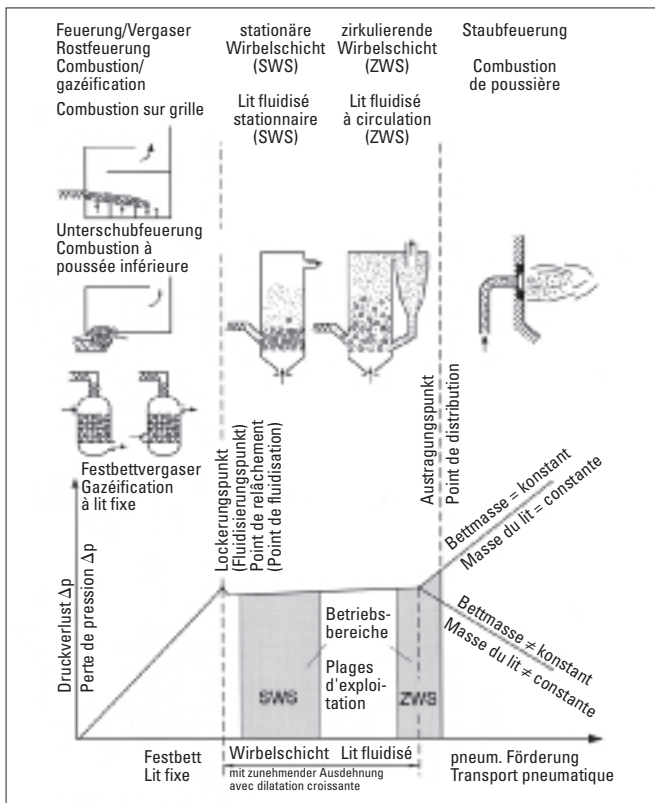


Bild 1 / figure 1

Einteilung der Feuerungssysteme mit zunehmender Gasgeschwindigkeit: Festbett, stationäre Wirbelschicht, zirkulierende Wirbelschicht und Flugstromreaktor (Staubfeuerung).

Classification des systèmes de combustion avec vitesse croissante des gaz: lit fixe, lit fluidisé stationnaire, lit fluidisé à circulation et réacteur à courant aérien (combustion de poussière).

Tabelle 1

Kenngrossen der wichtigsten Bauarten von Holzfeuerungen.  
a = Aschegehalt, D = Brennstoffkerngrösse

Typ	Typischer Leistungsbereich	Brennstoffe	Wassergehalt
Unterschubfeuerung	100 kW–2,5 MW	Waldhackschnitzel Restholzschnitzel mit a < 1%	5%–45%
Vorschubrostfeuerung	200 kW–50 MW	Alle Holzbrennstoffe, a bis < 50%	5%–55%
Vorfeuerung	100 kW–1,5 MW	Trockene Restholzschnitzel, a bis < 5%	5%–35%
Unterschubfeuerung mit rotierendem Rost	3 MW–20 MW	Waldhackschnitzel mit hohem Wassergehalt, a bis < 5%	40%–60%
Stationäre Wirbelschichtfeuerung	5 MW–100 MW	D < 10 mm	5%–60%
Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung	15 MW–100 MW	D < 10 mm	5%–60%
Staubeinblasfeuerung	5 MW–10 MW	D < 5 mm	< 20%
Holzstaubbrenner in Kohlekraftwerken	total 100 MW–1 GW Holz max. 10%	Holz: D < 2–4 mm, Stroh < 6 mm, Miscanthus < 4 mm	< 20%

Tableau 1

Paramètres caractéristiques des principaux types d'installations de chauffage au bois. a = teneur en cendres, D = calibre des éléments de combustible.

Type	Plage de puissance	Combustibles	Teneur en eau
Chaudière à poussée inférieure	100 kW–2,5 MW	plaquettes de bois d'origine forestière et déchets ligneux avec a < 1%	5%–45%
Chaudière à grille mobile	200 kW–50 MW	tous les combustibles ligneux, a jusqu'à < 50%	5%–55%
Chaudière préliminaire	100 kW–1,5 MW	plaquettes de déchets ligneux secs, a jusqu'à < 5%	5%–35%
Chaudière à poussée inférieure avec grille rotative	3 MW–20 MW	plaquettes de bois déchiqueté d'origine forestière à teneur élevée en eau, a jusqu'à < 5%	40%–60%
Chaudière à lit fluidisé stationnaire	5 MW–100 MW	D < 10 mm	5%–60%
Chaudière à lit fluidisé à circulation	15 MW–100 MW	D < 10 mm	5%–60%
Fourneau à injection de poussière	5 MW–10 MW	D < 5 mm	< 20%
Brûleur de poussière pour centrales à charbon	total 100 MW–1 GW bois max. 10%	bois D < 2–4 mm, paille < 6 mm, miscanthus < 4 mm	< 20%

## 2 Feuerungssysteme

### Unterschubfeuerung

Bei einer Unterschubfeuerung wird der Brennstoff mit einem Schneckenförderer von unten in eine Feuermulde (Retorte) eingeschoben (Bild 2). Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft in die Retorte eingeblasen. Dort erfolgen die Trocknung und Vergasung des Brennstoffs sowie der Abbrand der Holzkohle. Um die brennbaren Gase vollständig zu oxidieren, wird vor dem Eintritt in die heisse Nachbrennkammer Sekundärluft zugegeben und mit den brennbaren Gasen vermischt. Anschliessend erfolgt die Wärmeabgabe der Abgase im Wärmeübertrager und die Grobentstaubung in einem Zyklon. In Unterschubfeuerungen werden Holzschnitzel und ähnliche Holz Brennstoffe mit einem Wassergehalt von 5 bis 50% verfeuert, wobei die Gestaltung von Feuerraum und Nachbrennkammer dem Wassergehalt angepasst werden müssen. Unterschubfeuerungen werden meist im Leistungsbereich zwischen 100 kW und 2,5 MW eingesetzt.

### Vorschubrostfeuerung

Bei Vorschubrostfeuerungen wird der Brennstoff mit einem Förderagregat in Form eines Schneckenförderers oder eines pneumatischen Stössels auf den Rost geschoben und durch Bewegung der Rostelemente weiterbefördert (Bild 3). Am Rostende erfolgt die Entaschung. Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft durch den Rost zugeführt. Auf der ersten Zone des Rostes erfolgt die Trocknung des Brennstoffs, im mittleren Bereich (der Hauptverbrennungszone) die Vergasung des Holzes und im letzten Bereich der Ausbrand der Holzkohle. Die Rostfeuerung ermöglicht eine Anpassung an das Abbrandverhalten des Brennstoffs, indem bei grösseren Anlagen die Primärluft in verschiedenen Rostzonen zugeführt wird. Die Sekundärluft wird über dem Rost mit den brennbaren Gasen vermischt für den Ausbrand in der nachfolgenden Brennkammer.

Der Rost erfüllt die Funktionen des Transports sowie des Schürens und Umwälzens zur Homogenisierung des Brennstoffbetts und zur Verbesserung des Luftdurchtritts. Wichtig für einen guten Betrieb ist die Erzielung einer gleichmässig verteilten und durchströmten Brennstoffschüttung auf dem Rost. Es gibt verschiedene Rosttypen, die sich vor allem durch die Neigung (horizontal/geneigt) und die Bewegungsart unterscheiden. Nebst den häufigsten Vorschubrost- oder Treppenrostfeuerungen kommen Wanderrost-, Rückschubrost-, Vor-/Rückschubrost- und Walzenrostfeuerungen zum Einsatz. Dank der mechanischen Entaschung auch größerer Stücke sind Rostfeuerungen für asche-

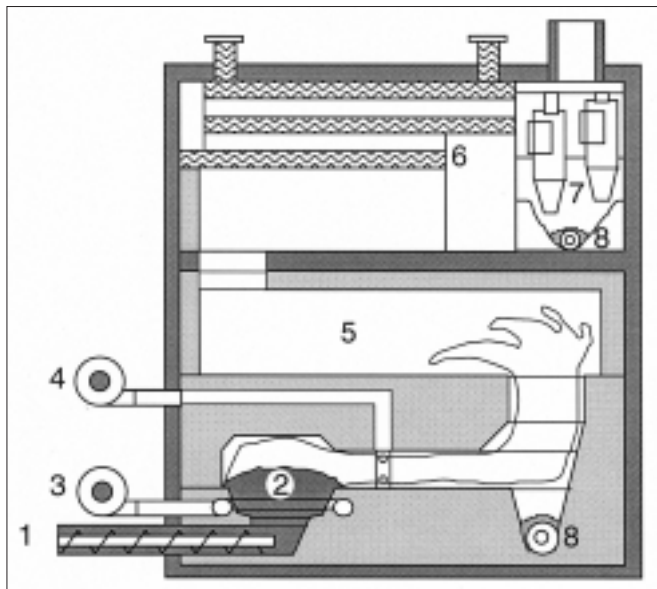


Bild 2 / figure 2

Unterschubfeuerung.

1 Brennstoffzuführung, 2 Verbrennungsretorte, 3 Primärluft, 4 Sekundärluft, 5 Brennkammer, 6 Wärmeübertrager, 7 Zyklon, 8 Ascheabstrahlung

Installation de chauffage à poussée inférieure

1 Alimentation en combustible, 2 Cornue de combustion, 3 Air primaire, 4 Air secondaire, 5 Chambre de combustion, 6 Thermoconducteur, 7 Cyclone, 8 Evacuation des cendres

## 2 Systèmes de combustion

### Installation de chauffage à poussée inférieure

Avec une installation de chauffage à poussée inférieure, le combustible est introduit par le bas dans la cornue de combustion au moyen d'un convoyeur à vis sans fin (figure 2). Une partie de l'air comburant est insufflée dans la cornue sous forme d'air primaire. Le séchage et la gazéification du combustible ainsi que la combustion du charbon de bois s'opèrent dans la cornue. Pour oxyder intégralement les gaz combustibles, on leur additionne de l'air secondaire avant leur entrée dans la chambre de postcombustion. Ensuite interviennent l'émission de chaleur par les gaz brûlés dans le thermoconducteur et un dépeussierage dans un cyclone. Dans des installations de chauffage à poussée inférieure, on brûle des plaquettes de bois et combustibles ligneux similaires avec teneur en eau de 5 à 50% en adaptant la configuration du foyer et de la chambre de postcombustion à la teneur en eau. Les installations de chauffage à poussée inférieure travaillent généralement dans une plage de puissance comprise entre 100 kW et 2,5 MW.

### Installations de chauffage à grille mobile

Avec des installations de chauffage à grille mobile, le combustible est poussé sur la grille par un mécanisme consistant en un convoyeur à vis sans fin ou un poussoir pneumatique, puis il continue d'avancer par l'action des mouvements des éléments de la grille (figure 3). L'évacuation des cendres s'effectue à l'extrémité de la grille. Une partie de l'air comburant est introduite sous forme d'air primaire à travers la grille. Le séchage du combustible s'opère sur la première zone de la grille, la gazéification du bois sur la zone médiane (zone de combustion principale) et la combustion du charbon de bois sur la dernière zone. La combustion sur une grille permet d'adapter celle-ci au comportement du combustible, l'air primaire étant introduit dans différentes zones de la grille avec de grosses installations. L'air secondaire est mélangé aux gaz combustibles par l'intermédiaire de la grille pour combustion dans la chambre suivante.

La grille assure les fonctions de transport, d'attisement et d'agitation pour homogénéiser le lit de combustible et améliorer la circulation de l'air. Pour que l'installation fonctionne irréprochablement, il est indispensable que le déversement du combustible sur la grille soit régulièrement réparti et oxygéné. Il existe différents types de grille qui se différencient surtout par leur inclinaison (position horizontale / position inclinée) et leur mode de mouvement. A côté des systèmes à grille mobile et à grille en escalier qui sont les plus fréquents, on utilise également des systèmes à grille à chaîne sans fin, à grille à recul, à

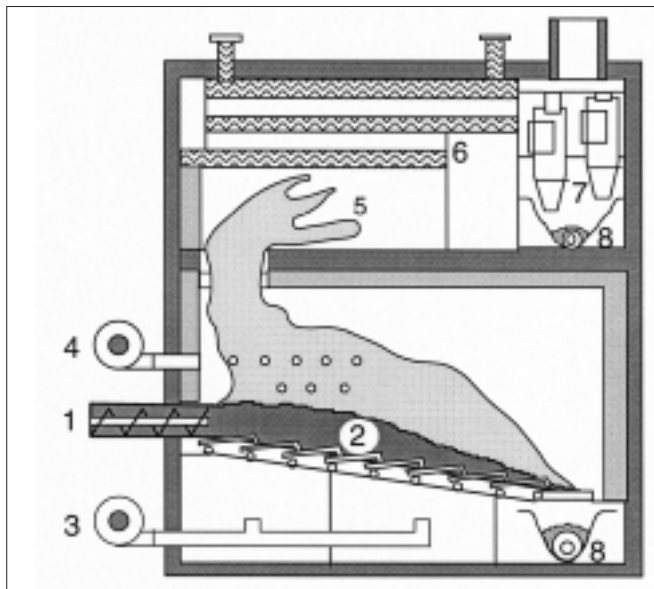


Bild 3 / figure 3

Vorschubrostfeuerung (Gegenstromprinzip).

1 Brennstoffzuführung, 2 Rost, 3 Primärluft, 4 Sekundärluft, 5 Brennkammer, 6 Wärmeübertrager, 7 Zyklon, 8 Ascheabstrahlung

Installation de chauffage à grille mobile

1 Alimentation en combustible, 2 Grille, 3 Air primaire, 4 Air secondaire, 5 Chambre de combustion, 6 Thermoconducteur, 7 Cyclone, 8 Evacuation des cendres

schlackereiche Brennstoffe geeignet. Aufgrund der Bewegungsrichtung von Brennstoff und Gasen können drei Typen unterschieden werden: Gleichstrom, Gegenstrom (Umkehrflamme) und Mittelstrom. Bei feuchtem Brennstoff wird ein Teil der bei der Verbrennung freigesetzten Energie zur Verdampfung des Wassers benötigt. Ein Strahlungsmantel über dem Brennstoff sorgt für eine hohe Vergasungstemperatur. Für Brennstoffe mit hohem Wassergehalt werden deshalb meist Gegenstromfeuerungen eingesetzt, bei welchen auf der ersten Zone des Rostes eine Brennstoffvortrocknung erfolgt, dank der Brennstoffe mit bis zu 60% Wassergehalt verbrannt werden können. Bei einem Betrieb mit nassem Brennstoff ist allerdings darauf zu achten, dass die Feuerung möglichst stationär und bei Vollast betrieben wird. Beim Einsatz zur Heizzwecken ist somit eine Mehrkesselanlage zu empfehlen, da ein Schwachlastbetrieb mit nassen Brennstoffen zu erhöhten Emissionen führt. Vorschubrostfeuerungen kommen ab 150 kW bis zu über 50 MW zum Einsatz.

### Vorfeuerung

Bei einer Vorfeuerung (auch Vorofen) sind der Rostteil mit Brennstoffzufuhr und der nachgeschaltete Kessel in zwei separate Einheiten aufgetrennt. Der Feuerungsteil umfasst einen Vorschubrost nach dem Gleichstromprinzip. Bei kleineren Anlagen (unter 100 kW) kommen auch Festroste zum Einsatz. Nachbrennkammer und Wärmeübertrager sind in einem nachgeschalteten Kessel enthalten. Die Vorfeuerung erzielt hohe Temperaturen, was Voraussetzung für eine gute Verbrennung mit geringen Emissionen ist. Allerdings ist zu beachten, dass ungenügend wärmegeämmte und nicht wassergekühlte Vorfeuerungen hohe Strahlungsverluste aufweisen.

### Unterschubfeuerung mit rotierendem Rost

Für Brennstoffe mit sehr hohem Wassergehalt kommen auch Unterschubfeuerungen mit rotierendem Rost zum Einsatz (Bild 4). Der Brennstoff wird dabei von unten in das Zentrum des kreisförmigen Rostes zugeführt. Der Rost übernimmt die Funktionen von Transport, Vortrocknung und Zündung des Brennstoffs sowie Abführen der Asche. Der Ausbrand der Gase erfolgt in einer nachgeschalteten Brennkammer. Typische Leistungen dieser Feuerungsart sind zwischen 3 MW und 20 MW.

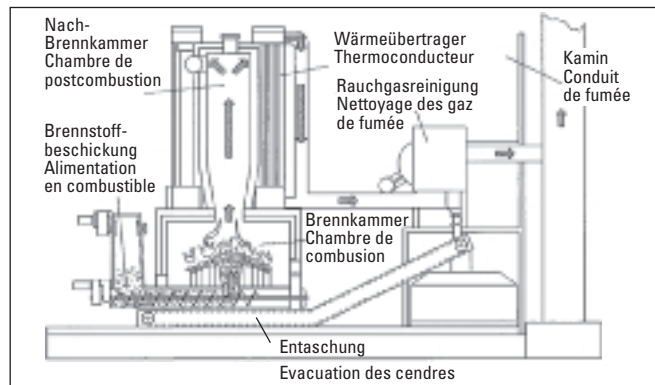


Bild 4 / figure 4  
Feuerung mit rotierendem Rost (Wärtsilä Biopower).

Fourneau avec grille rotative (Wärtsilä Biopower).

grille à avancement/recul et à grille à tambour. Grâce à l'efficacité de l'évacuation mécanique des cendres, y compris celles de calibre grossier, les installations de chauffage à grille conviennent également pour des combustibles qui produisent beaucoup de scories et de cendres. En fonction de l'axe de mouvement du combustible et des gaz, on distingue trois types, à savoir le flux parallèle, le flux à contre-courant (flamme inversée) et le flux médian. Avec un combustible humide, une partie de l'énergie libérée par la combustion est utilisée pour évaporer l'eau. Un manteau rayonnant placé au-dessus du combustible assure une température élevée de gazéification. Avec des combustibles à teneur élevée en eau, on utilise donc de préférence des systèmes à flux à contre-courant qui assurent un préséchage du combustible sur la première zone de la grille, préséchage permettant de brûler des combustibles ligneux présentant jusqu'à 60% de teneur en eau. Si le combustible utilisé est humide, il convient de veiller à ce que la combustion s'opère si possible à pleine charge et de manière stationnaire. En matière de chauffage, il est en l'occurrence recommandé d'opter pour une installation composée de plusieurs chaudières, car une exploitation à faible charge avec des combustibles humides se traduit par des émissions polluantes accrues.

Les installations de chauffage à grille mobile entrent en ligne de compte à partir de 150 kW et jusqu'à plus de 50 MW.

### Précombustion

Avec une précombustion (poêle préliminaire), la partie de la grille avec alimentation en combustible et la chaudière en aval sont constituées par deux unités séparées. La partie réservée à la combustion comprend une grille mobile basée sur le principe du flux parallèle. Pour de petites installations (puissance inférieure à 100 kW), on utilise également des grilles fixes. La chambre de postcombustion et le thermoconducteur sont disposés dans une chaudière en aval. La précombustion permet de parvenir à des températures élevées, condition préalable indispensable à une bonne combustion assortie de faibles émissions polluantes. Il faut bien entendu veiller au fait que des systèmes de précombustion insuffisamment isolés et dépourvus d'un système de refroidissement à circuit à eau présentent des pertes élevées par rayonnement.

### Fourneau à poussée inférieure avec grille rotative

Pour des combustibles à très haute teneur en eau, on utilise également des fourneaux à poussée inférieure équipés d'une grille rotative (figure 4). En l'occurrence, le combustible est transporté par-dessous jusqu'au centre de la grille circulaire. La grille assume les fonctions de transport, de préséchage et d'allumage du combustible ainsi que l'évacuation des cendres. La combustion des gaz s'effectue dans une chambre de combustion placée en aval. Les puissances typiques de ce genre de fourneau sont comprises entre 3 MW et 20 MW.

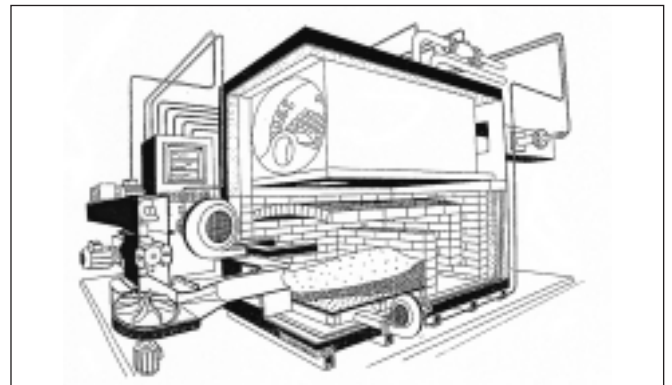


Bild 5 / figure 5  
Feuerung mit Wurfbeschickung; Schleuderradbeschickung (Awina).

Fourneau à chargement par projection; alimentation par turbine (Awina).



### Feuerung mit Wurfbeschickung

Die Wurfbeschickung ist eine spezielle Art der Brennstoffbeschickung (Bild 5). Ein Schleuderrad fördert das kleinstückige Energieholz in den Feuerraum und verteilt es gleichmässig über das gesamte Glutbett. Das zugeführte Holz wird also – im Gegensatz zu einer Unterschubfeuerung – von oben auf die bestehende Glut beschickt. Die Primärluft wird durch das Glutbett zugeführt, die Sekundärluft wird oberhalb des Glutbetts eingedüst. Die Entaschung erfolgt bei kleineren Anlagen manuell, wobei das Brennstoffbett auf einem festen Boden mit Öffnungen für die Primärluftzufuhr liegt. Für grössere Leistungen wird die Feuerung mit einem Vorschubrost ausgestattet.

### Stationäre Wirbelschichtfeuerung

In Wirbelschichtfeuerungen erfolgt eine verstärkte Anströmung des Brennstoffbetts mit Verbrennungsluft, so dass Partikel aus der Schüttung mitgerissen werden und teilweise wieder auf das Bett zurückfallen. Die Umsetzung des Brennstoffs erfolgt in der Umgebung eines heissen Bettmaterials, welches durch die Aufnahme der Verbrennungswärme eine homogene Temperaturverteilung im ganzen Wirbelbett gewährleistet. Die Temperatur in der Wirbelschicht kann durch Wärmeabfuhr im Bett geregelt werden. Stationäre Wirbelschichtfeuerungen werden für feinkörnige Brennstoffe eingesetzt und erlauben eine annähernd vollständige Umsetzung des Kohlenstoffs. Im Weiteren kann durch geeignete Ausführung im Teillastbetrieb nur ein Teil der Grundfläche angeströmt werden, was einen guten Teillastbetrieb ermöglicht (Bild 6).

### Fourneau à chargement par projection

Le chargement par projection est un mode spécial de chargement du combustible (figure 5). Une turbine projette les petits morceaux de bois d'énergie dans le foyer et les distribue régulièrement sur tout le lit de braises. Contrairement à un fourneau à poussée inférieure, le bois est donc chargé par le haut sur les braises existantes. L'air primaire est amené par le lit de braises, et l'air secondaire est injecté au-dessus de celui-ci. Avec de petites installations, l'évacuation des cendres s'effectue manuellement, le lit de combustible reposant sur un fond fixe avec orifices pour arrivée de l'air primaire. Pour des puissances importantes, le fourneau est équipé d'une grille mobile.

### Fourneau à lit fluidisé stationnaire

Dans des fourneaux à lit fluidisé, il s'opère un soufflage renforcé du lit de combustible par l'air comburant, de sorte que les particules provenant des opérations de chargement sont entraînées et retombent parfois sur le lit. La conversion du combustible s'effectue à proximité d'un matériau très chaud (sable de quartz en règle générale) qui garantit une distribution calorifique homogène sur tout le lit fluidisé en absorbant la chaleur de combustion. La température du lit fluidisé peut être régulée par transport de chaleur dans le lit. Des fourneaux à lit fluidisé stationnaire s'utilisent pour des combustibles finement fragmentés et permettent une conversion pratiquement intégrale du carbone. De plus, en service de charge partielle et moyennant une exécution appropriée, il est possible de limiter le soufflage à une partie seulement de la surface de base, ce qui se traduit par une bonne exploitation à charge partielle (figure 6).

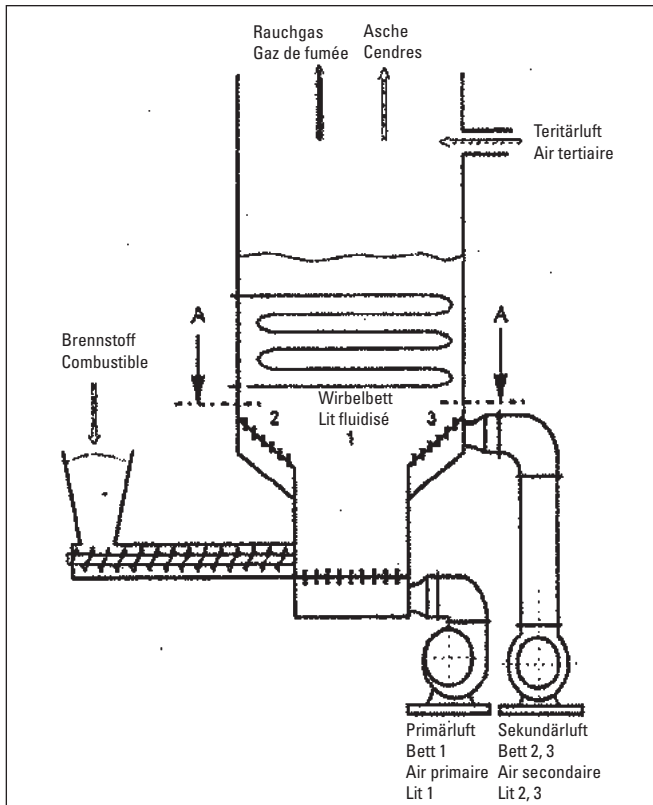


Bild 6 / figure 6

Stationäre Wirbelschichtfeuerung mit Luftzufuhr in drei Zonen für optimierten Teillastbetrieb (Lurgi).

Fourneau à lit fluidisé stationnaire avec apport d'air dans trois zones pour une exploitation optimisée à charge partielle (Lurgi).

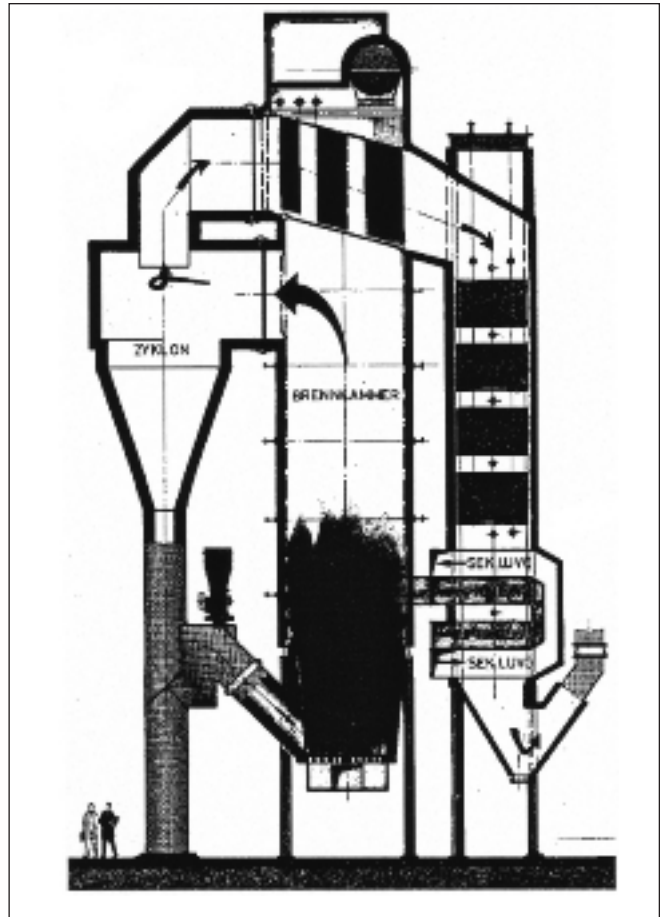


Bild 7 / figure 7

Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung mit Rückführzyklon und nachgeschaltetem Dampfkessel (Ahlstrom).

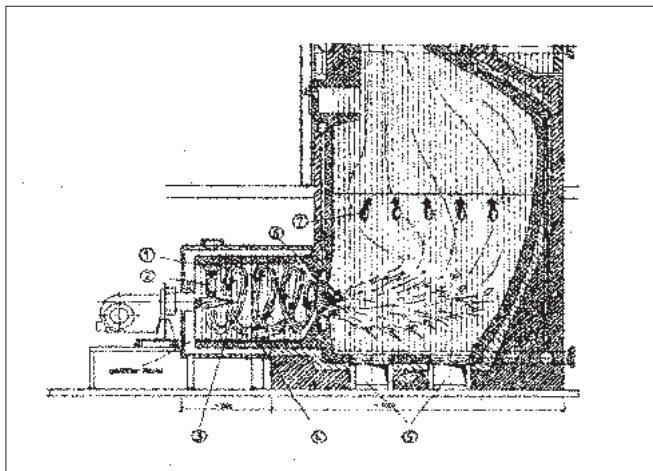
Fourneau à lit fluidisé à circulation avec cyclone de retour et chaudière à vapeur en aval (Ahlstrom).

### Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung

Bei einer weiteren Steigerung der Anströmgeschwindigkeit erfolgt ein zunehmender Austrag von Bettmaterial und Brennstoff aus dem Wirbelbett (Bild 7). Bei einer zirkulierenden Wirbelschicht erfolgt deshalb eine Rückführung des mitgerissenen Bettmaterials. Durch Wärmeabfuhr des umlaufenden Bettmaterials kann die Betttemperatur geregelt werden. Im Wirbelbett werden hohe Wärme- und Stoffaustauschraten erreicht und ideale Bedingungen für die Kohlenstoffumsetzung gewährleistet. Zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen sind für eine breite Palette von Brennstoffen geeignet, weshalb sie auch zur Kohleverbrennung sowie für die Verbrennung von Rückständen zum Beispiel in der Papierindustrie eingesetzt werden. Wegen des hohen betrieblichen Aufwands werden solche Anlagen für Leistungen ab rund 15 MW eingesetzt.

### Einblasfeuerung

Einblasfeuerungen kommen vor allem in der Holzindustrie zur Verbrennung von trockenen Spänen, Sägemehl und anderen feinkörnigen Holzresten zum Einsatz. Der Brennstoff wird dabei pneumatisch gefördert und mit der Trägerluft in den Brennraum oder in einen Vorraum der Hauptbrennkammer (Muffel) eingeblasen (Bild 8). Zusätzliche Verbrennungsluft wird als Mantelluft bei der Brennstoffzuführung oder als Stufenluft im Brennraum zugegeben. Beim Einblasen in den heißen Brennraum zündet der Brennstoff von selbst. Für das Anfahren kann ein Zündbrenner mit Heizöl eingesetzt werden. Der Ausbrand der Brennstoffpartikel erfolgt teilweise im Flug. Je nach Brennstoff und Konstruktionsprinzip können grössere Brennstoffstücke auch auf einem Ausbrandrost ausbrennen. Einblasfeuerungen können auch oberhalb eines Rostes eingebaut werden, wobei stückige Brennstoffe mechanisch auf den Rost gefördert und feinkörnige Brennstoffe pneumatisch zugeführt werden. Als Folge der Flugstromverbrennung und des grossen Feinanteils im Brennstoff weisen Einblasfeuerungen hohe Staubgehalte im Rohgas auf, weshalb zur Einhaltung der Emissionsvorschriften Gewebefilter oder Elektroabscheider eingesetzt werden.



### Fourneau à lit fluidisé à circulation

En majorant encore la vitesse de soufflage, on soustrait une partie encore plus grande de matériau du lit et de combustible au lit fluidisé (figure 7). Avec un lit fluidisé à circulation, il se produit donc un retour du matériau du lit qui a été entraîné. Par rejet de chaleur du matériau du lit, il est possible de réguler la température de ce lit. Au cœur du lit fluidisé, on atteint des taux élevés de transferts thermiques et de matière, ce qui garantit des conditions idéales pour la conversion du carbone. Les fourneaux à lit fluidisé à circulation conviennent pour un très large éventail de combustibles, raison pour laquelle ils peuvent s'utiliser aussi bien pour brûler des résidus de type charbonneux que des résidus ligneux, dans l'industrie du papier par exemple. Etant donné les frais élevés liés à leur exploitation, de pareilles installations s'utilisent pour des puissances à partir de 15 MW environ.

### Fourneau à injection

Les fourneaux à injection s'utilisent surtout dans l'industrie du bois pour brûler des copeaux, de la sciure et d'autres résidus ligneux de petit calibre. En l'occurrence, le combustible est transporté pneumatiquement et injecté avec l'air porteur dans la chambre de combustion ou une chambre préliminaire de la chambre de combustion principale (moufle – figure 8). De l'air comburant supplémentaire est additionné pour servir d'air d'enveloppement sur l'alimentation en combustible ou d'air d'étagement dans la chambre de combustion. Par injection dans la chambre de combustion surchauffée, le combustible s'enflamme de lui-même. Pour le démarrage, il est possible d'avoir recours à une veilleuse à mazout. La combustion des particules de combustible s'effectue partiellement en phase aérienne. En fonction du combustible et du principe de construction du fourneau, il est également possible de brûler de gros morceaux de bois sur une grille. Un fourneau à injection peut également s'installer au-dessus d'une grille; les morceaux de combustible sont alors amenés mécaniquement sur la grille et les parties fines de combustible sont injectées pneumatiquement. Conséquence de la combustion en phase aérienne et de la proportion importante de parties fines dans le combustible, les fourneaux à injection présentent une teneur élevée en poussières dans les gaz bruts, raison pour laquelle il faut les équiper de filtres texturés ou de séparateurs électriques afin de respecter les prescriptions en vigueur concernant les émissions polluantes.

Bild 8 / figure 8

Muffeleinblasfeuerung

1 Primärluft, 2 Spänezufuhr, 3 Vergasung und partielle Verbrennung  
4 Abgaszufuhr, 5 Entaschung, 6 Sekundärluft, 7 Tertiärluftzufuhr (Seeger).

Fourneau à injection à moufle

1 Air primaire, 2 Alimentation en copeaux, 3 Gazéification et combustion partielle, 4 Adduction de gaz brûlés, 5 Evacuation des cendres  
6 Air secondaire, 7 Adduction d'air tertiaire (Seeger).





Die Verbrennungsregelung dient zur Gewährleistung einer guten Ausbrandqualität und eines hohen Wirkungsgrads. Eine annähernd vollständige Verbrennung wird nur innerhalb eines gewissen Bereichs des Brennstoff/Luft-Verhältnisses erzielt. Die CO/Lambda-Charakteristik nach Bild 9 beschreibt das Funktionsprinzip der Verbrennungsregelung wie folgt: Der Kohlenmonoxidgehalt CO dient als Indikator der Ausbrandqualität, die Luftüberschusszahl Lambda beschreibt das Verhältnis zwischen der effektiv vorhandenen und der theoretisch notwendigen Mindestluftmenge. Bei zu tiefem Luftüberschuss tritt ein Anstieg unverbrannter Schadstoffe infolge lokalen Sauerstoffmangels auf. Dies wird durch den Einsatz der Verbrennungsregelung vermieden, indem die Sekundärluftmenge erhöht oder die Brennstoffmenge vermindert wird. Im Bereich des optimalen Luftüberschusses erfolgt kein Eingriff. Bei zu hohem Luftüberschuss nimmt der Wirkungsgrad ab und gleichzeitig sinkt die Verbrennungstemperatur, was durch Regelung der Sekundärluftmenge ebenfalls verhindert wird.

Die wichtigsten Prinzipien der Verbrennungsregelung sind die Lambda-Regelung durch Messung des Luftüberschusses, die Verbrennungstemperatur-Regelung mit Messung der Feuerraumtemperatur sowie die CO/Lambda-Regelung, welche über eine Sollwertoptimierung verfügt und schwankende Betriebsbedingungen optimal ausgleicht.

Das Zusammenspiel von Leistungs- und Verbrennungsregelung erfolgt als Kaskade, in welcher die Leistungsregelung übergeordnet die Leistung beeinflusst und Vorgabewerte an die Verbrennungsregelung als inneren, schnellen Regelkreis für die Feinregulierung liefert (Bild 10).

La régulation de la combustion permet de garantir une bonne qualité de celle-ci et un rendement élevé. Une combustion quasiment intégrale n'est réalisée que dans une certaine plage du rapport combustible/air comburant. Conformément à la figure 9, la caractéristique CO/lambda décrit le principe de fonctionnement d'une régulation de la combustion comme suit: la teneur en monoxyde de carbone CO sert d'indicateur de la combustion, et le coefficient d'excédent d'air décrit le rapport entre la quantité d'air minimale effective et théoriquement nécessaire. Si l'excédent d'air est faible, la quantité de substances nocives non consommées augmente en raison d'un manque localisé d'oxygène. Pour éviter d'en arriver là, on utilise une régulation de la combustion afin de majorer la quantité d'air secondaire ou de réduire la quantité de combustible. En l'occurrence, on n'intervient pas dans la plage de l'excédent d'air optimal. Avec un excédent d'air trop important, le rendement diminue et la température de combustion diminue simultanément, ce qui peut également s'éviter par régulation de la quantité d'air secondaire.

Les principes essentiels de la régulation de la combustion sont la régulation lambda par mesure de l'excédent d'air, la régulation de la température de combustion par mesure dans le foyer ainsi que la régulation CO/lambda, mode de régulation basé sur une optimisation de la valeur théorique de référence et une compensation optimale de conditions d'exploitation variables.

La combinaison d'une régulation de la puissance et d'une régulation de la combustion s'opère en cascade. La régulation de la puissance est prioritaire; elle influence directement la puissance et fournit des valeurs de référence à la régulation de la combustion pour le circuit interne rapide de régulation fine (figure 10).

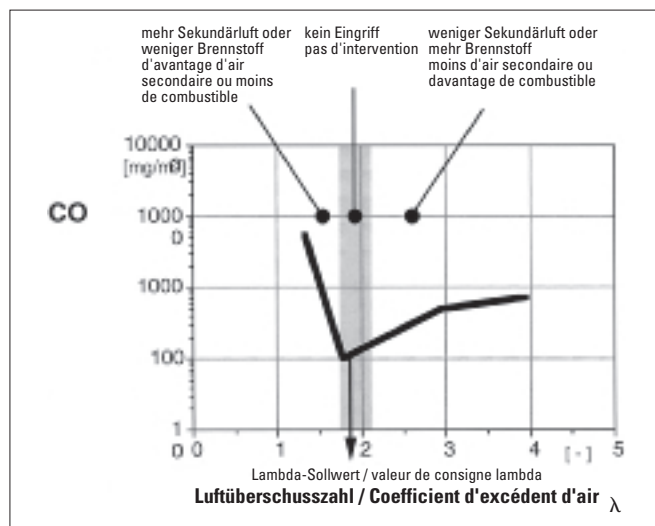


Bild 9 / figure 9  
Prinzip der Verbrennungsregelung anhand der CO/Lambda-Charakteristik. Im grau schraffierten Bereich erfolgt kein Eingriff. Für trockene Brennstoffe kann zusätzlich eine Temperaturüberwachung eingesetzt werden, welche den Lambda-Sollwert zur Vermeidung von zu hohen Temperaturen nach unten limitiert.

Principe de la régulation de la combustion basée sur les caractéristiques CO/lambda. Une intervention n'est pas nécessaire dans la zone grisée. Avec des combustibles secs, on peut en outre avoir recours à un contrôle de la température qui limite la température lambda vers le bas pour éviter des températures trop élevées.

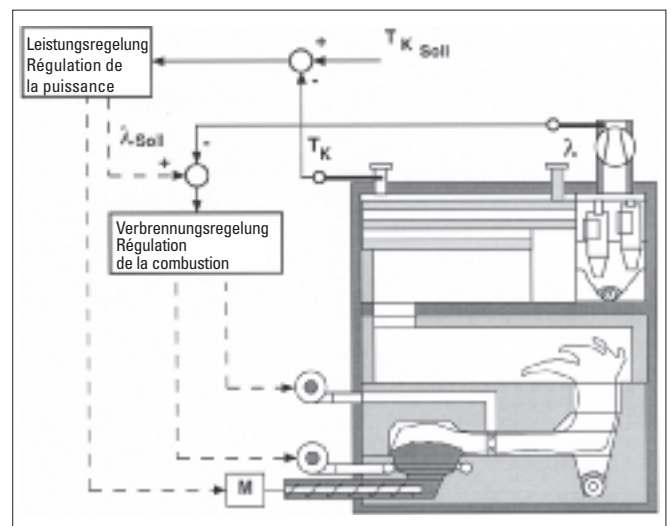


Bild 10 / figure 10  
Kaskade von Leistungs- und Verbrennungsregelung.  
Cascade d'une régulation de la puissance et de la combustion.

## 4 Emissionen

Korrekt betriebene automatische Holzfeuerungen weisen nur geringe Emissionen an unverbrannten gasförmigen und auch an unverbrannten staubförmigen Schadstoffen wie Teer und Russ auf. Bei guter Betriebsweise verursachen sie damit auch kaum Geruchsprobleme.

Demgegenüber führen die im Holz enthaltenen aschebildenden Mineralstoffe zu vorwiegend salzartigen Emissionen, welche bei Abkühlung auf Abgas- oder Umgebungstemperatur als Feststoffe in Erscheinung treten. Automatische Holzfeuerungen weisen deshalb vergleichsweise hohe Emissionen an lungengängigem Feinstaub kleiner als 10 Mikrometer, sogenanntem PM10, auf, welcher in der Umgebung lange Zeit in Schwebelage bleibt und über die Atmung aufgenommen wird. Dieser salzartige Feinstaub ist zwar weniger toxisch als Russ aus Dieselmotoren oder gar aus schlecht betriebenen handbeschickten Holzfeuerungen. Da die Immissionsgrenzwerte an PM10 aber im Winter zum Teil erheblich überschritten werden und die Holzheizungen überproportional dazu beitragen, sind auch bei automatischen Holzfeuerungen Massnahmen zur Feinstaubabscheidung erforderlich.

Daneben enthält Holz auch Stickstoff, welcher in Form von Aminen und Proteinen notwendig ist für das Wachstum der Pflanzen. Dieser im Brennstoff gebundene Stickstoff wird bei der Verbrennung teilweise oxidiert und führt zu unerwünschten Stickoxidemissionen. Holzheizungen weisen deshalb höhere Stickoxidemissionen auf als Heizungen mit Erdöl und Erdgas, weshalb für Grossanlagen auch Massnahmen zur Stickoxidsminderung zur Anwendung kommen. Hauptverursacher der Stickoxide ist allerdings der Verkehr, weshalb die NO<sub>x</sub>-Minderung bei Holzfeuerungen weniger bedeutend ist als die Feinstaubminderung. Zur NO<sub>x</sub>-Reduktion kommen Primär- und Sekundärmassnahmen zum Einsatz. Als Primärmassnahme dient die Luftstufung, welche durch Abgasrezirkulation unterstützt werden kann. Die Stickoxidsminderung basiert dabei auf der Reaktion von stickstoffhaltigen Zwischenverbindungen, welche bei der Holzvergasung freigesetzt werden und in einer Reduktionszone zu unschädlichem, molekularem Stickstoff (N<sub>2</sub>) reagieren. Dazu ist eine Vergasung des Brennstoffs mit Luftmangel und eine späte Sekundärluftzufuhr notwendig. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen können dadurch allerdings nicht vollständig vermieden werden, weshalb für Grossanlagen auch eine Abgasnachbehandlung durch Eindüsung eines Reduktionsmittels zum Einsatz kommt. Zur Umwandlung von NO<sub>x</sub> zu N<sub>2</sub> werden Ammoniak oder Harnstoff im Feuerraum oder vor einem Katalysator eingedüst.

## 4 Emissions polluantes

Des installations automatiques de chauffage au bois exploitées dans les règles de l'art ne produisent que de faibles émissions polluantes sous forme de substances nocives gazeuses et pulvérulentes (goudron et suie) non consommées. Dans de bonnes conditions d'exploitation, elles n'occasionnent également guère de problèmes d'odeur.

Les matières minérales que le bois contient et qui produisent des cendres sont par contre à l'origine d'émissions polluantes principalement salines qui se manifestent sous forme de matières solides par refroidissement à la température des gaz brûlés ou à la température ambiante. Comparativement, des installations automatiques de chauffage au bois présentent par conséquent d'importantes émissions de poussières fines respirables inférieures à 10 micromètres, dites PM10, poussières qui restent longtemps en suspension dans l'atmosphère environnante et sont inhalées en respirant. Ces poussières fines salines sont en vérité moins toxiques que les suies émises par des moteurs Diesel ou même des installations de chauffage au bois à alimentation manuelle exploitées dans de mauvaises conditions. Comme les valeurs limites de poussières fines PM10 sont néanmoins parfois considérablement dépassées en hiver, il est également indispensable de prendre des mesures pour séparer ces poussières fines avec des installations automatiques de chauffage au bois.

Le bois contient en outre de l'azote sous forme d'amines et de protéines indispensables à la croissance des plantes. Cet azote fixé au combustible est partiellement oxydé lors de la combustion et produit des émissions d'oxyde d'azote indésirables. Des installations de chauffage au bois produisent donc des émissions d'oxyde d'azote plus importantes que celles produites par des installations à mazout ou à gaz, raison pour laquelle les grosses installations sont également dotées de dispositifs permettant d'abaisser le taux d'oxyde d'azote. En matière d'oxyde d'azote, le principal pollueur est le trafic, raison pour laquelle la diminution du NO<sub>x</sub> avec des installations de chauffage au bois est moins importante que la diminution du taux des poussières fines. Pour réduire le NO<sub>x</sub>, on intervient au niveau de l'air primaire et de l'air secondaire. En ce qui concerne l'air primaire, on a recours à un étagement qui peut s'assister moyennant une recirculation des gaz brûlés. La réduction de l'oxyde d'azote se base en l'occurrence sur la réaction de composés azotés intermédiaires libérés lors de la gazéification du bois et réagissant dans une zone de réduction pour donner de l'azote moléculaire (N<sub>2</sub>) inoffensif. Pour ce faire, une gazéification du combustible avec un manque d'air et un apport retardé d'air secondaire est nécessaire. Il est en l'occurrence impossible d'éviter complètement des émissions NO<sub>x</sub>, raison pour laquelle on a également recours, pour de grosses installations, à un traitement ultérieur des gaz brûlés par injection d'un agent réducteur. Pour convertir le NO<sub>x</sub> en N<sub>2</sub>, on injecte de l'ammoniac ou de l'urée dans le foyer ou en amont d'un catalyseur.

## 5 Feinstaubabscheidung

Als Teil des Massnahmenplans zur Feinstaubreduktion des Bundes werden in den kommenden Jahren verschärfte Emissionsgrenzwerte für Holzfeuerungen eingeführt. Vor kurzem wurden für Anlagen von 500 kW bis 5 MW ein Grenzwert von 20 mg/m<sup>3</sup> (gegenüber vorher 150 mg/m<sup>3</sup>) eingeführt. Zur Einhaltung dieses Grenzwerts ist in der Regel eine Feinstaubabscheidung erforderlich. Für Anlagen von 70 kW bis 500 kW ist ein Grenzwert von 50 mg/m<sup>3</sup> vorgesehen. Dieser kann mit qualitativ hochwertigen Holzbrennstoffen, also Holzpellets oder Holzschnitzel mit geringem Rindenanteil, voraussichtlich mit einigen Anlagen auch ohne Sekundärmaßnahmen eingehalten werden. Qualitativ minderwertige Holzbrennstoffe werden dagegen in Zukunft eher in grösseren Anlagen genutzt werden müssen oder den Einsatz von Feinstaubabscheidern auch bei kleineren Leistungen erforderlich machen. Die wichtigsten Verfahren zur Staubabscheidung bei Holzfeuerungen sind Zyklo- ne als Grobentstauber sowie Elektroabscheider und Gewebefilter als Feinstaubabscheider [4]. Bild 11 zeigt das Funktionsprinzip der drei Verfahren.

Zyklone basieren auf der Trägheitsabscheidung und erzielen nur für grobe Partikel über 5 bis 10 Mikrometer eine relevante Abscheidung. Zur Einhaltung der verschärfte Emissionsgrenzwerte kommen somit in Zukunft auch Elektroabscheider oder Gewebefilter zum Einsatz, wie in Bild 12 und Bild 13 gezeigt.

Im Elektroabscheider erfolgt die Abscheidung durch Aufladung der Partikel in einem elektrischen Feld und Abscheidung des Staubs an einer metallischen Oberfläche, von der er mechanisch abgereinigt wird. Die Abscheidung ist abhängig von der Spannung und der Aufenthaltszeit im Abscheider, welche mehrere Sekunden beträgt und zu grossen Apparatedimensionen und entsprechend hohen Kosten führt.

## 5 Séparation des poussières fines

Élément du plan de mesures de la Confédération pour réduire les poussières fines, des valeurs limites d'émission plus sévères seront introduites au cours de ces prochaines années pour les installations de chauffage au bois. Actuellement, vient d'être introduite une valeur limite de 20 mg/m<sup>3</sup> (auparavant 150 mg/m<sup>3</sup>) pour des installations de 500 kW à 5 MW. Pour respecter cette valeur, une séparation des poussières fines est en règle générale nécessaire. Pour des installations de 70 kW à 500 kW, une valeur limite de 50 mg/m<sup>3</sup> est prévue. Celle-ci peut se respecter avec des combustibles ligneux de haute qualité, c'est-à-dire des granulés ou des plaquettes de bois à faible proportion d'écorce, et cela probablement sans intervenir au niveau de l'air secondaire pour quelques installations. A l'avenir, des combustibles de qualité inférieure devront par contre plutôt s'utiliser dans de grosses installations ou nécessiteront également l'utilisation de séparateurs de poussières fines avec des installations de faible puissance. Les principales méthodes pour séparer des poussières dans des installations de chauffage au bois consistent en des cyclones pour un dépoussiérage grossier ainsi que des séparateurs électriques et des filtres texturés pour un dépoussiérage fin [4]. La figure 11 présente le principe de fonctionnement des trois méthodes.

Les cyclones se basent sur la séparation par inertie et ne donnent de bons résultats que pour séparer des particules grossières de plus de 5 à 10 micromètres. Pour respecter les valeurs limites d'émission renforcées, il faudra donc aussi utiliser à l'avenir des séparateurs électriques ou des filtres texturés, selon figures 12 et 13.

Avec un séparateur électrique, la séparation s'effectue par chargement des particules dans un champ électrique et séparation des poussières sur une surface métallique d'où elles peuvent s'éliminer mécaniquement. La séparation dépend de la tension et de la durée du séjour dans le séparateur, séjour qui peut se chiffrer à plusieurs secondes, ce qui se traduit par des appareils de grandes dimensions et donc des coûts importants.

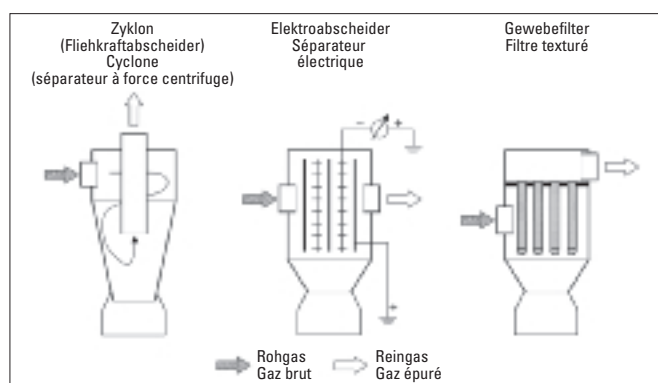


Bild 11 / figure 11

Funktionsprinzip von Zyklon, Elektroabscheider und Gewebefilter.

Principe de fonctionnement du cyclone, du séparateur électrique et du filtre texturé.



Bild 12 / figure 12

Elektroabscheider für Leistungen unter 1 MW (Aerob-Beth, D).

Séparateur électrique pour puissances inférieures à 1 MW (Aerob-Beth, D).

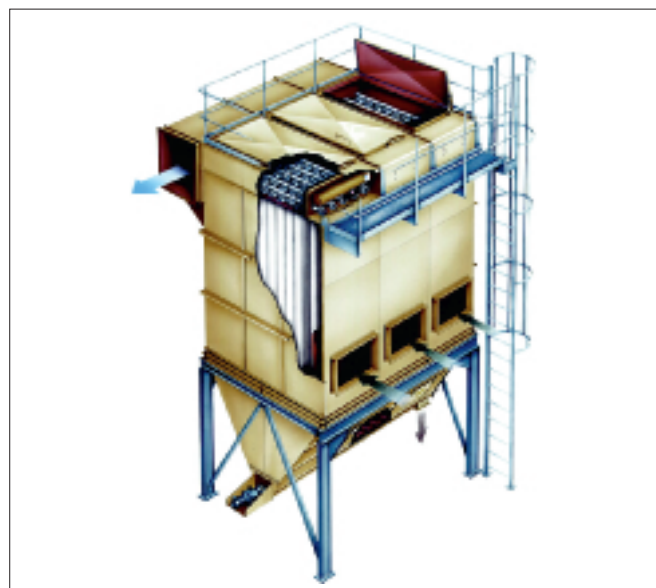


Bild 13 / figure 13

Gewebefilter für Leistungen unter 1 MW (Scheuch, A).

Filtre texturé pour puissances inférieures à 1 MW (Scheuch, A).

Im Gewebefilter erfolgt die Abscheidung auf einer Filteroberfläche und in der darauf angelagerten Staubschicht. Bei Erreichen einer gewissen Schichtdicke oder Überschreitung eines gewissen Druckverlusts durch diese Schicht erfolgt eine pneumatische Abreinigung des Filters mit Druckluft. Gewebefilter weisen kleinere Apparatedimensionen auf, sie verursachen aber höhere Betriebskosten wegen des hohen Druckverlusts, des Verbrauchs an Druckluft und der beschränkten Lebensdauer der Filterelemente. Im Weiteren sind Gewebefilter empfindlicher im Betrieb, da sie durch Verkleben oder Funken beschädigt werden. Verklebungen treten vor allem bei hohem Wassergehalt im Brennstoff auf, weshalb Gewebefilter vor allem für trockene Brennstoffe geeignet sind.

Dans un filtre texturé, la séparation s'effectue sur une surface filtrante et dans la couche de poussière qui s'y fixe. Un nettoyage pneumatique du filtre avec de l'air comprimé intervient lorsque la couche de poussière atteint une certaine épaisseur ou lorsque la perte de pression à travers la couche dépasse une certaine valeur. Les filtres texturés ont de petites dimensions, mais occasionnent des frais d'exploitation élevés en raison de l'importante perte de pression, de la consommation d'air comprimé et de la durée de vie limitée des éléments du filtre. Des filtres texturés sont en outre plus délicats, car ils peuvent être endommagés par collage ou par des étincelles. Un collage peut se manifester surtout avec des combustibles à teneur élevée en eau, raison pour laquelle des filtres texturés conviennent avant tout pour des combustibles bien secs.

## 6 Wirtschaftlichkeit

Die Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung hängen nebst dem Brennstoffpreis vor allem von der Anlagengrösse sowie von den örtlichen Randbedingungen ab. Da die spezifischen Investitionskosten mit zunehmender Anlagenleistung abnehmen, sinken auch die Wärmegestehungskosten mit der Anlagengrösse. Allerdings ist in Zukunft ab 500 kW eine Feinstaubabscheidung erforderlich, welche die Investitions- und Betriebskosten erhöht. Bild 14 zeigt die Wärmegestehungskosten eines Heizwerks mit automatischer Holzfeuerung im Vergleich zu einer Ölheizung. Im Fall eines Wärmenetzes fallen zusätzlich noch die Kosten für die Wärmeverteilung an, welche je nach Netzdicke und baulichen Randbedingungen zwischen rund 2 bis 4 Rp./kWh betragen. Im Weiteren gelten die ausgewiesenen Werte im Falle günstiger Rahmenbedingungen für den Bau des Silos und der Anlage (ebenes Grundstück, Anlieferungsstrasse vorhanden).

Im gezeigten Beispiel betragen die Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung mit 500 kW Leistung bei einem Brennstoffpreis von 5 Rp./kWh für Holzschnitzel franco Silo von rund 15 Rp./kWh, sofern kein Feinstaubabscheider eingesetzt wird. Ein Feinstaubabscheider verteuert die Wärmeproduktion um rund 10% auf 16,5 Rp./kWh. Bei 1 MW Leistung sinken die Wärmegestehungskosten einer Anlage mit Feinstaubabscheider auf rund 13 Rp./kWh und für 2 MW Leistung auf rund 11,5 Rp./kWh. Bei 2 MW Leistung verursacht eine Holzheizung und eine Ölheizung vergleichbare Wärmekosten, wenn Heizöl zu 8 Rp./kWh oder Fr. 80.– pro 100 Liter verfügbar ist. Für Leistungen unter 2 MW verursacht Holz höhere Gesamtkosten als Heizöl, weshalb Holzheizungen zum Teil durch Fördermassnahmen unterstützt werden.

## 6 Rentabilité

Outre le prix du combustible, le prix de revient de la chaleur produite par une installation automatique de chauffage au bois dépend surtout de la taille de l'installation et des conditions locales. Comme les investissements spécifiques diminuent lorsque la puissance de l'installation augmente, le prix de revient de la chaleur diminue également lorsque la taille de l'installation augmente. A l'avenir et à partir d'une puissance de 500 kW, il sera nécessaire de séparer les poussières fines, ce qui se traduira par une augmentation des investissements et des frais d'exploitation. La figure 14 présente le prix de revient de la chaleur produite par une installation automatique de chauffage au bois comparativement à une installation de chauffage au mazout. Lorsqu'un réseau à distance assure la distribution de la chaleur, il faut en outre compter les frais de distribution qui peuvent varier entre environ 2 et 4 centimes/kWh en fonction de la densité du réseau et des conditions de construction. Il convient par ailleurs de tenir compte de valeurs déjà dûment éprouvées si les conditions-cadres pour la construction du silo et de l'installation (terrain, existence d'une voie d'accès) sont favorables.

Dans notre exemple, le prix de revient de la chaleur produite par une installation automatique de chauffage au bois de 500 kW de puissance dépourvue de séparateurs de poussières fines est d'environ 15 centimes/kWh en brûlant des plaquettes rendues franco silo au prix de 5 centimes/kWh. En utilisant un séparateur de poussières fines, le prix de la chaleur produite renchérit d'environ 10% pour s'établir à 1,5 centimes/kWh. Pour une puissance de 1 MW, le prix de revient de la chaleur produite par une installation équipée d'un séparateur de poussières fines baisse à environ 13 centimes/kWh, et pour une puissance de 2 MW à environ 11,5 centimes/kWh. Pour une puissance de 2 MW, on parvient à des prix de revient comparables à ceux d'une installation de chauffage au bois ou d'une installation de chauffage au mazout si l'huile de chauffage est achetée au tarif de 8 centimes/kWh ou Fr. 80.– par 100 litres. Pour des puissances inférieures à 2 MW, le bois se révèle globalement plus coûteux que du mazout, raison pour laquelle il convient parfois d'encourager les installations de chauffage au bois par des mesures promotionnelles.

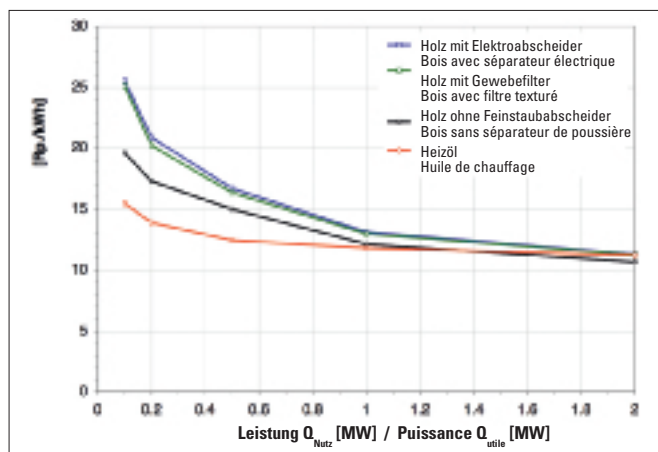


Bild 14 / figure 14

Wärmegestehungskosten für Holz mit und ohne Feinstaubabscheider (inklusive Gebäude, exklusive Wärmeverteilung für allfälliges Wärmenetz) für Brennstoffpreise von 5 Rp./kWh für Holz und einen Kapitalzins von 5% p.a. Als Vergleich sind die Kosten für Heizöl bei einem Preis von 8 Rp./kWh für Heizöl dargestellt.

Prix de revient de la chaleur produite avec du bois, avec et sans séparateur de poussière (y compris bâtiment, non compris distribution de la chaleur par un éventuel réseau à distance), pour un prix du combustible ligneux de 5 centimes/kWh et un intérêt du capital de 5% par année. Pour comparaison, prix avec une installation à mazout à raison d'un tarif de 8 centimes/kWh pour l'huile de chauffage.



## 7 Anwendungsbeispiele

### 7.1 Siedlung Chienbergreben in Gelterkinden

Die 1997 fertiggestellte Genossenschafts-Siedlung Chienbergreben in Gelterkinden umfasst drei Mehrfamilienhäuser und acht Doppel-Einfamilienhäuser (Bild 15). Die prägnanten Holzfassaden und die steilen, grossflächigen Ziegeldächer geben der Siedlung das einheitliche Gesicht. Trotz einfachem Ausbaustandard entstand eine ökologische und hocheffiziente Siedlung, die den Richtlinien von Energie 2000 Öko-Bau (Niedrigenergiehäuser in Öko-Bauweise) entspricht. Neben Verwendung einheimischer Materialien wie roher Schweizer Fichte, der Nutzung von Regenwasser und der energetisch vorbildlichen Bauweise mit grossen Dämmstärken und Südausrichtung wurde für die Heizung eine zentrale Holz-Schnitzelheizung gewählt (Bild 16).



Bild 15 / figure 15

Gesamtansicht der Siedlung Chienbergreben in Gelterkinden.

Vue générale de la Cité Chienbergreben à Gelterkinden.

Bauträgerschaft:  
Wohnbaugenossenschaft Chienbergreben, Gelterkinden  
Architektur: Ueli und Sabine Schäfer, Binz  
Holzheizung: Müller AG, Balsthal

Gebäudedaten:  
Volumen 10 728 m<sup>3</sup>  
Energiebezugsfläche 2640 m<sup>2</sup>  
Heizenergiebedarf: 120 MJ/m<sup>2</sup>a (Gebäude mit natürlicher Lüftung)  
bzw. 84 MJ/m<sup>2</sup>a (2 EFH mit kontrollierter Lüftung und WRG)  
Kosten: Fr. 620.-/m<sup>3</sup> (BKP2)

Technische Daten Heizung:  
Unterschubfeuerung Müller MRUK 70 mit Eco  
Kesselleistung 60–85 kW  
automatische Zündung  
Flamm-Control-Steuerung und Regelung  
mit Verbrennungsoptimierung  
Wärmenetz 190 m  
Holzverbrauch 260 m<sup>3</sup> Holzschnitzel pro Jahr

### 7.2 Nahwärmeverbund Bülach

Die Stadt Bülach verfügt mit einer Waldfläche von 613 ha über beträchtliche Energiereserven, die früher nur zum kleinen Teil genutzt wurden. Im 1991 erstellten Energiekonzept wurde berechnet, dass jährlich mindestens 6000 m<sup>3</sup> Energieholzschnitzel nachhaltig genutzt und somit rund 440000 Liter Heizöl substituiert werden können. Bis heute werden über 4000 m<sup>3</sup> Holzschnitzel in öffentlichen und privaten Gebäuden verbraucht, ein grosser Teil davon im 1998 fertiggestellten Wärmeverbund Allmendstrasse. Der Nahwärmeverbund Bülach ist damit ein gutes Beispiel für die Holzenergienutzung im städtischen Umfeld. Das Wärmenetz mit einer Leistung von 900 kW und einer Jahresproduktion von 1400 MWh/a versorgt die Stadthalle, das Feuerwehrgebäude (Standort der Zentrale, Bild 17), ein Kirchgemeindehaus, sowie einen Kindergarten und eine Privatliegenschaft. In den bestehenden Liegenschaften wurden vorhandene Ölheizungen demontiert und die Nutzfläche dadurch vergrössert. Die Holzfeuerung substituiert jährlich rund 140000 Liter Heizöl und entlastet damit die Atmosphäre um 375 000 kg CO<sub>2</sub>. Die Anlage wurde vom Kanton Zürich und vom Bund finanziell unterstützt und mit dem Solarpreis ausgezeichnet (Bild 18).

## 7 Exemples d'application

### 7.1 Cité Chienbergreben à Gelterkinden

Achevée en 1997, la Cité coopérative Chienbergreben de Gelterkinden comprend trois locatifs et huit maisons jumelles (figure 15). Les façades en bois et les grandes toitures à pans inclinés avec couverture en tuiles confèrent à la cité un caractère homogène. Malgré un standard de second œuvre simple, la cité est écologique, hautement efficace et conforme aux directives Energie 2000 (maisons à basse consommation d'énergie). Outre l'utilisation de matériaux indigènes tels que de l'épicéa suisse brut, une récupération des eaux pluviales et une architecture énergétiquement exemplaire avec de fortes épaisseurs d'isolation et une exposition au sud, le maître d'ouvrage a opté pour une installation de chauffage central à plaquettes de bois (figure 16).

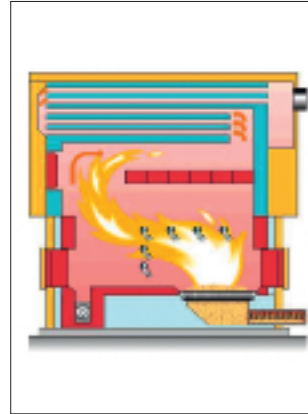


Bild 16 / figure 16

Unterschubfeuerung als Heizzentrale der Siedlung Chienbergreben (Müller AG).

Fourneau à poussée inférieure comme centrale de chauffage de la Cité Chienbergreben (Müller AG).

Promoteurs:  
Coopérative d'habitation Chienbergreben, Gelterkinden  
Architecte: Ueli et Sabine Schäfer, Binz  
Installation de chauffage au bois: Müller AG, Balsthal

Données immobilières:  
Volume 10728 m<sup>3</sup>  
Surface de référence énergétique (SRE) 2640 m<sup>2</sup>  
Consommation d'énergie de chauffage: 120 MJ/m<sup>2</sup>a (bâtiment avec ventilation naturelle), resp. MJ/m<sup>2</sup>a (2 villas familiales avec ventilation contrôlée et récupération de la chaleur)  
Coût: Fr. 620.-/m<sup>3</sup> (CFC2)

Caractéristiques techniques de l'installation de chauffage:  
Installation de chauffage à poussée inférieure  
Müller MRUK 70 avec Eco  
Puissance de la chaudière 60–85 kW  
Allumage automatique  
Commande Flamm-Control et régulation avec optimisation de la combustion  
Réseau de distribution de chaleur de 190 m  
Consommation de 260 m<sup>3</sup> de plaquettes de bois par année

### 7.2 Réseau de chauffage à distance de Bülach

Avec une surface forestière de 613 ha, la Ville de Bülach dispose d'énormes réserves énergétiques qui n'étaient autrefois que très modestement exploitées. Un concept énergétique élaboré en 1991 a permis de calculer qu'il était possible d'utiliser chaque année durablement au moins 6000 m<sup>3</sup> de plaquettes de bois pour les substituer à environ 440000 litres d'huile de chauffage. Jusqu'ici, on consommait plus de 4000 m<sup>3</sup> de plaquettes de bois dans des bâtiments publics et privés, dont une grande partie pour le réseau de chauffage de l'Allmendstrasse réalisé en 1998. Le réseau de chauffage à distance de Bülach constitue donc un bon exemple d'utilisation du bois d'énergie en milieu urbain. D'une puissance de 900 kW pour une production annuelle de 1400 MWh/a, le réseau alimente la halle municipale, la caserne des pompiers (lieu d'implantation de la centrale, figure 17), la maison des œuvres paroissiales, un jardin d'enfants et un immeuble privé. Dans les immeubles existants, on a démonté les composants des installations de chauffage au mazout pour majorer ainsi la surface utile. Chaque année, l'installation de chauffage au bois se substitue à la consommation d'environ 140 000 litres de mazout et soulage ainsi l'atmosphère de 375 000 kg de CO<sub>2</sub>. L'installation a été subventionnée par le Canton de Zurich et la Confédération; le Prix solaire lui a également été décerné (figure 18).





Bild 17 / figure 17

Das Feuerwehrgebäude Bülach dient als Standort des Nahwärmeverbundes.

Le cœur du réseau de chauffage à distance de Bülach est sis dans les sous-sols de la caserne de pompiers.



Bild 18 / figure 18

Holzheizkessel im Feuerwehrgebäude Bülach (Schmid AG).

Chaudière à bois installée dans la caserne de pompiers de Bülach (Schmid AG).

Bauherrschaft: Stadt Bülach, Bülach  
 Architektur: Frank Gloor & Hans Schüpbach, Zürich  
 Gebäudetechnik: Tramonti Gebäudetechnik AG, Winterthur  
 Holzschnitzelheizung: Schmid AG, Eschlikon TG

Technische Daten:

Holzheizung: Schmid UTSR 900.32, Vorschubrostfeuerung  
 Nennleistung 900 kW, regelbar bis 30% der Nennlast  
 Schnitzelsilo: 250 Sm<sup>3</sup>  
 Holzschnitzelverbrauch: 1600 m<sup>3</sup>/a  
 Wärmeproduktion: ca. 1400 MWh/a  
 Fremdenergiezufuhr: im Prozentbereich, Elektrizität für Pumpen, Regelung und Ventile

Verbraucher: Neubau Feuerwehrgebäude 100 kW, bestehendes Feuerwehrgebäude 180 kW, Stadthalle 380 kW, Kindergarten 30 kW, Kirchgemeindehaus 180 kW, private Liegenschaft 12 kW

Maître d'ouvrage: Ville de Bülach, Bülach  
 Architecture: Frank Gloor & Hans Schüpbach, Zurich  
 Technique: Tramonti Gebäudetechnik AG, Winterthur  
 Installation de chauffage à plaquettes de bois: Schmid AG, Eschlikon TG

Caractéristiques techniques:

Installation de chauffage au bois: Schmid UTSR 900.32, installation de chauffage à poussée inférieure  
 Puissance nominale de 900 kW, réglable jusqu'à 30% de la charge nominale  
 Silo à plaquettes de bois: 250 Sm<sup>3</sup>  
 Consommation de plaquettes de bois: 1600 m<sup>3</sup>/a  
 Production de chaleur: env. 1400 MWh/a  
 Apport d'énergie étrangère: en pourcentage, électricité pour pompes, régulation et robinetterie

Consommateurs: nouvelle caserne des pompiers 100 kW, ancienne caserne des pompiers 180 kW, halle municipale 380 kW, jardin d'enfants 30 kW, maison des œuvres paroissiales 180 kW, immeuble privé 12 kW

## 8 Ausblick

Automatische Holzheizungen stehen für verschiedene Brennstoffsortimente zur Verfügung und kommen vor allem für Leistungen ab rund 200 kW zum Einsatz. Die Aufarbeitung von Schwachholz zu Waldhackschnitzeln kann damit ebenso zur Substitution fossiler Brennstoffe beitragen wie die energetische Verwertung von Restholz. Bei korrekter Auswahl des Feuerungssystems und sachgerechtem Betrieb können automatische Holzfeuerungen den erneuerbaren Brennstoff Holz effizient nutzen und in Zukunft einen noch höheren Beitrag an unsere Energieversorgung leisten. Für einen wirtschaftlichen und emissionsarmen Betrieb sind eine korrekte Abstimmung zwischen Feuerung und Brennstoff sowie eine optimale Integration ins Heizsystem notwendig. Um die entsprechenden Anforderungen sicherzustellen, wird für die Realisierung von Neuanlagen eine Abwicklung mit dem Qualitätsmanagement «QM Holzheizwerke» empfohlen, welches in der Schweiz als Instrument für eine optimale Realisierung automatischer Holzheizungen zur Verfügung steht [3]. Weitere Informationen dazu sind unter [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch) zu finden.

## 8 Perspectives

Les installations automatiques de chauffage au bois conviennent pour différentes gammes de combustibles ligneux et s'utilisent surtout pour des puissances à partir d'environ 200 kW. La préparation de bois de petit diamètre pour en faire des plaquettes d'origine forestière peut ainsi contribuer à une substitution des combustibles fossiles et un recyclage énergétique des déchets ligneux. Moyennant une sélection judicieuse du système de chauffage et une exploitation dans les règles de l'art de celui-ci, des installations automatiques de chauffage au bois permettent d'exploiter efficacement un combustible renouvelable et d'apporter à l'avenir une contribution encore plus importante à notre approvisionnement énergétique. Pour garantir une exploitation économique et pauvre en émissions polluantes, il est indispensable d'intégrer parfaitement l'installation et le combustible au système de chauffage. Pour avoir l'assurance de satisfaire aux exigences requises dans le cadre de la réalisation d'une nouvelle installation, il est recommandé d'agir conformément à la procédure de management de la qualité «Quality Management chauffages au bois», instrument utilisé en Suisse pour une réalisation optimisée d'installations automatiques de chauffage au bois [3]. Pour de plus amples informations, prière de consulter le site [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch).

Das heutige Einsatzgebiet automatischer Holzfeuerungen liegt in erster Linie bei der Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser. Bei Grossanlagen kommt auch eine kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom zur Wärmekraftkopplung zum Einsatz. Zur Verfügung stehen heute Feuerungsanlagen mit nachgeschaltetem Dampfkessel, bei welchen der Hochdruckdampf über eine Dampfturbine oder einen Dampfmotor zur Stromerzeugung entspannt wird. Die Investitionskosten entsprechender Anlagen sind allerdings sehr hoch und der elektrische Wirkungsgrad ist mit typischen Werten von lediglich 10% bzw. 20% für Anlagen von 1 MWe bzw. 5 MWe gering. Dampfkraftanlagen sind deshalb vor allem für noch deutlich grössere Leistungen geeignet und sie sollten lange Betriebszeiten erreichen. Letzteres ist bei Einbindung in einen industriellen Betrieb mit einem grossen Wärmebedarf möglich, was zum Beispiel in der Papierindustrie der Fall ist. Die Anzahl entsprechender Anwendungen ist in der Schweiz jedoch begrenzt.

Nebst Dampfkraftanlagen sind verschiedene andere Stromerzeugungsverfahren in Entwicklung und Erprobung. Für typische Leistungen zwischen 500 kWe und 1,5 MWe ist dies die Technik des Organic Rankine Cycle (ORC). Dies ist ebenfalls ein Dampfprozess, der jedoch nicht mit Wasser, sondern einem tiefer siedenden organischen Medium durchgeführt wird und daher von der Feuerungsanlage entkoppelt werden kann. ORC-Anlagen erzielen ähnliche Wirkungsgrade wie normale Dampfanlagen, sie stellen aber dank der Trennung zwischen Wärmeerzeugung und Dampfkreislauf geringere Anforderungen an den Betrieb auf und sind daher für kleine Leistungen vorteilhaft. Für sehr kleine Leistungen von 2 kWe bis 150 kWe wird auch der Einsatz von Stirlingmotoren geprüft, welche als Heissgasmotoren mit externer Wärmezufuhr arbeiten, aber ebenfalls sehr hohe Kosten aufweisen. Daneben ist als Alternative zu Feuerungsanlagen auch die Technik der Holzvergasung mit Gasnutzung in Verbrennungsmotoren von Interesse, wobei typische Leistungen von 100 kWe bis 1 MWe angestrebt werden. Die Holzvergasung in Festbettvergasern konnte sich bis anhin wegen der hohen Störanfälligkeit und des unverhältnismässig hohen Betriebsaufwands nicht durchsetzen. In Frage kommt auch der Einsatz der Vergasung in grosstechnischen Wirbelschichtanlagen, welche durch Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk mit Gasturbine und Dampfturbine elektrische Wirkungsgrade von über 40% ermöglichen würden. Diese Nutzungsart bietet sich vor allem auch für qualitativ minderwertige Energieholzsortimente an, da die Holzvergasung eine anschliessende Nutzung mit sehr geringen Emissionen ermöglicht.

Actuellement, le domaine d'application des installations automatiques de chauffage au bois se concentre prioritairement sur la production de chaleur à des fins de chauffage et de préparation d'eau chaude. Avec des installations importantes, il est également possible de réaliser une production combinée de chaleur et d'électricité par couplage chaleur-force. On dispose aujourd'hui d'installations avec chaudière en aval pour détente la vapeur à haute pression et produire de l'électricité avec une turbine à vapeur ou un moteur à vapeur. Les investissements à consentir pour de pareilles installations sont évidemment importants et le rendement électrique est faible avec des valeurs caractéristiques de seulement 10%, resp. 20% pour des installations de 1 MWe, resp. 5 MWe. Les installations à vapeur conviennent donc surtout pour des puissances importantes et devraient être conçues pour une exploitation de longue durée. Ce dernier point importe en particulier dans le contexte d'une intégration de l'installation à une entreprise industrielle qui consomme de grandes quantités de chaleur indépendamment de la température extérieure, ce qui est par exemple le cas dans l'industrie du papier. Le nombre d'applications correspondantes en Suisse est toutefois limité.

Outre des installations à vapeur, on perfectionne et on teste actuellement différents autres processus de production d'électricité. Pour des puissances caractéristiques comprises entre 500 kWe et 1,5 MWe, on teste la technologie de l'Organic Rankine Cycle (ORC), processus à vapeur qui n'est toutefois pas basé sur de l'eau, mais sur un agent organique à faible point d'ébullition qui peut se découpler de l'installation de chauffage. Les installations ORC atteignent des rendements similaires à ceux d'installations à vapeur normales, mais grâce à la séparation entre la production de chaleur et le circuit de vapeur, elles sont soumises à des exigences moins sévères sur le plan de l'exploitation et conviennent donc bien pour des installations de faible puissance. Pour de très faibles puissances de 2 kWe à 150 kWe, on teste également des moteurs Stirling qui travaillent avec un apport calorifique externe comme des moteurs à air chaud, mais qui impliquent également des frais très élevés. En variante, on s'intéresse également à la technologie de la gazéification du bois avec exploitation des gaz dans des moteurs à combustion pour des puissances caractéristiques de 100 kWe à 1 MWe. Etant donné sa sensibilité élevée aux dysfonctionnements et ses frais d'exploitation disproportionnés, la technologie de la gazéification du bois dans des gazogènes à lit fixe n'a pas pu s'imposer jusqu'ici. On travaille également sur l'utilisation de la gazéification dans de grosses installations à lit fluidisé qui, moyennant l'exploitation des gaz dans une centrale combinée dotée d'une turbine à gaz et d'une turbine à vapeur, autoriserait des rendements supérieurs à 40%. Ce mode d'exploitation convient surtout pour des gammes de bois d'énergie de qualité inférieure, car la gazéification du bois se prête en l'occurrence à une combustion de la matière première assortie de très faibles émissions polluantes.

## 9 Literatur

- [1] Nussbaumer, Th.: «Verbrennung», Energie aus Biomasse, Springer, Berlin 2001, ISBN 3-540-64853-42001, 287–322
- [2] Nussbaumer, Th.: «Regelung von automatischen Heizkesseln, Régulation des chaudières automatiques», Bois énergie / Holzenergie 3 1999, 44–51
- [3] Good, J. et al: Planungshandbuch, Band 4 der Schriftenreihe QM Holzheizwerke, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2004, ISBN 3-937441-94-8
- [3] Nussbaumer, Th.: «Feinstaubabscheider für automatische Holzfeuerungen», HK Gebäudetechnik, 9 (2006), 24–31

## 9 Bibliographie

- [1] Nussbaumer, Th.: «Verbrennung», Energie aus Biomasse (combustion, énergie tirée de la biomasse), Springer, Berlin, 2001, ISBN 3-540-64853-42001, 287–322
- [2] Nussbaumer, Th.: «Regelung von automatischen Heizkesseln, régulation des chaudières automatiques», Bois-énergie, Holzenergie 3 1999, 44–51
- [3] Good, J. et al: Planungshandbuch, Band 4 der Schriftenreihe QM Holzheizwerke (manuel de planification, tome 4 de la série QM chauffages au bois), C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, 2004, ISBN 3-937441-94-8
- [3] Nussbaumer, Th.: «Feinstaubabscheider für automatische Holzfeuerungen» (séparateurs de poussières fines pour installations automatiques de chauffage au bois), HK Gebäudetechnik, 9 (2006), 24–31