

Holzenergie

Thomas Nussbaumer, PD Dr. sc. techn.
 Hochschule Luzern, Technik und Architektur, CH-6048 Horw/LU
 Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zürich

Teil 1: Einleitung und Grundlagen

1	Einleitung	1
1.1	Übersicht	1
1.2	Bedeutung der Holzenergie	2
1.3	Potenzial an Energieholz	3
1.4	Energieholzsportimente	5
1.5	Wassergehalt und Holzfeuchtigkeit von Holz	7
1.6	Energiedichte und Lagervolumen	8
2	Grundlagen	9
2.1	Holzbrennstoffe	9
2.2	Teilprozesse der Holzverbrennung	10
2.3	Schadstoffe	10
2.4	Kohlenmonoxid und Einfluss der Verbrennungsluft	12
2.5	Stickoxide	12
2.6	Feinstaub	13
2.7	Anforderungen für vollständigen Ausbrand	14
2.8	Ökobilanz von Holzbrennstoffen	15
3	Literatur	16
4	Adressen	16

Teil 1: Einleitung und Grundlagen

1 Einleitung

1.1 Übersicht

Holz deckt in der Schweiz rund 6 Prozent des Wärme- und 3 Prozent des Gesamtenergiebedarfs. Energieholz ist damit nach der Wasserkraft der zweitwichtigste erneuerbare und einheimische Energieträger. Als Folge der drohenden Klimaveränderung durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie wegen der Endlichkeit der Ressourcen erlangt Holz wieder eine verstärkte Bedeutung als Rohstoff und Energieträger. Energieholz umfasst einerseits direkt im Wald bereitgestellte Sortimente an Stückholz und Waldhackschnitzel. Daneben kommen zunehmend auch Holzpellets zum Einsatz. Im Weiteren fällt bei der Holzverarbeitung Restholz in Form von Rinde, Sägemehl, Spänen, Verschnittstücken und vielem mehr an, das in verschiedenen Formen als Energieholz eingesetzt wird und rund die Hälfte der Holzenergienutzung ausmacht. Beim Abbruch von Gebäuden und bei der Entsorgung von Holzprodukten fällt schliesslich Altholz an, das in grösseren Anlagen mit Abgasreinigung zur Energieerzeugung eingesetzt werden kann. Da Holz nach seinem Einsatz als Werkstoff noch zur Energieerzeugung dient, ergänzen sich bauen mit Holz und heizen mit Holz in geeigneter Weise.

Bei der heutigen Energieversorgung mit Holz steht die Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser im Vordergrund. Holz trägt damit vor allem zur Substitution von Heizöl und Erdgas bei. Holzfeuerungen werden in der Leistungsklasse von handbeschickten Zimmeröfen bis zu automatisch beschickten Grossanlagen in zahlreichen Ausführungen angeboten. Um in allen Fällen eine optimale Lösung zu gewährleisten, sollte die Wahl des Energieträgers bereits in einer frühen Phase der Planung zur Diskussion gestellt werden. Bild 1 zeigt dazu eine Entscheidungshilfe für die Vorauswahl der in Frage kommenden Varianten.

Energie-bois

Thomas Nussbaumer, privat-docent, Dr. sc. techn.
 Ecole supérieure de Lucerne, technique et architecture,
 CH-6048 Horw/LU
 Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zurich

Partie 1: introduction et notions fondamentales

1	Introduction	1
1.1	Aperçu général	1
1.2	Importance de l'énergie-bois	2
1.3	Potentiel de l'énergie-bois	3
1.4	Variétés d'énergie-bois	5
1.5	Teneur en eau et humidité du bois	7
1.6	Densité énergétique et volume de stockage	8
2	Notions fondamentales	9
2.1	Combustibles ligneux	9
2.2	Processus partiels de la combustion du bois	10
2.3	Substances nocives	10
2.4	Monoxyde de carbone et influence de l'air de combustion	12
2.5	Oxydes d'azote	12
2.6	Poussières fines	13
2.7	Exigences requises pour une combustion intégrale	14
2.8	Ecobilan des combustibles ligneux	15
3	Bibliographie	16
4	Adresses	16

Partie 1: introduction et notions fondamentales

1 Introduction

1.1 Aperçu général

En Suisse, le bois couvre approximativement 6 % des besoins calorifiques ou 3 % de la consommation énergétique totale. Après la force hydraulique, l'énergie-bois est donc, par son importance, le deuxième vecteur énergétique indigène renouvelable. Conséquence du changement climatique imputable à l'utilisation de combustibles fossiles et à l'épuisement progressif des ressources, le bois reprend aujourd'hui de l'importance comme matière première et vecteur énergétique.

L'énergie-bois comprend d'une part des bûches et plaquettes de bois prélevées directement dans les forêts. Parallèlement, les pellets prennent de plus en plus d'importance. Par ailleurs, le travail du bois procure des déchets ligneux disponibles sous forme d'écorces, de sciure, de copeaux, de déchets de débitage, etc., déchets qui peuvent s'utiliser sous différentes formes et qui correspondent approximativement à la moitié de l'énergie-bois consommée. La démolition de bâtiments et l'élimination de produits ligneux procurent du bois de récupération qui peut s'utiliser dans de grandes installations de chauffage dotées d'un système d'épuration des gaz brûlés afin de produire de l'énergie. Comme le bois est encore susceptible de servir pour produire de l'énergie après avoir été utilisé comme matériau, on constate que le bois de construction et le chauffage au bois se complètent à la perfection.

En matière d'approvisionnement énergétique à base d'énergie-bois, la production de chaleur à des fins de chauffage et de préparation d'eau chaude figure aujourd'hui au premier plan. Le bois est en l'occurrence surtout un produit de substitution pour remplacer le fuel et le gaz naturel. Le marché propose de nombreuses variantes et exécutions d'installations de chauffage au bois, du simple poêle à alimentation manuelle pour un local individuel à la grosse installation à alimentation automatique. Pour garantir systématiquement une solution optimale, il convient de discuter du choix du vecteur énergétique au stade initial déjà de la planification. La figure 1 présente en l'occurrence un instrument auxiliaire de décision pour sélectionner les variantes susceptibles d'entrer en ligne de compte.

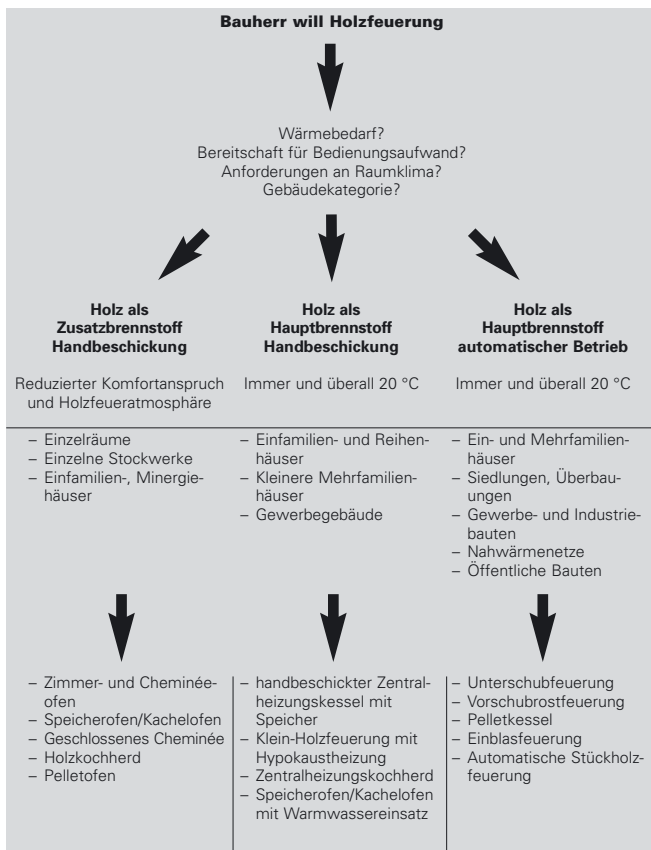


Bild 1
Entscheidungsablauf zur Wahl der geeigneten Holzfeuerung

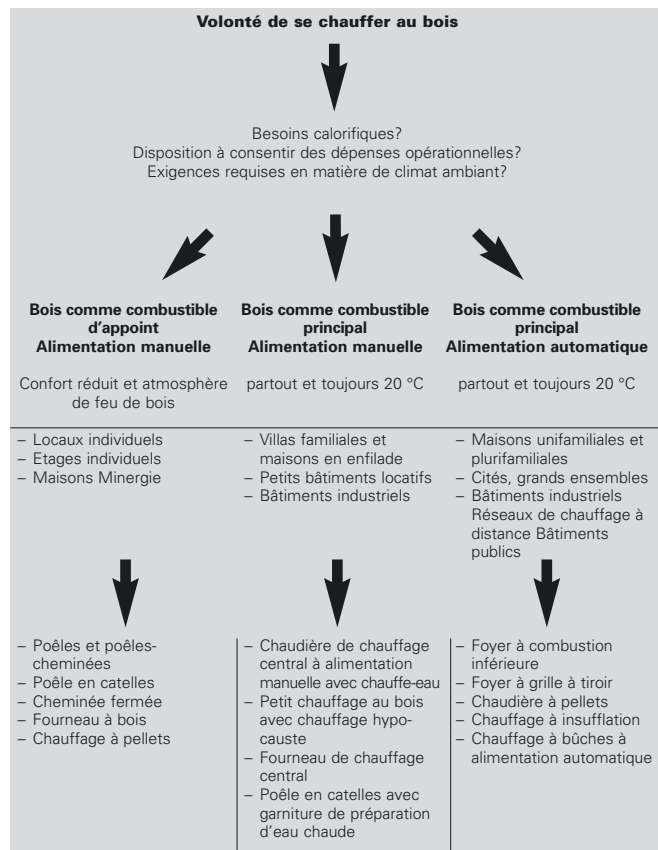


Figure 1
Processus de décision pour la sélection d'une installation de chauffage au bois

Um die Eignung und das Interesse an einer Holzheizung zu beurteilen, muss die Bauherrschaft die wichtigsten Eigenheiten einer Holzheizung kennen, so etwa die Möglichkeiten der Raumgestaltung mit Holzfeuerungen in Wohnräumen, die Bedienung einer Holz-Zentralheizung, die Auswirkungen beim Anschluss an einen Wärmeverbund – nämlich Wegfall von Heizraum und Brennstofflager im Haus –, aber auch Auswirkungen auf Wirtschaftlichkeit und Umwelt. Im vierteiligen Beitrag «Holzenergie» werden dazu folgende Aspekte der Holzenergienutzung vorgestellt:

- Teil 1: Einleitung und Grundlagen
- Teil 2: Handbeschickte Holzheizungen
- Teil 3: Pelletheizungen
- Teil 4: Automatische Holzfeuerungen

1.2 Bedeutung der Holzenergie

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts beruhte die wirtschaftliche Produktion fast ausschliesslich auf Holz, Wind und Muskelkraft. Mit der Industrialisierung übernahmen Ende des 19. Jahrhunderts die Kohle und Mitte des 20. Jahrhunderts Erdöl und Erdgas die zentrale Rolle in der Energieversorgung. Damit verbunden war ein sprunghafter Anstieg des Weltenergieverbrauchs. So hat sich zum Beispiel der Verbrauch in der Schweiz seit Ende des Zweiten Weltkriegs beinahe verzehnfacht. Der Welt-Durchschnittsverbrauch an Primärenergie beträgt heute rund 2,2 kW pro Person oder rund 50 kWh pro Tag und Person. Dies ist etwa die 25-fache Menge dessen, was der Mensch als Nahrung benötigt und es entspricht einem Energieinhalt von etwas mehr als 4 Litern Heizöl oder 10 kg trockenem Brennholz. In der Schweiz beträgt der durchschnittliche Verbrauch unter Berücksichtigung der grauen Energie rund 6,5 kW.

Nach Erhebungen der Internationalen Energie Agentur wird der Weltenergiebedarf heute zu 80 % durch fossile und mit der Kernenergie zusammen gar zu 87 % durch nichterneuerbare Ressourcen gedeckt (Tabelle 1). Die erneuerbaren Energieträger decken dagegen lediglich rund 13 % des Bedarfs. Unter den erneuerbaren Energieträgern ist die Biomasse global mit 10 % Anteil die wichtigste Quelle, Wasserkraft und weitere erneuerbare Energien sind mit weniger als 3 % nur von geringer Bedeutung. Biomasse umfasst dabei Holz, landwirtschaftliche Stoffe sowie Abfall.

In der Schweiz trägt Energieholz zu rund 3,4 % zum heutigen Energieverbrauch bei. Dank der gut nutzbaren Wasserkraft weist die Schweiz zwar einen überdurchschnittlich hohen Deckungsgrad mit erneuerbarer Energie auf, der pro-Kopf-Verbrauch müsste aber zur Erreichung des Nachhaltigkeitsziels von 2000 W pro Person um rund 70 % reduziert werden.

Pour analyser l'aptitude et l'intérêt d'une installation de chauffage au bois, le maître de l'ouvrage doit connaître ses principales particularités, à savoir par exemple les possibilités d'aménagement intérieur, le pilotage d'une centrale de chauffage au bois, les conséquences d'un raccordement sur un réseau de chauffage à distance – c'est-à-dire suppression de la chaufferie et du stock de combustible au sous-sol –, mais aussi conséquences sur la rentabilité et l'environnement. Les quatre parties de l'article «Energie-bois» traitent des aspects suivants de l'utilisation de ladite énergie-bois:

- Partie 1: introduction et notions fondamentales
- Partie 2: installations de chauffage au bois à alimentation manuelle
- Partie 3: installations de chauffage à pellets
- Partie 4: installations de chauffage à alimentation automatique

1.2 Importance de l'énergie-bois

Jusqu'au milieu du 19^e siècle, la production économique reposait presque exclusivement sur le bois, le vent et la force musculaire. Avec l'industrialisation, le charbon à la fin du 19^e siècle, puis le pétrole et le gaz naturel au milieu du 20^e siècle ont pris la relève et joué un rôle capital dans le secteur de l'approvisionnement énergétique, occasionnant un accroissement vertigineux de la consommation mondiale d'énergie. Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, la consommation d'énergie a par exemple pratiquement décuplé en Suisse. La consommation mondiale moyenne d'énergie primaire est aujourd'hui de l'ordre de 2,2 kW par personne ou environ 50 kWh par jour et par personne, ce qui correspond approximativement à 25 fois la quantité nécessaire à l'alimentation d'un homme, resp. la teneur énergétique de plus de 4 litres d'huile de chauffage ou de 10 kg de bois de feu sec. En Suisse et compte tenu de l'énergie grise, la consommation moyenne est d'environ 6,5 kW.

Selon des enquêtes réalisées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation mondiale d'énergie est aujourd'hui couverte à 80 % par des énergies fossiles, et compte tenu de l'énergie nucléaire, même à 87 % par des ressources non renouvelables (tableau 1). Les vecteurs énergétiques renouvelables ne couvrent par contre que 13 % environ de la consommation. Parmi les vecteurs énergétiques renouvelables, la biomasse représente la source principale avec 10 % environ, alors que la force hydraulique et les autres énergies renouvelables n'interviennent que pour moins de 3 %. La biomasse inclut en l'occurrence le bois, les matières agricoles et les déchets.

En Suisse, l'énergie-bois contribue pour 3,4 % environ à la consommation actuelle d'énergie. Grâce à la force hydraulique, la Suisse présente certes un degré de couverture supérieur à la moyenne en matière d'énergie renouvelable, mais la consommation par personne devrait être réduite d'environ 70 % pour arriver à l'objectif de durabilité fixé à 2000 W par personne.

Tabelle 1

Energieverbrauch der Welt (Jahr 2006, [1]) und der Schweiz (Jahr 2005, [2]) aufgeteilt nach Energieträgern.

*davon Holz: 3,4 %, Rest: Abfall.

	Welt (Primärenergie)	Schweiz (Endenergie)
Nichtererneuerbare Energieträger	87 %	78 %
Erdöl	35 %	57 %
Kohle	24 %	1 %
Erdgas	21 %	11 %
Kernenergie	7 %	9 %
Erneuerbare Energieträger	13 %	22 %
Wasserkraft	2 %	14 %
Biomasse	10 %	6 % *
Sonne direkt und Wind	1 %	1 %

Die Folgen des hohen Ressourcenverbrauchs sind Klimaveränderungen sowie eine Belastung von Luft, Böden und Gewässern mit Schadstoffen. Bis Ende dieses Jahrhunderts wird mit einer globalen Erwärmung zwischen 1,4 °C und 5,8 °C gerechnet. Da die Energieversorgung gleichzeitig eine Schlüsselfunktion unserer Zivilisation ist, muss sie langfristig gesichert werden, was bei der heutigen Abhängigkeit von nichterneuerbaren Energien nicht gewährleistet ist. In der Schweiz wird seit vielen Jahren eine nachhaltige Energieversorgung durch verschiedene Förderprogramme angestrebt. Diese konnten bis heute jedoch eine weitere Zunahme des Energieverbrauchs nicht verhindern. Durch Unterzeichnung des Kyoto-Protokolls hat sich die Schweiz allerdings zur Reduktion der Treibhausgasemissionen auf 8 Prozent unter den Stand von 1990 verpflichtet. In der Folge davon wurde im CO₂-Gesetz ein Reduktionsziel für CO₂, das in der Schweiz 83 Prozent der klimawirksamen Emissionen ausmacht, von 10 Prozent gegenüber 1990 festgelegt. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Massnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz sowie der Einsatz erneuerbarer Energien erforderlich. Holz weist dazu das grösste rasch und mit bewährter Technologie nutzbare Potenzial auf, das es in Ergänzung zu Effizienzverbesserungen zu nutzen gilt. Um eine rasche Umsetzung zu erzielen gibt es zahlreiche Förderprogramme und Finanzhilfen von Bund und Kantonen sowie zeitlich begrenzt durch die Stiftung Klimarappen. Holzenergie Schweiz (www.holzenergie.ch) steht für Auskünfte zu den aktuellen Möglichkeiten und zur Unterstützung bei der Beantragung zur Verfügung.

1.3 Potenzial an Energieholz

Die in der Schweiz in Betrieb stehenden Holzfeuerungen nutzen jährlich rund 3 Millionen Kubikmeter Holz (gemäss Erhebungen von 2004 rund 2,6 Mio m³ (Tabelle 2), gemäss Erhebung von 2006 rund 3,1 Mio m³ (Tabelle 3). Sie substituierten damit über 500'000 Tonnen Heizöl und ersparten unserer Atmosphäre mehr als 2,5 Millionen Tonnen fossiles CO₂. Das Energieholz wird heute je rund zur Hälfte in handbeschickten und in automatischen Feuerungen verwertet.

Der heutigen Nutzung steht ein Potenzial von über 5 Millionen Kubikmetern gegenüber, das ohne Übernutzung der Wälder jährlich nachwächst. Die Energieholznutzung kann somit noch rund verdoppelt werden, was aus mehreren Gründen sinnvoll ist. Zum einen kann durch die Substitution fossiler Brennstoffe der CO₂-Eintrag in die Atmosphäre vermindert werden. Zum andern schafft die Bereitstellung von Holz Arbeitsplätze im Inland. Eine vermehrte Holznutzung unterstützt aber auch die Waldpflege und die Erhaltung der vielfältigen Funktionen des Waldes als Schutz vor Lawinen, Erosion und Steinschlag und als Erholungsraum. Bei der Holzenergie entfallen lange Transporte, der Einsatz grauer Energie ist gering und Risiken durch Transportunfälle und Leckage entfallen (Bild 2).

Tabelle 2

Nutzung, Potenzial und Zusatzpotenzial (Differenz zwischen Potenzial und Nutzung) an Energieholz in der Schweiz im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch (GEV) im Jahr 2004 angegeben als Endenergie [3]. Daten zu Energieholz gemittelt aus [4], [5] und [6]. Da die Angaben zum Energieholz von 2004 stammen, sind auch die Angaben zum GEV 2004 verwendet. Wegen einer Änderung der Datenerhebung weichen diese Werte von den Angaben zum GEV 2005 ab. Bedeutung von m³ nach Tabelle 4. 1 PJ = 10¹⁵ J.

	Nutzung			Potenzial			Zusatzpotenzial		
	Mio m ³ /a	PJ/a	GWh/a	Mio m ³ /a	PJ/a	GWh/a	Mio m ³ /a	PJ/a	GWh/a
Waldholz	1.2	10.4	2'880	4.1	35.3	9'806	2.9	24.9	6'926
Restholz	1.1	9.5	2'640	1.2	10.3	2'854	0.1	0.8	214
Altholz	0.3	2.6	720	0.8	7.0	1'951	0.5	4.4	1'231
Holz Total	2.6	22.5	6'240	6.1	52.6	14'611	3.5	30.1	8'371
GEV 2004		873	242'500						
davon Elektrizität		202	56'000						
Holz/GEV		2.6 %			6.1 %			3.5 %	

Tableau 1

Consommation d'énergie dans le monde (année 2006, [1]) et en Suisse (année 2005, [2]), ventilation en fonction des vecteurs énergétiques.

*dont bois: 3,4 %, solde: déchets.

	Monde (énergie primaire)	Suisse (énergie finale)
Vecteurs énergétiques non renouvelables	87 %	78 %
Pétrole	35 %	57 %
Charbon	24 %	1 %
Gaz naturel	21 %	11 %
Energie nucléaire	7 %	9 %
Vecteurs énergétiques renouvelables	13 %	22 %
Force hydraulique	2 %	14 %
Biomasse	10 %	6 % *
Soleil direct et vent	1 %	1 %

Les conséquences négatives de la forte consommation des ressources se traduisent par des changements climatiques ainsi qu'une pollution de l'atmosphère, des sols et des eaux par des substances nocives. D'ici la fin du siècle, il faut compter avec un réchauffement global compris entre 1,4 °C et 5,8 °C. Comme l'approvisionnement en énergie est simultanément une fonction clé de notre civilisation, elle doit être assurée à long terme, ce qui n'est actuellement pas garanti du fait de notre dépendance à l'égard des énergies non renouvelables. En Suisse, on s'efforce depuis des années de mettre en place un approvisionnement énergétique durable moyennant divers programmes de promotion. Jusqu'ici, ces programmes n'ont toutefois pas pu empêcher d'enregistrer une nouvelle augmentation de la consommation d'énergie. En signant le Protocole de Kyoto, la Suisse s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8 % par rapport à leur niveau de 1990. Par la suite, la loi sur le CO₂ a fixé un objectif de réduction de 10 % par rapport à 1990 pour le gaz carbonique, gaz qui représente en Suisse 83 % des émissions exerçant une action négative sur le climat. Pour atteindre cet objectif, il est indispensable de prendre des mesures en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et d'utiliser des énergies renouvelables. Le bois représente en l'occurrence le principal potentiel rapidement exploitable moyennant une technologie dûment éprouvée en vue de compléter les efforts entrepris pour améliorer l'efficacité des mesures. Dans ce contexte, il existe de nombreux programmes de promotion et autres subsides financiers de la Confédération, des cantons et de la Fondation Centime Climatique. Energie-bois Suisse (www.holzenergie.ch) se tient à disposition pour fournir de plus renseignements sur les possibilités actuelles et pour apporter son aide en cas de demande spécifique.

1.3 Potentiel de l'énergie-bois

Les installations de chauffage au bois en service en Suisse consomment chaque année environ 3 millions de mètres cubes de bois (env. 2,6 millions m³ selon des enquêtes réalisées en 2004 – tableau 2, env. 3,1 millions m³ selon une enquête réalisée en 2006 – tableau 3). Le bois s'est donc substitué à plus de 500'000 tonnes d'huile de chauffage et a permis à l'atmosphère de réaliser une économie de plus de 2,5 millions de tonnes de CO₂ fossile. L'énergie-bois s'utilise aujourd'hui pour moitié dans des installations à alimentation manuelle et pour moitié dans des installations à alimentation automatique.

Sans qu'elles soient surexploitées, le potentiel actuel de nos forêts est de plus de 5 millions de mètres cubes de bois par année. La consommation d'énergie-bois peut donc sans autre être doublée, ce qui se révèle judicieux pour plusieurs raisons. D'une part, il est possible de réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère par substitution des combustibles fossiles. D'autre part, la préparation du bois doit permettre de créer des emplois dans notre pays. Une exploitation accrue de nos ressources en bois doit aussi contribuer à l'entretien et la sauvegarde de nos forêts qui remplissent en l'occurrence de multiples fonctions telles que la protection contre les avalanches, l'érosion et les chutes de pierres, resp. servent d'espaces de détente et de repos. L'énergie-bois doit en outre permettre d'éviter de longs transports, d'abaisser la consommation d'énergie grise et d'éviter les risques liés à des accidents de transport ou des fuites (figure 2).

Tableau 2

Exploitation, potentiel et potentiel complémentaire (différence entre le potentiel et la mise à profit) de l'énergie-bois en Suisse comparativement à la consommation totale d'énergie (CTE) en 2004 sous forme d'énergie finale [3]. Données relatives à l'énergie-bois selon [4], [5] et [6]. Comme les données remontent à 2004, on a également utilisé les données relatives à la CTE 2004. Etant donné une modification intervenue quant à la méthode de saisie des données, celles-ci divergent par rapport aux données relatives à la CTE 2005. Signification du m³ selon tableau 4. 1 PJ = 10¹⁵ J.

	Exploitation			Potentiel			Potentiel complémentaire		
	mio m ³ /a	PJ/a	GWh/a	mio m ³ /a	PJ/a	GWh/a	mio m ³ /a	PJ/a	GWh/a
Bois de forêt	1.2	10.4	2'880	4.1	35.3	9'806	2.9	24.9	6'926
Déchets ligneux	1.1	9.5	2'640	1.2	10.3	2'854	0.1	0.8	214
Bois de récupération	0.3	2.6	720	0.8	7.0	1'951	0.5	4.4	1'231
Total bois	2.6	22.5	6'240	6.1	52.6	14'611	3.5	30.1	8'371
CTE 2004		873	242'500						
dont électricité		202	56'000						
Bois / CTE		2.6 %			6.1 %			3.5 %	

Tabelle 3

Installierte Anlagen und Energieholzverbrauch (mit modifizierter Erfassungsmethodik) in der Schweiz im Jahr 2005 [7]. Der Anteil der Holzpellets, welche in den Kategorien 1 bis 3 genutzt werden, beträgt 0.1 Mio m³/a. Bedeutung von m³ nach Tabelle 4.

Kategorie	Anzahl Anlagen (Primärenergie)	Energieholzverbrauch Mio m ³ /a
1 Einzelraumheizungen	602'279	0.8
2 Gebäudeheizungen	91'420	1.0
3 Automatische Holzfeuerungen (> 50 kW)	5'372	1.0
4 Altholzfeuerungen	44	0.3
Total		3.1

Tableau 3

Installations en service et consommation d'énergie-bois (avec méthode de saisie modifiée) en Suisse en 2005 [7]. La part des pellets utilisées dans les catégories 1 à 3 se chiffre à 0.1 million m³/a. Signification du m³ selon tableau 4.

Catégorie	Nombre d'installations (énergie primaire)	Consommation d'énergie-bois mio m ³ /a
Chauffages ...		
1 ...par pièce individuelle	602'279	0.8
2 ...par bâtiment	91'420	1.0
3 ...automatiques (> 50 kW)	5'372	1.0
4 ...au bois de récupération	44	0.3
Total		3.1

Bild 2

Gründe für Holzenergie

1. Volkswirtschaftlich sinnvoll
– Diversifizierung der Energieversorgung
– Unabhängigkeit in Krisenzeiten
– Erträge für Wald- und Holzwirtschaft
– Arbeitsplätze und regionale Wertschöpfung
2. Umweltverträglich
– Erneuerbar
– CO ₂ -neutral
– Kurze und risikoarme Transporte, risikoarme Aufbereitung und Lagerung
– Geringer Einsatz grauer Energie
3. Bequem
– Hoher Stand der Technik, geringer Wartungsaufwand
– Vielseitiger Einsatz
– Hoher Komfort
– Beim Anschluss an einen Wärmeverbund mit Holz: Platzgewinn im Haus

Figure 2

Arguments en faveur de l'énergie-bois

1. Economiquement intéressant
– Diversification de l'approvisionnement en énergie
– Indépendance en période de crise
– Recettes pour l'industrie forestière et du bois
– Emplois et plus-value régionale
2. Compatibilité écologique
– Energie renouvelable
– Neutre en matière de CO ₂
– Brèves distances de transport, préparation relativement dépourvue de risques, stockage
– Faible consommation d'énergie grise
3. Solution extrêmement pratique
– Technologie haut de gamme, faibles dépenses de maintenance
– Multiples possibilités d'application
– Confort élevé
– En cas de raccordement sur un réseau de chauffage à distance au bois, gain de place dans la maison

Tabelle 4

Masseinheiten für Energieholz. Für Energieholz aus dem Wald gilt typischerweise (siehe Tabelle 7): 1 m³ ≈ 2.8 Sm³ ≈ 1.4 Ster.

Symbol	Bedeutung
m ³	Kubikmeter (feste Holzmasse ohne Zwischenraum)
fm	Festmeter, 1 fm = 1 m ³
Sm ³	Schüttkubikmeter
Ster	1x1x1 m aufgeschichtete Holzscheiter (mit Zwischenräumen)

Tableau 4

Unités de mesure pour l'énergie-bois. Pour de l'énergie-bois d'origine forestière, on applique la formule typique suivante (voir tableau 7): 1 m³ ≈ 2.8 Sm³ ≈ 1.4 stère

Symbol	Désignation
m ³	mètre cube (masse solide de bois sans vides intermédiaires)
fm	mètre cube en billon, 1 fm = 1 m ³
Sm ³	mètre cube de plaquettes ou granulés en vrac
Stère	1x1x1 m, de bûches empilées (avec vides intermédiaires)

1.4 Energieholzsortimente

Zur Nutzung von Energieholz kommen verschiedene Formen der Aufbereitung zum Einsatz. Im Weiteren muss unterschieden werden zwischen unbelastetem Holz sowie solchen Sortimenten, welche Fremd- oder Zusatzstoffe aus der Verarbeitung oder Gewinnung enthalten. Die Zuordnung zu den verschiedenen Kategorien ist durch die Herkunft des Holzes weitgehend festgelegt. Für verschiedene Kategorien an Holz gelten unterschiedliche Vorschriften für die Verbrennung und die Ascheentsorgung. Aufgrund der Herkunft sind folgende Sortimente zu unterscheiden:

Brennholz für handbeschickte Holzfeuerungen

Für handbeschickte Holzfeuerungen wird Stückholz in Form von Spalten und Scheitern in verschiedenen Längen bereitgestellt. Die gebräuchlichsten Längen sind 1 m (Lagerung am Waldrand) und Teile davon, also 50 cm, 33 cm und 25 cm. Vor der Verwertung in Stückholzfeuerungen ist auf eine sachgemässe Trocknung zu achten. Das Holz sollte dazu während zwei Jahren an einem trockenen, gut durchlüfteten Platz gelagert werden.

Waldhackschnitzel

Bei der indirekten Versorgungskette wird Energieholz in Form von Holzschnitzeln oder Rundholz in einer Halle oder einem Rundholzlager zwischengelagert. Eine Zwischenlagerung ist insbesondere bei Höhenlagen mit beschränkter Zugänglichkeit des Waldes im Winter erforderlich. Dabei erfolgt eine Vortrocknung des Brennstoffs. Bei der direkten Versorgungskette wird das Holz im Wald zu Holzschnitzeln verarbeitet und direkt zum Verbraucher transportiert. Die direkte Versorgungskette ist kostengünstiger, weil die Zwischenlagerung entfällt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Versorgungssicherheit auch im Winter gewährleistet ist. Zudem ist zu beachten, dass solche Waldhackschnitzel einen Wassergehalt von bis zu 60 % aufweisen können. Eine Vortrocknung auf einen Wassergehalt von unter 50 % kann erzielt werden, wenn die gefällten und belaubten Bäume vor der Verarbeitung während einiger Wochen oder Monate im Wald liegen. Gleichzeitig bleibt dabei der grösste Anteil an Laub und Nadeln als Quelle der Mineralstoffe im Wald.

Landschaftspflegeholz

Bei der Pflege von Hecken und Böschungen fällt Landschaftspflegeholz an, das grössere Mengen von Pappel- und Weidenholz enthalten kann. Diese Sortimente gelten als schwierig zu verbrennen, was bei der Versorgung zu beachten ist.

Sägereihackschnitzel

In Sägereien fällt in der Regel naturbelassenes Energieholz an (Schwarten, Spreissel, Rinde und Sägespäne), das entweder zur Wärmever-sorgung der Sägerei mit einem stationären Hacker verarbeitet oder zu einem Schnitzellager in der Nähe transportiert und verarbeitet wird.

Holzpellets

Holzpellets sind zylinderförmige Presslinge, welche aus naturbelas-senem Holz hergestellt werden. Als Rohmaterial dienen meist Sägemehl oder Hobelspäne. Sägemehl kann nach einer Trocknung in einer Pelletieranlage verpresst werden. Zur Herstellung von Holzpellets können geringe Mengen kontrollierter und rein biogener Zusatzstoffe wie zum Beispiel Kartoffelstärke zugegeben werden. Andere Bindemittel sind nicht erlaubt. Da Sägemehl keine Rinde enthält, weisen Holzpellets einen geringen Aschegehalt auf. Im Weiteren ist der Heizwert hoch und die Eigenschaften der Pellets sind weitgehend konstant, weshalb Holzpellets ein idealer Brennstoff für Pelletfeuerungen kleiner Leistung ist. Nebst rindenfreiem Holz können auch andere biogene Abfälle wie Rinde, Stroh, Getreideabgang oder Reste aus der Nahrungs-mittelproduktion pelletiert werden. Solche Pellets sind aber ungeeignet und nicht zugelassen für normale Pelletfeuerungen, da sie stark erhöhte Emissionen verursachen und aufgrund der hohen Aschegehalte und der Verschlackung den Anlagenbetrieb und die Lebensdauer stark beeinträchtigen. Für konventionelle Holzpelletheizungen ist deshalb auf die Einhaltung strenger Qualitätsanforderungen für die Pellets zu achten, während andere biogene Pellets nur für grössere Anlagen mit Abgasreinigung geeignet sind.

1.4 Variétés d'énergie-bois

Diverses formes de préparation entrent en ligne de compte pour utiliser de l'énergie-bois. Il convient par ailleurs de distinguer entre du bois brut et des variétés de bois recelant des substances ou additifs déposés lors de leur mise en oeuvre, leur préparation ou leur abattage. L'attribution aux différentes catégories s'effectue principalement en fonction de la provenance du bois. Pour les diverses catégories de bois, différentes prescriptions sont applicables en ce qui concerne la combustion et l'élimination des cendres. En fonction de leur provenance, on distingue les variétés suivantes:

Bois de feu pour installations de chauffage au bois à alimentation manuelle

Pour de pareilles installations de chauffage, on débite des bûches, rondins et quartiers de diverses longueurs. Les longueurs les plus fréquentes sont de 1 m (stockage de rondins de 1 m à la lisière de la forêt) avec sous-multiples de 50 cm, 33 cm et 25 cm. Avant de brûler les bûches, il convient de les faire sécher dans les règles de l'art. Le bois doit en l'occurrence s'entreposer pendant 2 ans à un endroit sec et bien aéré.

Plaquettes de bois de forêt

Dans le cadre d'une chaîne indirecte d'approvisionnement, l'énergie-bois est stockée intermédiairement dans une halle ou un entrepôt sous forme de plaquettes ou de rondins. Un stockage intermédiaire est tout particulièrement nécessaire en altitude lorsque l'accès à la forêt est limité en hiver. On procède en l'occurrence à un préséchage du combustible. Avec une chaîne directe d'approvisionnement, le bois est décheté en forêt et livré directement au consommateur. La chaîne directe d'approvisionnement est plus économique, car le stockage intermédiaire est supprimé. Il faut toutefois veiller à ce que la sécurité d'approvisionnement soit également garantie en hiver. Il convient par ailleurs tenir compte du fait que des plaquettes de bois peuvent présenter un teneur en eau susceptible d'atteindre 60 %. Un préséchage à une teneur en eau inférieure à 50 % est réalisable en laissant reposer les arbres abattus pendant quelques semaines ou quelques mois en forêt avant de les mettre en oeuvre ou de les décheté. Simultanément, la majeure partie des feuilles ou des aiguilles reste en l'occurrence en forêt pour servir de source de substances minérales.

Bois provenant de l'entretien paysager

L'entretien des haies et talus procure du bois provenant d'aménagements paysagers, bois qui peut comporter une proportion importante de bois de peuplier ou de bois de saule. Ces variétés de déchets sont réputées difficiles à brûler, ce dont il faut tenir compte dans le contexte de l'approvisionnement.

Déchets ligneux provenant de scieries

Les scieries produisent généralement de l'énergie-bois à l'état naturel (dosses, délignures, écorces et copeaux) qui passent dans un hachoir stationnaire afin d'assurer l'approvisionnement calorifique de l'entreprise ou qui sont transportés et mis en oeuvre à proximité dans un local de stockage.

Pellets

Les pellets sont des granulés de bois de forme cylindrique obtenus à partir de bois naturel. Comme matière première, on utilise généralement de la sciure ou des copeaux. Après séchage, la sciure est comprimée sous forme de granulés dans une presse. Pour produire des pellets, il est possible d'ajouter à la sciure de petites quantités d'additifs biogènes soigneusement contrôlés, à savoir par exemple de l'amidon de pomme de terre. D'autres liants ne sont pas autorisés. Comme la sciure ne contient pas d'écorces, les pellets se caractérisent par une faible teneur en cendres. De plus, le pouvoir calorifique des pellets est élevé et leurs propriétés sont relativement constantes, raison pour laquelle ils constituent un combustible idéal pour des installations de chauffage de faible puissance. Outre du bois écorcé, il est aussi possible d'utiliser d'autres déchets biogènes tels qu'écorces, paille, déchets céréaliers ou résidus provenant de la production de denrées alimentaires pour produire des pellets. De pareils pellets ne conviennent toutefois pas et ne sont pas autorisés pour alimenter des installations de chauffage normales, car ils occasionnent des nuisances importantes et perturbent fortement l'exploitation et la durabilité de l'installation en raison de leur teneur élevée en cendres et de leur scorification. Avec des installations de chauffage conventionnelles, il convient donc de veiller très strictement aux exigences de qualité requises pour les pellets, alors que d'autres pellets biogènes ne conviennent que pour de grosses installations dotées d'un système d'épuration des gaz brûlés.

Restholz aus Schreinereien, Zimmereien und Möbelfabriken

In Zimmereien, Schreinereien, Hobelwerken usw. fallen teils naturbelassene, teils behandelte Verarbeitungsreste aus Holz und Spanplatten in unterschiedlicher Form an. Dieses Restholz kann Leim, Farben und Bindemittel enthalten und darf deshalb nur in als Restholzfeuerungen zugelassenen und kontrollierten Anlagen genutzt werden, welche strengere Grenzwerte einhalten müssen. Die Verbrennung von Restholz in privaten Holzheizungen ist nicht gestattet und führt zu übermässigen Emissionen und Geruchsbelästigungen. Restholz ist in der Regel trocken und kann einen hohen Staubanteil aufweisen, so dass unter Umständen eine Brikettierung erforderlich ist. Reste von PVC-beschichteten oder druckimprägnierten Hölzern müssen in Kehrichtverbrennungsanlagen entsorgt werden.

Altholz

Bei Gebäudeabbrüchen und Umbauten anfallende Holzbauteile sowie Möbel, Verpackungen und Paletten aus Holz können mit einem Hacker zu Altholzschnitzeln verarbeitet und in speziellen Altholzfeuerungen mit entsprechender Abgasreinigung energetisch genutzt werden. In konventionellen Holzfeuerungen darf Altholz dagegen nicht verwertet werden. Druckimprägniertes Holz (Telefonmasten, Eisenbahnschwellen, Gartenzäune) sowie PVC-beschichtetes Holz muss in Kehrichtverbrennungsanlagen entsorgt werden.

Bild 3/figure 3

Wichtigste Energieholzsortimente / principales variétés d'énergie-bois



Spalten/Scheiter
Büches/billons

Hackschnitzel
Plaquettes de bois

Holzpellets
Pellets/granulés de bois

Sägespäne/Sägemehl
Copeaux/sciure

Um eine Qualitätssicherung der Brennstoffe zu gewährleisten und eine Auswahl der Anlage für das verfügbare Sortiment zu ermöglichen, werden die Holz hackschnitzeln in folgende Sortimente eingeteilt:

- Wald- und Sägereihackschnitzeln
- Holzpellets
- Landschaftspflegeholz und Durchforstungsholz von Nadelbäumen
- Sägespäne
- Rinde (zerkleinert und unzerkleinert)
- Restholz aus der Holzverarbeitung
- Restholz von Baustellen

Die Brennstoffanforderungen sind in einer Klassierung im Detail festgelegt und dienen als Basis für Lieferverträge. Das Datenblatt zur Klassierung wird regelmässig aktualisiert und kann von www.holzenergie.ch heruntergeladen werden. Die Verrechnung von Brennstofflieferungen für automatische Holzfeuerungen kann nach drei Arten erfolgen:

- Schüttvolumen (mit Berücksichtigung der Schüttdichte)
- Gewicht (mit Berücksichtigung des Wassergehalts)
- Erzeugte Wärmemenge (gemessen mittels Wärmemessfühler)

Da Laub- und Nadelholz unterschiedliche Dichten aufweisen, wird bei der Abrechnung pro Volumen zwischen Nadelhölzern und harten Laubhölzern unterschieden. Der Einfluss des Wassergehalts ist bei einer Verrechnung nach Volumen nur von untergeordneter Bedeutung, jedoch bei einer Abrechnung nach Gewicht entscheidend. Eine Verrechnung nach Gewicht ist bei Grossanlagen üblich, kommt aber in der Schweiz derzeit nicht zur Anwendung, weil dazu eine Wägung erforderlich ist. Die Verrechnung nach erzeugter Wärmemenge setzt voraus, dass der Brennstoff von einem einzigen Lieferanten bezogen wird. Bei einem entsprechenden Liefervertrag genügt dann eine periodische Ablesung der erzeugten Wärme zur Verrechnung des gelieferten Brennstoffs. Diese Abrechnungsart ist in der Schweiz weit verbreitet. Für die verschiedenen Verrechnungsarten sind bei Holzenergie Schweiz Musterverträge erhältlich.

Déchets ligneux provenant de menuiseries, charpenteries et fabriques de meubles

Dans les menuiseries, charpenteries, fabriques de meubles, etc., on trouve des déchets de bois et/ou de panneaux de particules parfois à l'état naturel et parfois traités, déchets qui peuvent se présenter sous différentes formes. Ces déchets ligneux peuvent contenir de la colle, de la peinture ou un liant, raison pour laquelle ils ne doivent s'utiliser que dans des installations dûment homologuées et contrôlées qui respectent de très strictes valeurs limites. La combustion de déchets ligneux dans des installations privées n'est pas autorisée et engendre des nuisances olfactives ou autres véritablement démesurées. En règle générale, les déchets ligneux sont secs et peuvent présenter une proportion élevée de poussières, de sorte qu'un briquetage peut se révéler indispensable selon les circonstances. Les déchets ligneux revêtus de PVC ou autoclavés doivent s'éliminer dans des centrales d'incinération des ordures.

Bois de récupération

Les déchets provenant de chantiers de démolition ou de transformation ainsi que de meubles, emballages et palettes peuvent se fragmenter au moyen d'un hachoir et s'exploiter énergétiquement dans des installations spécialement conçues dotées d'un système d'épuration des gaz brûlés. Dans des installations conventionnelles de chauffage au bois, il est par contre interdit de brûler du bois de récupération. Le bois autoclavé (mâts téléphoniques, traverses de chemin de fer, clôtures de jardin) ainsi que le bois revêtu d'une enduction de PVC doivent s'éliminer dans des centrales d'incinération des ordures.

Pour garantir la qualité des combustibles et permettre de sélectionner l'installation parfaitement adaptée à la variété d'énergie-bois à disposition, les déchets se subdivisent conformément aux catégories suivantes:

- Déchets forestiers et de scierie
- Pellets
- Déchets provenant de l'entretien paysager et du déboisement
- Copeaux
- Ecorces (fragmentées et non)
- Déchets ligneux provenant du travail du bois
- Déchets ligneux provenant de chantiers

Les exigences requises pour des combustibles ligneux figurent dans un catalogue détaillé et servent de base pour l'établissement de contrats de livraison. La fiche de classement est régulièrement mise à jour et peut se télécharger sur le site www.holzenergie.ch. La comptabilisation des fournitures de combustibles pour des installations automatiques peut s'effectuer de trois manières différentes:

- Volume en vrac (avec prise en compte de la densité apparente)
- Poids (avec prise en compte de la teneur en eau)
- Quantité de chaleur produite (mesure au moyen d'un compteur de chaleur)

Comme les bois de feuillus et les bois de conifères présentent des densités différentes, on distingue entre bois de conifères et bois de feuillus pour procéder à un décompte subordonné au volume. L'influence de la teneur en eau n'a qu'une importance secondaire pour établir un décompte subordonné au volume, mais elle revêt par contre une importance primordiale pour établir un décompte subordonné au poids. Un décompte subordonné au poids est usuel pour de grandes installations, mais il ne s'utilise pas encore en Suisse, car il nécessite une pesée. Un décompte établi en fonction de la chaleur produite pré suppose que le combustible est acheté auprès d'un seul et même fournisseur. Moyennant un contrat de livraison correspondant, il suffit de relever périodiquement la quantité de chaleur produite pour établir le décompte du combustible fourni. Ce mode de décompte est assez largement répandu en Suisse. Energie-bois Suisse tient des contrats-types à disposition pour les différents modes de décompte.



Bild 4/figure 4
Herstellung von Holzschnitzeln mit mobilem Grosshacker im Wald
Production de plaquettes de bois directement en forêt au moyen d'un hachoir



Bild 5 /figure 5
Brennstoffanlieferung mit LKW zu unterirdischem Silo älterer Bauart. Für Neuanlagen wird eine Öffnungsmöglichkeit der Silodeckel von über 90 ° empfohlen, um eine rasche und störungsfreie Brennstoffanlieferung zu ermöglichen.
Fourniture de combustible par camion dans un silo de type ancien. Pour de nouvelles installations, il est recommandé de prévoir une possibilité d'ouverture du couvercle à 90° afin de permettre une livraison sûre et rapide du combustible.



Bild 6/figure 6
Holzschnitzellager ebenerdig unter Dach
Magasin de plaquettes de bois de plain pied sous un toit

1.5 Wassergehalt und Holzfeuchtigkeit von Holz

Zur Angabe des Wasseranteils im Holz sind zwei Grössen üblich. Beim Wassergehalt wird das Gewicht des Wassers auf dasjenige des feuchten Holzes bezogen. Die Holzfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen dem Gewicht des Wassers und demjenigen der trockenen Holzsubstanz:

Wassergehalt	w =	Für beide Grössen sind Angaben als Dezimale oder in Prozent gebräuchlich.
Holzfeuchtigkeit	u =	

Bei einer Angabe in Prozent gilt für die Umrechnung zwischen w und u:

w [%] =	sowie	u [%] =
---------	-------	---------

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 2 Jahre getrocknet wurde und einen Wassergehalt von ungefähr 15 % aufweist.

Tabelle 5/tableau 5

Umrechnungstabelle für w und u / tableau de conversion pour w et u

w	[Gew.-% / % pondéral]	0	20	25	40	50	60
u	[Gew.-% atro / % pondéral atro]	0	25	33	67	100	150

Tabelle 6/tableau 6

Typische Werte für w und u nach [4] / valeurs caractéristiques pour w et u selon [4]

Sortiment		w [%]	u [%]
Naturbelassene Holzschnitzel	Erntefrisch aus dem Wald	30 – 55	43 – 122
	Waldgetrocknetes Stammholz	30 – 40	43 – 67
	unter Dach gelagert	20 – 30	25 – 43
	lufttrocken	15 – 20	18 – 25
Restholz	aus Sägerei	25 – 60	33 – 150
	aus Zimmerei	13 – 20	15 – 25
	aus Schreinerei	7 – 17	7 – 20

Variété		w [%]	u [%]
Plaquettes de bois à l'état naturel	frais de la forêt	30 – 55	43 – 122
	grume séché en forêt	30 – 40	43 – 67
	stockage sous toit	20 – 30	25 – 43
	séchage à l'air	15 – 20	18 – 25
Déchets ligneux	provenance scierie	25 – 60	33 – 150
	provenance charpenterie	13 – 20	15 – 25
	provenance menuiserie	7 – 17	7 – 20

1.6 Energiedichte und Lagervolumen

Der Energieinhalt von Holz wird angegeben durch den Heizwert (H_u). Der Heizwert ist die bei der Verbrennung gewinnbare Wärme, 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 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 (Bild 7), da das im Holz enthaltene Wasser verdampft werden muss. Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit kann mit folgender Beziehung ausgedrückt werden:

$$H_u(u) =$$

u = Holzfeuchtigkeit in [kg/kg]

$H_{u\text{ atro}} = 18.3 \text{ MJ/kg}$

Δh_v = Verdampfungswärme von Wasser = 2.44 MJ/kg

Der Heizwert kann auch in kWh/kg angegeben werden mit folgender Umrechnung: 1 kWh = 3.6 MJ.

Gemäss der oben genannten Beziehung nimmt der Heizwert pro kg feuchtes Holz 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.

Holzbrennstoffe weisen eine deutlich geringere Energiedichte auf als Heizöl. Wie der Vergleich nach Tabelle 7 zeigt, ist das Lagervolumen für Holzpellets etwa dreimal so gross wie für Heizöl. Stückholz hat für einen Saisonbedarf einen rund fünfmal so grossen Platzbedarf. Wenn der Heizbedarf für zwei Saisons zur Trocknung gelagert werden muss, ist dies zusätzlich zu berücksichtigen. Holzschnitzel verlangen für die gleiche Versorgungsdauer ein rund zehnfach so grosses Lagervolumen. Aus diesem Grund kommt bei Holzschnitzeln die Lagerung eines Saisonbedarfs bei der Heizanlage aus Kostengründen nicht in Frage, das Silo muss also mehrere Male pro Heizsaison gefüllt werden.

Die harten Laubhölzer besitzen wegen der höheren Dichte einen entsprechend höheren Energieinhalt pro Volumen als Nadelhölzer. Bezogen auf das Gewicht ist es allerdings umgekehrt, da die Nadelhölzer einen geringfügig höheren Heizwert pro Kilogramm als Nadelholz aufweisen.

Energieholz aus der Holzverarbeitung weist je nach Herkunft sehr grosse Unterschiede in Form und Wassergehalt auf. Sägereiholz weist meist einen hohen Wassergehalt auf, während Restholz aus Schreinerien und Zimmereien trocken ist.

Bild 7/figure 7

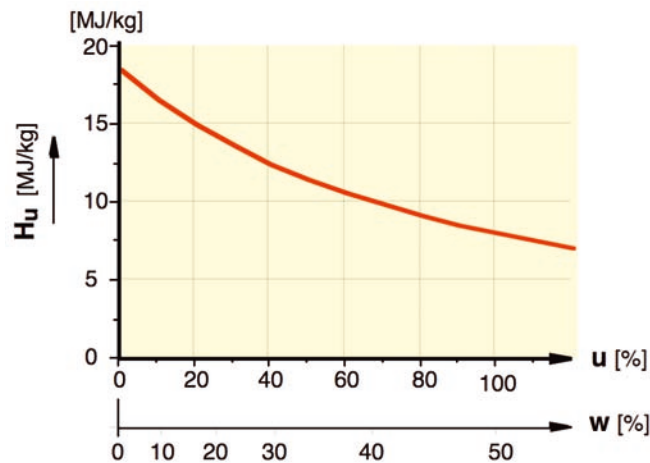


Bild 7/figure 7

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

Pouvoir calorifique du bois en fonction de l'humidité du bois u (rapportée à la masse absolument sèche du bois) et la teneur en eau w (rapportée à la masse humide du bois)

1.6 Densité énergétique et volume de stockage

La teneur énergétique du bois est indiquée par son pouvoir calorifique (H_u). Le pouvoir calorifique correspond à la chaleur extractible en cours de combustion lorsque les gaz brûlés sont refroidis à la température de sortie et lorsque de l'eau est présente dans ces mêmes gaz brûlés sous forme de vapeur.

Le pouvoir calorifique d'un bois absolument sec (atro) est en moyenne de 18.1 MJ/kg pour des bois de feuillus et de 19.0 MJ/kg pour des bois de conifères. Pour simplifier les calculs, on applique souvent une valeur de 18.3 MJ/kg, ce qui correspond au pouvoir calorifique d'un bois de composition moyenne. L'énergie-bois contient de l'eau sous forme d'humidité et éventuellement de l'eau d'origine étrangère provenant des opérations de stockage. Lorsque l'humidité du bois augmente, son pouvoir calorifique diminue (figure 7), car l'eau contenue par le bois doit s'évaporer. L'influence de l'humidité du bois peut s'exprimer par la formule suivante:

$$H_u(u) =$$

u = humidité du bois en [kg/kg]

$H_{u\text{ atro}} = 18.3 \text{ MJ/kg}$

Δh_v = chaleur d'évaporation de l'eau = 2.44 MJ/kg

Le pouvoir calorifique peut également s'exprimer en kWh/kg moyennant la conversion suivante: 1 kWh = 3.6 MJ.

Conformément à la relation ci-dessus, le pouvoir calorifique par kg de bois humide diminue lorsque l'humidité du bois augmente. Rapportée au poids à l'état sec, la diminution est réduite, raison pour laquelle la teneur énergétique par mètre cube de bois en vrac ne diminue également que faiblement lorsque l'humidité du bois augmente.

Le bois de feu présente une densité énergétique nettement inférieure à celle d'une huile de chauffage. Comme le fait ressortir la comparaison du tableau 7, le volume de stockage de pellets est environ trois fois plus important que celui d'une huile de chauffage. Pour une saison de chauffage, des bûches prennent environ cinq fois plus de place. S'il faut stocker pour séchage la consommation de deux saisons, il convient aussi de tenir compte de ce paramètre supplémentaire. Des plaquettes de bois exigent un volume de stockage approximativement dix fois plus important pour une même durée d'approvisionnement, raison pour laquelle le stockage de plaquettes pour une saison entière de chauffage n'entre pas en ligne de compte pour des raisons de coûts, le silo devant dès lors être rempli à plusieurs reprises lors d'une saison.

Etant donné leur densité supérieure, les bois durs de feuillus présentent une densité énergétique supérieure par volume à celle d'un bois résineux. Rapporté au poids, c'est exactement le contraire, car les bois résineux présentent un pouvoir calorifique légèrement supérieur par kilogramme.

L'énergie-bois provenant du travail du bois présente, selon la provenance du bois, d'importantes différences quant à la teneur en eau. Le bois de scierie présente généralement une teneur en eau élevée, alors que les déchets ligneux provenant de menuiseries et charpenteries est sec.

Bild 8/figure 8

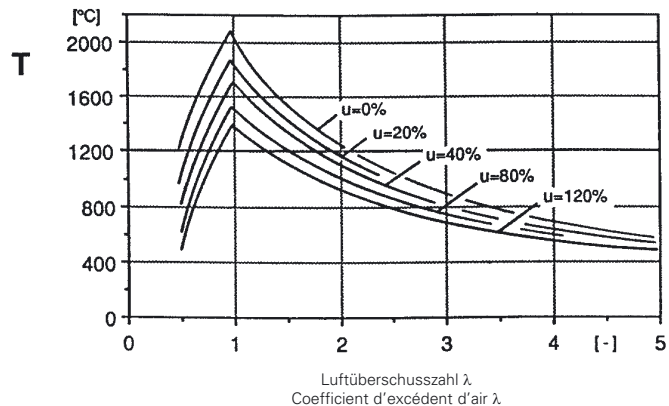


Bild 8/figure 8

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

Courbe adiabatique de la température de combustion en fonction du coefficient d'excédent d'air pour des humidités du bois de 0 %, 20 %, 40 % et 120 % atro

Tabelle 7/tableau 7

Heizwert und Energiedichte von Holzbrennstoffen im Vergleich zu Heizöl

Pouvoir calorifique et densité énergétique de combustibles ligneux comparativement à de l'huile de chauffage extra-légère

Brennstoff	Art	H _{u atro}	H _u	Dichte	Lagerdichte/* Transportdichte	Energiedichte**	Lagervolumen im Verhältnis zu Öl
Combustible	Type	H _{u atro}	H _u	Densité	Densité stockage/* de transport	Densité éner- gétique**	Volume stockage par rapport à l'huile
		MJ/kg	kWh/kg	kg/m ³	kg/m ³	kWh/m ³	
Stückholz Bûches	Fichte (Tanne) épicéa (sapin)	19,0	5,3 4,8***	550	400	1900	5
	Buche hêtre	18,1	5,0 4,6***	750	500	2300	4
Holzschnitzel Plaquettes de bois	Fichte épicéa	19,0	5,3 3,5***	440	200	700	13
	Buche hêtre	18,1	5,0 3,3***	670	270	900	11
Hobelspäne Copeaux		18,3	5,1 4,8***		90	450	22
Holzpellets Pellets	D = 6–10 mm	18,5	5,1 4,9***	1200	650	3200	3
Heizöl Huile de chauffage	EL extra-légère	42,6	11,8	850	850	10'000	1

* Lagerdichte = Transportdichte = Masse pro Lagervolumen (für Schüttgüter wie Holzschnitzel gilt Lagerdichte = Schüttdichte, für Stückholz gilt Lagerdichte = Stapeldichte)

** Energiedichte bezogen auf Lager- bzw. Transportdichte für

*** Stückholz, Hobelspäne, Holzpellets mit 8 % – 10 % Wassergehalt, Holzschnitzel mit 30 % Wassergehalt

* densité de stockage = densité de transport = masse par volume de stockage (pour du bois en vrac tel que des plaquettes, on a densité de stockage = densité en vrac, et pour des bûches, densité de stockage = densité pour des bûches empilées)

** densité énergétique rapportée à la densité de stockage ou de transport pour

*** Bûches, copeaux, pellets avec teneur en eau de 8 % – 10 %, déchets ligneux avec teneur en eau de 30 %

2 Grundlagen

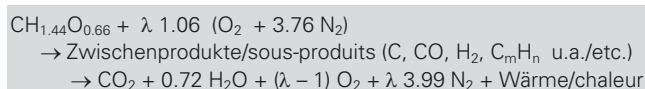
2.1 Holzbrennstoffe

Die Holzbrennstoffe unterscheiden sich je nach Herkunft, Aufbereitung und Lagerung vor allem durch die Stückgröße, den Aschegehalt und den Wassergehalt. Der Wassergehalt variiert von 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 (Bild 7) und damit die maximal erzielbare Verbrennungstemperatur (Bild 8). Bei trockenem Holz werden höhere Verbrennungstemperaturen erzielt als bei nassem Holz, weshalb der Wassergehalt bei der Konstruktion der Feuerung und der Betriebsweise berücksichtigt wird.

Der Ascheanteil setzt sich zusammen aus den Mineralstoffen wie Kalium, Magnesium und Calcium, Fremdstoffen wie Sand und Steinen sowie allfälligen Zusatzstoffen im Fall von Restholz. Rinde, Nadeln und Blätter weisen einen höheren Mineralstoffgehalt als Stammholz auf. Mineralstoffe und Fremdstoffe können zu Partikelemissionen führen und 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 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 Unterschiede in der Erscheinung 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, wenn Elemente wie Schwefel und Stickstoff vernachlässigt werden, wie folgt beschrieben werden:



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

2 Notions fondamentales

2.1 Combustibles ligneux

Selon leur provenance, leur préparation et leur stockage, les combustibles ligneux se différencient surtout en fonction de la dimension des morceaux de bois, de la teneur en cendres et de la teneur en eau. La teneur en eau varie de moins de 10 % en poids pour des déchets ligneux secs à plus de 50 % en poids (donc une humidité du bois de plus de 100 %) pour des copeaux ou des plaquettes fraîches de forêt. Comme l'eau doit s'évaporer au cours de la combustion, l'humidité du bois influence le pouvoir calorifique (figure 7) et donc la température de combustion maximale atteignable (figure 8). Avec du bois sec, on parvient à des températures de combustion plus élevées qu'avec du bois humide ou mouillé, raison pour laquelle il faut tenir compte de la teneur en eau du bois dans le contexte de l'installation de chauffage et de son mode d'exploitation.

Les cendres se composent de substances minérales telles que du potassium, du magnésium et du calcium, de matières d'origine étrangère telles que du sable et de la pierre, et éventuellement d'autres matières supplémentaires. Les écorces, les aiguilles et les feuilles présentent une teneur en substances minérales supérieure à celle d'un bois en grume. Les matières minérales et autres substances d'origine étrangère peuvent provoquer des émissions de particules et favoriser une scorification indésirable dans le foyer.

Dans le bois, le soufre (S) n'existe que sous la forme de traces, raison pour laquelle des installations de chauffage au bois ne présentent que de faibles émissions de dioxyde de soufre (SO₂). Du bois à l'état naturel contient par contre de l'azote (N) qui est à l'origine d'émissions d'oxydes d'azote (NO_x) lors de la combustion. La teneur élevée en azote des liants utilisés dans la production de panneaux de particules entraîne également des émissions d'oxydes d'azote plus importantes.

Quand bien même les essences de bois présentent des différences apparentes, le pourcentage des principaux composants – donc carbone (C), hydrogène (H) et oxygène (O) – ne varie que faiblement. Le bois contient en moyenne approximativement 50 % en poids de carbone, 6 % en poids d'hydrogène et 44 % en poids d'oxygène, ce qui correspond à la formule brute CH_{1,44}O_{0,66}. La combustion complète d'un bois sec avec de l'air (21 % d'oxygène et 79 % d'azote) peut se décrire comme suit si l'on néglige des éléments tels que le soufre et l'azote:

Le coefficient d'excédent d'air λ (lambda) décrit le rapport entre la quantité d'air effectivement fournie et la quantité d'air théoriquement nécessaire; il est généralement compris entre 1,5 et 2,5.

2.2 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). Bild 9 zeigt den Verlauf der Gewichtsabnahme des Feststoffs mit zunehmender Temperatur.

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

Bild 9/figure 9

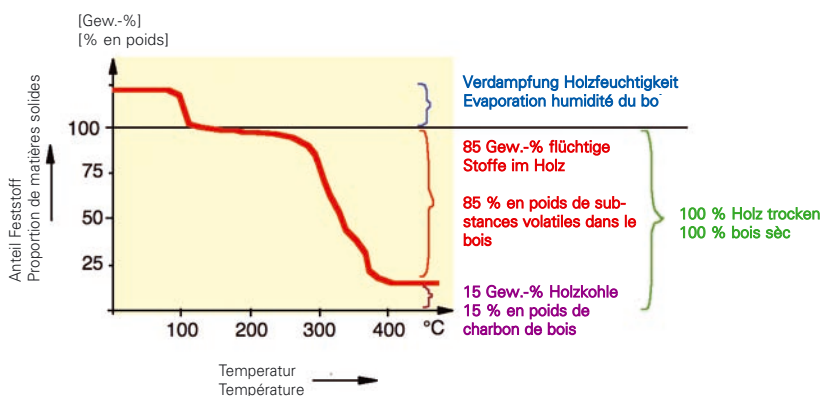


Bild 9

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.

2.3 Schadstoffe

Wie bei jedem Verbrennungsprozess werden auch bei der Holzverbrennung Schadstoffe gebildet. Die Schadstoffbildung ist abhängig von der Brennstoffzusammensetzung und den Verbrennungsbedingungen. Durch die Wahl einer guten Feuerung und vor allem durch sachgemässen Betrieb 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 (Bild 10). 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 [8]:

2.2 Processus partiels de la combustion du bois

Le bois est un combustible solide à haute teneur en matières volatiles. Par échauffement, 80 à 90 % en poids de la masse de bois sec sont libérés sous forme de gaz. Ces gaz sont principalement du monoxyde de carbone (CO), de l'hydrogène (H₂) et des hydrocarbures (C_mH_n). La figure 9 présente la courbe de la perte de poids de la matière solide en fonction de l'augmentation de la température.

Dans une installation de chauffage au bois, la libération de ces matières s'effectue par gazéification (avec $\lambda < 1$) dans un lit incandescent. Les gaz se mélangent ensuite à l'air de combustion et brûlent dans la chambre de combustion sous forme d'une flamme longue. Pour brûler les gaz, on amène en règle générale de l'air secondaire, alors que l'on amène de l'air primaire pour transformer le bois en gaz. Comme les gaz brûlent sous forme d'une flamme longue, le bois est qualifié de combustible flambant gras. Le charbon de bois du lit incandescent brûle par contre lentement et ne libère que de petites flammes. La combustion d'un bois occasionne les processus partiels suivants qui peuvent se dérouler simultanément ou successivement:

- Echauffement du combustible par rayonnement de la flamme, du lit incandescent et des parois du foyer
- Séchage par évaporation et élimination de l'eau (à partir de 100 °C)
- Décomposition du bois par l'action de la chaleur (à partir de 250 °C)
- Gazéification du bois avec de l'air primaire pour formation de gaz et de carbone solide (à partir de 250 °C)
- Gazéification du carbone (à partir de 500 °C)
- Oxydation des gaz combustibles pour formation de dioxyde de carbone et d'eau à des températures comprises entre 700 °C et env. 1500 °C (maximum env. 2000 °C)
- Emission de chaleur par la flamme vers les parois du foyer et le combustible de réalimentation

figure 9

Perte de poids de la matière solide par échauffement 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 % en poids. Environ deux tiers de l'énergie sont libérés par l'oxydation des produits de gazéification (85 % en poids) et environ un tiers l'est par l'oxydation du charbon de bois (15 % en poids). L'oxydation du charbon de bois dure approximativement deux fois plus longtemps que la gazéification du bois.

2.3 Substances nocives

Comme chaque processus de combustion, la combustion du bois libère également des substances nocives. La formation de substances nocives dépend de la composition du combustible et des conditions de combustion. Moyennant la sélection d'une bonne installation de chauffage et surtout une exploitation de celle-ci dans les règles de l'art, il est possible de réduire les émissions de substances nocives à un strict minimum.

La combustion du bois est un processus qui s'opère en deux étapes, à savoir tout d'abord la gazéification du bois, puis l'oxydation des gaz et du charbon de bois (figure 10). Les substances nocives peuvent se subdiviser en fonction de ces étapes partielles. Un premier groupe de substances nocives provenant d'une combustion incomplète comprend le monoxyde de carbone, des hydrocarbures, du goudron et des suies (poussières combustibles). Un deuxième groupe comprend des substances nocives provenant d'une combustion complète, à savoir dioxyde de carbone, oxydes d'azote, et particules de cendres (poussières incombustibles). Etant donné les différents modes de formation des substances nocives, il convient aussi de prendre diverses mesures pour y échapper [8]:

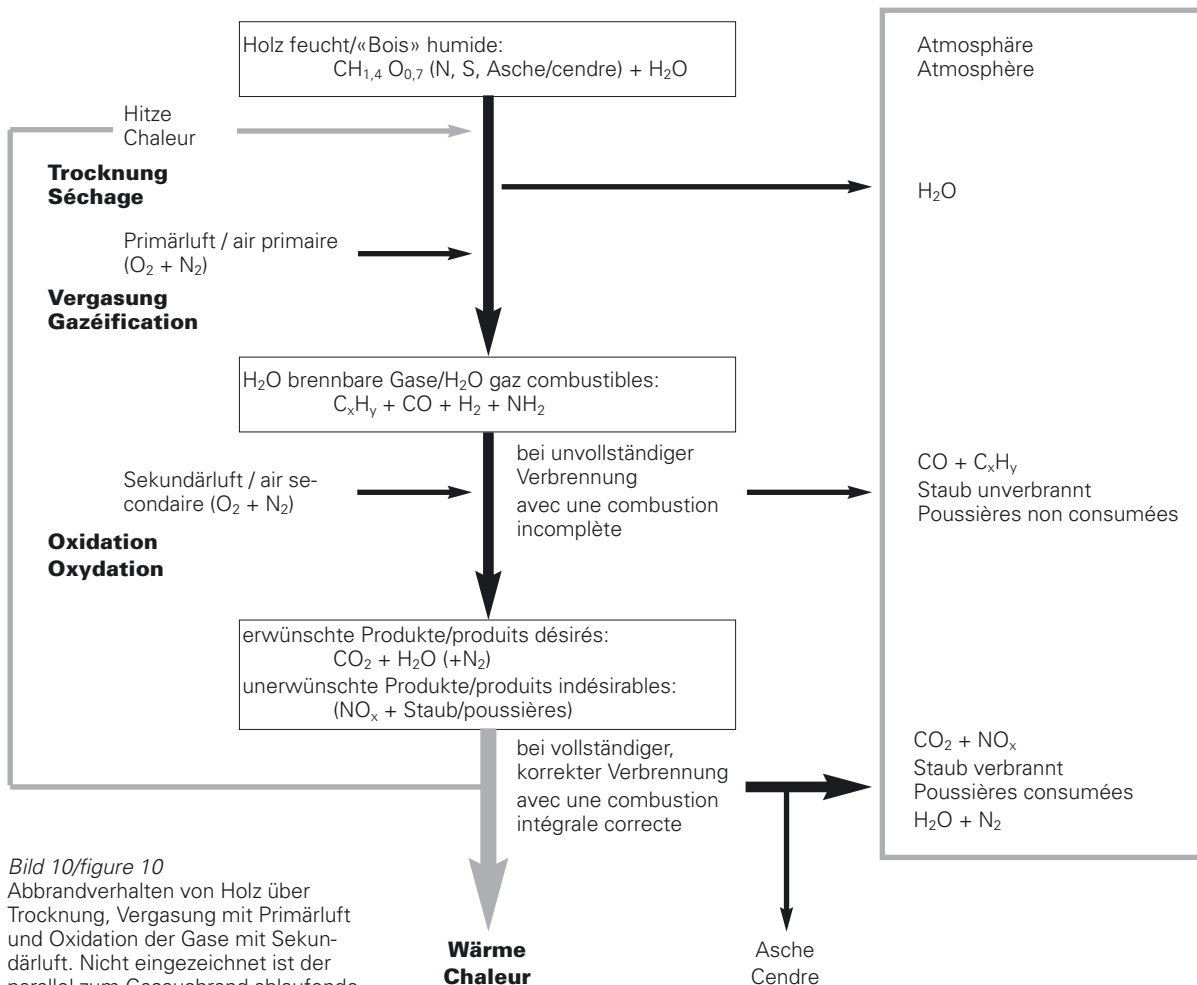


Bild 10/figure 10

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.

Comportement du bois en cours de combustion avec séchage, gazéification avec de l'air primaire et oxydation des gaz avec de l'air secondaire. La combustion du carbone qui se déroule sur la grille avec de l'air primaire parallèlement à celle des gaz n'est pas représentée.

- 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 Staubabscheideverfahren eingesetzt.
- Die Emission an Kohlendioxid ist proportional zur umgesetzten Brennstoffmenge und damit direkt abhängig von der bereitzustellenden Nutzenergie und dem Anlagennutzungsgrad. Eine Verminderung der CO_2 -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 zur Bildung von hochgiftigen Dioxinen führt. Beides verursacht unzulässige Emissionen, eine frühzeitige Zerstörung der Feuerung und giftige Ascherückstände.

- Les substances nocives provenant d'une combustion incomplète peuvent s'éviter moyennant une gestion appropriée de la combustion, gestion qui nécessite une température élevée et un bon mélange des gaz avec l'air de combustion. Dans des installations de chauffage à alimentation manuelle, il n'est possible d'atteindre une température suffisamment élevée qu'avec du bois sec; un bois humide ou mouillé brûle par contre incomplètement. Dans de grandes installations de chauffage à alimentation automatique avec chambre de combustion à très haute température et exploitation avec un faible excédent d'air, il est également possible de brûler des combustibles à teneur élevée en eau.
- Pour éviter des émissions de particules, une combustion complète est indispensable. Avec de grosses installations, il faut en outre utiliser un système de séparation des poussières.
- Les émissions de dioxyde de carbone sont proportionnelles à la quantité de combustible brûlée et dépendent donc directement de l'énergie utile à préparer et du taux d'utilisation de l'installation. Une diminution des émissions de CO_2 est réalisable moyennant des mesures d'économie appropriées et une amélioration du rendement de l'installation.
- Dans de grosses installations de chauffage, les émissions d'oxydes d'azote imputables à l'azote du combustible peuvent être abaissées dans une certaine mesure moyennant des mesures techniques appropriées, mais elles ne peuvent pas s'éliminer complètement. Dans des installations de chauffage à alimentation manuelle, les émissions d'oxydes d'azote n'ont qu'une importance secondaire.

En brûlant du bois de récupération ou des déchets ligneux contaminés, d'autres substances nocives peuvent se libérer, et notamment de l'acide chlorhydrique (HCl) ainsi que des métaux lourds provenant d'impuretés infiltrées dans le combustible ou déposées sur celui-ci. Pour des installations de chauffage alimentées avec du bois de récupération, ces substances nocives sont séparées par le système d'épuration des gaz brûlés et les cendres sont éliminées dans les règles de l'art. Dans des installations de chauffage ordinaires, il est interdit de brûler du bois de récupération ou des déchets combustibles susceptibles de libérer des dioxines extrêmement toxiques. Ces deux types de combustible occasionnent des pollutions inadmissibles, une dégradation prématurée de l'installation et des résidus cendreux toxiques.

2.4 Kohlenmonoxid und Einfluss der Verbrennungsluft

Das Verhältnis zwischen zugeführter Luft- und Brennstoffmenge, angegeben mit dem Luftüberschuss λ ist eine wichtige Betriebsgrösse, welche die Emissionen und den Wirkungsgrad beeinflusst. Für eine vollständige Verbrennung muss der Luftüberschuss grösser als 1 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 und die Verbrennung infolge zu tiefer Temperatur unvollständig werden.

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 niedrigerem Luftüberschuss und niedrigerem 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 (Bild 11). Am Beispiel eines Stückholzkessels (Kurve b) können darin drei verschiedene Bereiche wie folgt unterschieden werden [8]:

1. Ein Bereich mit unvollständiger Verbrennung bei hohem 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.

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

- a) Einfache handbeschickte Holzfeuerung
- b) Stückholzkessel mit unterem Abbrand
- c) Automatische Holzfeuerung mit einfacher Verbrennungstechnik
- d) Automatische Holzfeuerung mit guter Verbrennungstechnik

Emissions de monoxyde de carbone en fonction du coefficient d'excédent d'air (diagramme CO/lambda) pour différentes techniques de combustion

- a) Installation de chauffage au bois de type simple à alimentation manuelle
- b) Chaudière à bûches à combustion inférieure
- c) Installation automatique de chauffage au bois avec technique de combustion simplifiée
- d) Installation automatique de chauffage au bois avec technique de combustion optimisée

2.5 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:

2.4 Monoxyde de carbone et influence de l'air de combustion

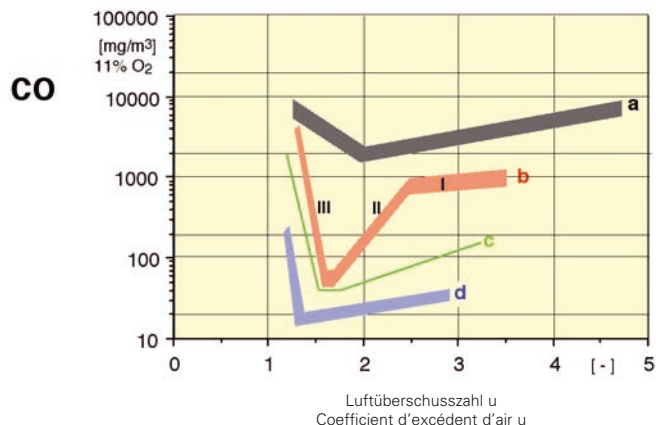
Le rapport entre la quantité d'air fournie et la quantité de combustible ainsi que l'excédent d'air λ constituent des paramètres d'exploitation importants en vue d'exercer une influence sur les émissions et le rendement de l'installation. Pour garantir une combustion complète, l'excédent d'air doit être supérieur à 1, sans quoi l'oxygène peut venir à manquer localement. Si l'excédent d'air est très élevé (plus de 2 à 3), la flamme peut être refroidie par un apport inutile d'air et la combustion reste alors incomplète en raison d'une trop faible température.

Comme il est plus difficile de régler le mélange des gaz brûlés et de l'air avec des combustibles solides qu'avec des combustibles liquides ou gazeux, les installations de chauffage au bois doivent s'exploiter avec un excédent d'air plus important que celui adopté pour des installations de chauffage à mazout ou à gaz. L'excédent d'air se situe normalement entre 1,5 et 2,5; il influence la température de combustion. Avec des installations de chauffage caractérisées par un bon mélange de l'air et des gaz, il est possible d'envisager une exploitation avec un faible excédent d'air et une faible teneur en CO, alors qu'un foyer ouvert s'exploite avec un très fort excédent global d'air.

Etant donné que la plupart des substances nocives non consommées se comportent comme le monoxyde de carbone, gaz proportionnellement le plus important, on utilise le CO comme indicateur de la qualité de la combustion. Le comportement d'installations de chauffage au cours du processus de combustion peut donc se décrire en se référant à la courbe caractéristique du diagramme CO/lambda (figure 11). En prenant pour exemple une chaudière à bûches (courbe b), on distingue les trois zones différentes comme suit [8]:

1. Zone de combustion incomplète avec excédent d'air important et basse température de combustion, dans l'exemple b) avec $\lambda > 2.5$.
2. Zone $1.5 < \lambda < 2.5$; la température de combustion augmente lorsque l'excédent d'air diminue. Comme l'air et les gaz se mélangent encore suffisamment et du fait que l'oxygène est encore et toujours excédentaire, la qualité de la combustion est nettement meilleure. Dans cette zone, la teneur en monoxyde de carbone diminue lorsque la température augmente consécutivement aux réactions de combustion favorisées par la température élevée.
3. Zone $\lambda < 1.5$; lorsque l'excédent d'air continue de diminuer, on constate l'apparition de zones caractérisées par un manque localisé d'oxygène, ce qui se traduit par une qualité de combustion nettement moins bonne. Jusqu'à un excédent d'air de 1, la température théorique de combustion continue d'augmenter. La température atteinte dans une installation concrète augmente également, mais moins fortement que la température calculée (courbe adiabatique) en raison de la combustion incomplète. Dans cette zone, les émissions de monoxyde de carbone ne résultent pas d'une température insuffisante, mais d'un mélange insuffisant de l'air de combustion et des gaz combustibles. Moyennant un réglage approprié, il faut donc éviter d'exploiter l'installation de chauffage avec un apport insuffisant d'air de combustion.

Bild 11/figure 11



2.5 Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO et NO₂ regroupés sous la désignation de NO_x) proviennent principalement de processus de combustion se déroulant dans des moteurs et des installations de chauffage. Ils contribuent à la formation d'ozone à proximité du sol et de pluies acides. Dans des processus de combustion, la source de l'azote réside dans l'azote de l'atmosphère ainsi qu'éventuellement l'azote lié au combustible. Les principaux modes de formation sont les suivants:

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 [9]. Typische Werte bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz (Stickstoffgehalt 0,1–0,2 Gew.-%) betragen zwischen 100 und 250 mg/m³ (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 [9]. 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 einigen 100 kW zum Einsatz, während die Brennstoffstufung noch in der Entwicklung ist und vor allem für noch 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 unerwünschter Nebenprodukte wie Lachgas und Isocyanursäure. Der Einsatz des SCR-Verfahrens, das die höchste Abscheidung erzielt, ist aus Kostengründen bis anhin auf besondere Anwendungen und grössere Anlagen beschränkt.

2.6 Feinstaub

Der wichtigste Schadstoff aus Holzheizungen ist lungengängiger Feinstaub mit Korngrössen unter 10 Mikrometer (Particulate Matter PM₁₀), welcher sich bei Holzheizungen aus zwei unterschiedlichen Komponenten zusammensetzt [10].

Zum Einen tragen Produkte unvollständiger Verbrennung wie Russ und Teer zum Feinstaub bei. Diese Stoffe sind krebserzeugend und stark gesundheitsschädlich. Vor allem handbeschickte Holzfeuerungen verursachen relevante Konzentrationen an solchen organischen Substanzen. Gute Stückholzkessel können aber vergleichsweise tiefe Gesamtstaubemissionen von deutlich unter 50 mg/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) erzielen. Dasselbe gilt für Cheminéeöfen, für diese allerdings nur bei idealem Betrieb mit Zugabe von kleinen Mengen an kleinen Holzscheitern. Bei nichtidealem Betrieb zum Beispiel durch zu starkes Füllen des Brennraums oder zu frühes Schliessen der Luftklappen können Holzöfen und Cheminées zehnfach höhere Emissionen an Feinstaub mit gleichzeitig hohen Kohlenwasserstoffemissionen verursachen. Gar bis zu hundert mal höhere Emissionen sind möglich, wenn nach dem Anfeuern die Luftklappen geschlossen werden, um den Abbrand zu verzögern. Der dabei emittierte Feinstaub ist zudem noch deutlich toxischer als Dieselruss und deshalb besonders kritisch. Da die Holzverbrennung, wie Analysen der Umgebungsluft zeigen, teilweise mehr als 50 % der Russbelastung verursacht, sind solche Einzelquellen durch strenge Kontrollen zu unterbinden. Nebst schlecht betriebenen Holzheizungen ist dabei allerdings auch die offene Verbrennung zu bekämpfen.

Zum Andern können bei der Holzverbrennung auch salzartige Aschebestandteile durch Verdampfung und Oxidation ins Abgas gelangen und nach der Abkühlung als Feinstaub auftreten. Diese Feinstäube sind weniger gesundheitsschädlich als Dieselruss oder als Holzruss. Sie treten bei automatischen Holzfeuerungen, welche geringe Emis-

1. A haute température, formation d'oxydes d'azote thermiques à partir de l'azote moléculaire et de l'oxygène de l'air de combustion.
2. A haute température, formation d'oxydes d'azote instantanés dans les flammes d'hydrocarbures également à partir de l'azote et l'oxygène de l'atmosphère.
3. Formation d'oxydes d'azote à partir de l'azote chimiquement lié en brûlant des combustibles qui contiennent de l'azote.

Comme les plantes contiennent de l'azote sous forme de protéines et d'amines, leur combustion libère des oxydes d'azote. Les émissions d'oxydes d'azote par des installations de chauffage sont donc plus importantes que celles d'installations de chauffage modernes à mazout ou à gaz; elles dépendent surtout de la teneur en azote du combustible [9]. En brûlant de bois laissé à l'état naturel (teneur en azote de 0,1–0,2 % en poids), les valeurs caractéristiques se situent entre 100 et 250 mg/m³ (pour 11 % en volume de O₂), alors qu'elles sont deux fois plus élevées en brûlant des déchets ligneux de panneaux de particules UF (teneur en azote de l'ordre de 3 % en poids).

Pour réduire les valeurs NO_x, on peut avoir recours aussi bien à des mesures primaires sans utiliser d'additifs qu'à des mesures secondaires en utilisant un agent réducteur. Les principales mesures primaires consistent en une gradation de l'air et une gradation du combustible [9]. On encourage en l'occurrence la transformation de l'oxyde d'azote du combustible en azote moléculaire (N₂) moyennant la constitution d'une zone en déficit d'oxygène dans laquelle réagissent les sous-produits qui contiennent de l'azote. Les deux méthodes présupposent le respect d'un apport sous-stoechiométrique d'air primaire et un bon mélange des gaz dans la zone de réduction. Pour procéder à la gradation de l'air, il faut en outre pouvoir compter sur une température de l'ordre de 1100 °C pour parvenir à une diminution significative des oxydes d'azote.

La gradation de l'air s'utilise surtout pour des combustibles sans tendance marquée à la scorification et pour des installations à partir de quelques centaines de kW, alors que la gradation du combustible est encore en phase de développement et s'utilise surtout pour de grosses installations de chauffage. Si des mesures primaires ne sont pas possibles ou si la diminution n'est pas suffisante, on utilise alors des mesures secondaires telles que la méthode de réduction sélective non catalytique ou la méthode de réduction sélective catalytique (SNCR, SCR). Avec les deux méthodes, la réduction du NO_x s'opère par injection d'ammoniac ou de solution d'urée. Avec la méthode SNCR qui s'utilise pour des installations à partir de 500 kW, le respect d'étroites limites de température joue un rôle déterminant. En utilisant de l'urée, on court en outre le risque de générer des produits secondaires indésirables tels que du gaz hilarant et de l'acide isocyanique. Pour des raisons de coût, l'utilisation de la méthode SCR qui permet de parvenir au plus haut degré de séparation se limite jusqu'ici à des applications particulières et de grosses installations.

2.6 Poussières fines

La principale substance nocive libérée par des installations de chauffage au bois est constituée par de fines poussières inhalables comportant des particules de moins de 10 micromètres (Particulate Matter PM₁₀), poussières constituées de deux composants [10].

D'une part, les produits d'une combustion incomplète tels que suies et goudron contribuent à la formation de poussières fines. Ces substances sont cancérigènes et mettent fortement la santé en danger. Ce sont surtout les installations de chauffage au bois à alimentation manuelle qui libèrent de fortes concentrations de pareilles substances organiques. Comparativement, de grosses chaudières à bûches parviennent à de basses émissions globales de poussières, émissions nettement inférieures à 50 mg/m³ (pour 13 % en volume de O₂). Il en va de même pour des poêles-cheminées idéalement exploités avec de modestes quantités de petites bûches. Exploités dans des conditions qui ne sont pas idéales, par exemple en surchargeant le foyer ou en fermant les clapets d'air trop hâtivement, des poêles à bois et des cheminées peuvent libérer des émissions dix fois plus importantes de poussières fines tout en dégageant simultanément d'importantes émissions d'hydrocarbures. Des émissions jusqu'à cent fois plus importantes peuvent se produire si, après avoir allumé le feu, on ferme les clapets d'air pour ralentir la combustion. Les poussières fines libérées sont en l'occurrence encore beaucoup plus toxiques que les suies d'un moteur Diesel, raison pour laquelle elles sont particulièrement critiques. Comme des analyses de l'atmosphère environnementale en attestent, la combustion du bois occasionne parfois une charge de suies de plus de 50 %; il faut donc empêcher de pareilles sources de nuisance moyennant des contrôles extrêmement stricts. Outre des installations de chauffage au bois mal exploitées, il faut en l'occurrence aussi lutter contre l'échappement de gaz de combustion à l'air libre.

sionen an Russ und Teer erzielen, in erhöhtem Mass auf und führen dort zu typischen Staubemissionen von 50 bis 150 mg/m³ (bei 13 Vol.-% O₂). Obwohl dieser Feinstaub somit weniger kritisch ist, werden in Zukunft für grössere automatische Holzheizungen Feinstaubabscheider eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für Anlagen ab 500 kW, da für diese Leistungsklasse eine Verschärfung des Emissionsgrenzwerts von 150 mg/m³ auf 20 mg/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) vorgesehen ist. Für Anlagen von 70 kW bis 500 kW ist eine Verschärfung von 150 mg/m³ auf 50 mg/m³, was bei Verwendung von qualitativ hochwertigem Energieholz teilweise auch mit Primärmassnahmen erreichbar ist.

2.7 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-/Luftverhältnis 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.

La combustion d'un bois peut d'autre part aussi générer des composants cendreaux salins par évaporation et oxydation dans les gaz brûlés, composants se déposant en fines poussières après refroidissement. Ces très fines poussières sont moins dangereuses pour la santé que les suies d'un moteur Diesel ou celles libérées par la combustion d'un bois. Avec des installations de chauffage au bois à alimentation automatique qui libèrent moins de suies et de goudron, ces fines poussières sont plus abondantes et peuvent se chiffrer à 50 – 150 mg/m³ (pour 13 % en volume de O₂). Quand bien même ces fines poussières sont moins critiques, il conviendra à l'avenir d'utiliser des séparateurs de poussières avec de grosses installations de chauffage au bois à alimentation automatique. Cette remarque s'applique tout particulièrement à des installations à partir de 500 kW, car il est prévu de faire passer la valeur limite d'émissions dans cette catégorie de puissance de 150 mg/m³ à 20 mg/m³ (pour 13 % en volume de O₂). Pour des installations de 70 kW à 500 kW, la valeur limite va passer de 150 mg/m³ à 50 mg/m³, ce qui est parfois réalisable en se contentant de mesures primaires moyennant l'utilisation d'un bois de haute qualité.

2.7 Exigences requises pour une combustion intégrale

En se basant sur le comportement en cours de combustion, les exigences suivantes sont requises pour assurer une combustion intégrale:

- Etant donné que le bois présente une teneur élevée en substances volatiles et que les gaz brûlent séparément du carbone solide, on distingue pour l'air de combustion de l'air primaire d'une part et de l'air secondaire d'autre part. L'air primaire assure la gazéification, alors que l'air secondaire assure la combustion des gaz. Une dissociation de l'air de combustion permet aussi d'améliorer les réglages, l'air primaire agissant surtout sur la puissance, alors que l'air secondaire assure la combustion des gaz.
- Un apport excédentaire d'oxygène est indispensable pour assurer une combustion intégrale. Avec des installations de chauffage au bois modernes, l'excédent d'air se situe généralement dans une plage de 1,4 à 1,8. Si l'excédent d'air chute au-dessous de la valeur optimale, des zones en déficit d'oxygène entraînent une augmentation des émissions. Avec un excédent d'air trop important, la température de combustion baisse et la flamme est refroidie par l'air secondaire; simultanément, le rendement de l'installation diminue. Comme l'excédent d'air correspond à une grandeur sensible sur le plan des émissions, les installations de chauffage modernes disposent de systèmes de régulation qui garantissent une exploitation optimale basée sur le rapport combustible/air. On utilise en l'occurrence des régulations qui se basent sur la mesure de la température, du CO, de lambda ou de O₂, resp. sur des combinaisons de ces diverses 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 s'effectue plus difficilement. La qualité de la combustion dans des installations de chauffage est donc dans la plupart des cas limitée par le mélange, alors que la combustion dans la phase gazeuse se déroule très rapidement à des températures de plus de 850 °C (de l'ordre de quelques millisecondes).

Pour parvenir à une combustion complète, l'air secondaire doit si possible bien se mélanger avec les gaz combustibles. Des mesures envisageables sont en l'occurrence des vitesses d'écoulement élevées et des équipements de mélange disposés dans le foyer.

- Une combustion complète nécessite une température suffisamment élevée et un temps de séjour suffisant des gaz dans la zone chaude. Comme valeur indicative, un temps de séjour d'environ 0,5 seconde à une température minimale de 850 °C est applicable. Outre le maintien d'une température moyenne optimale de la flamme, il faut également veiller à ce que ladite flamme ne se refroidisse pas trop sous l'action de parois froides ou de quantités d'air ponctuellement trop importantes. Dans des installations de chauffage à alimentation automatique, la température est en règle générale suffisamment élevée. Dans de petites installations, la nécessité de disposer d'une température élevée restreint 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 sa configuration. Une grande chambre de combustion ne sert en effet à rien si l'écoulement s'effectue unilatéralement.

En résumé, une combustion intégrale présuppose la satisfaction des conditions relatives au *temps de séjour des gaz dans la zone chaude, à la température, au mélange et à la disponibilité d'oxygène*. Pour autant que l'apport d'air soit suffisant – c'est-à-dire si l'exploitation s'effectue dans les règles de l'art –, la qualité de la combustion est généralement limitée par le mélange des gaz et de l'air de combustion. Au cours des années passées, la technique a constamment été améliorée, et le mélange a notamment été optimisé. Ces progrès ont contribué à faire en sorte que de nouvelles installations de chauffage présentent, comparativement à d'anciennes installations, un facteur d'émissions de monoxyde de carbone jusqu'à 10 fois inférieur et ne sont pas à l'origine de nuisances olfactives si leur exploitation

2.8 Ökobilanz von Holzbrennstoffen

Die Umweltbelastung verschiedener Heizsysteme kann anhand einer Ökobilanz abgeschätzt werden. Dazu werden die Schadstoffemissionen und weitere Umweltbelastungen über den gesamten Lebenszyklus erfasst und bewertet. Bei einem auf aggregierten Vergleich der Umweltbelastung anhand einer einzigen Kennzahl hängt das Endresultat jedoch entscheidend von der Gewichtung der einzelnen Umweltaspekte ab. Diese Gewichtung ist subjektiv, für den Vergleich erneuerbarer und nichterneuerbarer Energieträger aber entscheidend. So werden für eine auf aggregierte Ökobilanz zum Beispiel die Schädlichkeit von Feinstaub und Stickoxiden mit denjenigen von Kohlendioxid verglichen. Während Feinstaub und Stickoxide Gesundheitsschäden für die heutige Bevölkerung verursachen und teilweise lokal wirken, führt der Anstieg der Kohlendioxidemissionen zu Klimaveränderungen, welche global wirksam sind und Jahrzehnte später zum Tragen kommen. Da Holzheizungen höhere Schadstoffemissionen als Öl- und Gasheizungen verursachen, hängt das Resultat eines Vergleichs massgeblich von der Gewichtung heutiger Gesundheitsschäden gegenüber langfristiger Klimaveränderungen ab. Der Einfluss dieser Gewichtung geht aus Bild 12 hervor, in welchem die Umweltbelastungen von Holzheizungen mit einer Öl- und Gasheizung anhand der Eco indicator-Methode verglichen sind.

Bei starker Gewichtung des Treibhauseffekts sind alle Holzbrennstoffe um einen Faktor drei bis vier besser als Heizöl. Wenn der Treibhauseffekt dagegen schwach gewichtet wird, weist die Gasheizung die geringste Umweltbelastung auf. Die Ökobilanz gibt somit die Situation wieder, dass der erneuerbare Energieträger Holz vorteilhaft ist in Bezug auf Klima, jedoch kurzfristig höhere Luftbelastung verursacht. Die für die Holzheizungen ausgewiesenen Emissionen werden dabei zu je knapp 40 % durch Stickoxide und Feinstaub verursacht und sie gelten für Holzheizungen, die gut betrieben sind, jedoch weder über eine Feinstaubabscheidung noch über Massnahmen zur Stickoxidminderung verfügen. Schlecht betriebene Holzfeuerungen weisen somit eine mehrfach höhere Umweltbelastung aus als in der Grafik ausgewiesen, weshalb ein unsachgemässer Betrieb unbedingt zu vermeiden ist. Zukünftig mit Feinstaubabscheidern ausgeführte Holzheizungen verursachen dagegen gegenüber der Grafik eine deutlich verringerte Umweltbelastung.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Holzbrennstoffen sind vergleichsweise gering. Die Holzpellets weisen insgesamt die geringste Umweltbelastung auf, wobei für Holzpellets von rund halb so hohen Emissionen wie von anderen Holzheizungen ausgegangen wird.

Bild 12/figure 12

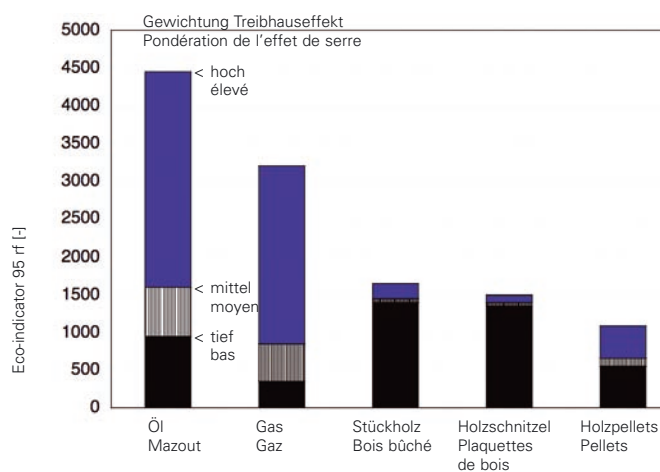


Bild 12

Umweltbelastung als Eco indicator-Punkte pro TJ Nutzenergie für Öl-, Gas-, Holz- und Holzpelleteheizungen für die drei Gewichtungsvarianten des Treibhauseffekts «hoch», «mittel» (= Grundvariante) und «tief». Alle Daten nach BUWAL-Studie [5] mit Ausnahme der Angaben für Holzpellets. Diese beruhen auf einer Abschätzung mit 50 % der Emissionen an Stickoxiden und Feinstaub von Holzschnitteln plus einem Zusatzaufwand von 20 % Heizöl für Trocknung und Pelletierung mit typischen Emissionen eines Trockners nach [4]. Der Einfluss des Treibhauseffekts wirkt sich deshalb auf die Pellets stärker aus als bei Holzschnittel, jedoch geringer als bei Öl und Gas.

s'opère dans les règles de l'art. Les conditions susmentionnées sont largement prises en compte avec des installations de chauffage au bois modernes. Pour garantir un fonctionnement peu polluant et un rendement élevé, il faut en l'occurrence utiliser un combustible adapté à l'installation et régler celle-ci correctement. Des installations de chauffage au bois modernes et correctement exploitées sont peu polluantes et peuvent contribuer à réduire l'effet de serre moyennant une utilisation toujours plus abondante du bois considéré comme vecteur énergétique.

2.8 Ecobilan des combustibles ligneux

La charge environnementale de différents systèmes de chauffage peut s'évaluer sur la base d'un écobilan. En l'occurrence, on saisit et pondère les émissions de substances nocives et autres nuisances environnementales sur tout un cycle de vie. Dans le cadre d'une comparaison de la charge environnementale basée sur un seul chiffre caractéristique, le résultat final dépend toutefois essentiellement de la pondération des différents aspects environnementaux. Cette pondération est subjective, mais déterminante pour comparer des vecteurs énergétiques renouvelables et non renouvelables. L'établissement d'un écobilan nécessite par exemple une comparaison de la nocivité des poussières fines et des oxydes d'azote avec celle du dioxyde de carbone. Alors que les poussières fines et les oxydes d'azote portent atteinte à la santé de la population et ont parfois des effets locaux, l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone provoque des changements climatiques, changements globaux et généraux qui déploieront encore leurs effets dans des dizaines d'années. Comme les installations de chauffage au bois produisent davantage d'émissions nocives que des installations de chauffage à mazout ou à gaz, le résultat d'une comparaison dépend d'une façon déterminante de la pondération des atteintes à la santé par rapport aux changements climatiques à long terme. L'importance de cette pondération ressort de la figure 12 qui compare les nuisances environnementales d'installations de chauffage au bois, à mazout et à gaz sur la base de la méthode de l'Eco-indicator.

En pondérant fortement l'effet de serre, tous les combustibles ligneux sont affectés d'un facteur de trois à quatre fois meilleur que celui d'une huile de chauffage. Si l'effet de serre est par contre faiblement pondéré, le chauffage au gaz présente la plus faible charge environnementale. L'écobilan fait ainsi ressortir que le bois, vecteur énergétique renouvelable, se révèle avantageux en termes climatiques, mais occasionne une forte pollution atmosphérique à court terme. Les émissions libérées par des installations de chauffage au bois sont en l'occurrence imputables à raison de 40 % chaque fois à des poussières fines et à des oxydes d'azote. Elles sont valables pour des installations qui fonctionnent bien, mais ne disposent pas d'un système de séparation des poussières fines et ne profitent pas de mesures destinées Comparativement, les différences entre les divers combustibles ligneux sont relativement faibles. Globalement, les pellets présentent la charge environnementale la plus faible, celle-ci étant approximativement équivalente à la moitié de celle émise par d'autres installations de chauffage au bois.

figure 12

Charge environnementale comme points d'Eco-indicator par TJ d'énergie utile pour des installations de chauffage à mazout, à gaz, au bois et à pellets, pour les trois variantes de pondération de l'effet de serre «élevé», «moyen» (= variante de base) et «bas». Toutes les données sont tirées de l'étude OFEFP [5], à l'exception des données pour les pellets. Celles-ci reposent sur une estimation avec 50 % des émissions d'oxydes d'azote et de poussières fines de plaquettes de bois, plus une dépense supplémentaire de 20 % de mazout pour le séchage et la confection des pellets, y compris les émissions typiques d'un séchoir selon [4]. L'influence de l'effet de serre agit donc plus fortement sur des pellets que sur des plaquettes de bois, mais plus faiblement que sur du mazout ou du gaz.

3 Literatur/Bibliographie

- [1] Internationale Energie Agentur IEA: World Energy Outlook 2006, www.worldenergyoutlook.org
- [2] Bundesamt für Energie: Gesamtenergiestatistik 2005, www.bfe.admin.ch
- [3] Bundesamt für Energie: Gesamtenergiestatistik 2004, www.bfe.admin.ch
- [4] Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4: Planungshandbuch, Holzenergie Schweiz, Zürich 2004 und C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2004, ISBN 3-937441-90-5
- [5] Oettli, B., et al.: Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Bundesamt für Energie, Bern, 2004
- [6] Primas, A., Kessler, F.: Schweizerische Holzenergiestatistik, Folgeerhebung für das Jahr 2004, Bundesamt für Energie, Bern 2005
- [7] Primas, A., Kessler, F., Knechtle, N.: Schweizerische Holzenergiestatistik, Erhebung für das Jahr 2005 mit modifizierter Erfassungsmethodik, Bundesamt für Energie, Bern 2006
- [8] Nussbaumer, Th.: Verbrennung, Energie aus Biomasse, Springer, Berlin 2001, ISBN 3-540-64853-42001, 287–322
- [9] Nussbaumer, Th.: Primär- und Sekundärmassnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen, Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen, Springer-VDI, Düsseldorf 1997, 279–308
- [10] Nussbaumer, Th.: Holzfeinstaub und Dieseleruss: Gleiche Korngrösse mit teilweise ganz unterschiedlicher Wirkung, Fachmagazin für Hafner und Plattenleger, Nr. 2 2006, 14–19

4 Adressen/Adresses

BFE
Bundesamt für Energie
CH-3003 Bern
Telefon 031 322 56 11
www.bfe.admin.ch

BAFU
Bundesamt für Umwelt
CH-3003 Bern
Telefon 031 322 93 11
www.bafu.admin.ch

SFIH - Holzfeuerungen Schweiz
Industriestrasse 17, Postfach 60
CH-4410 Liestal
Telefon 061 901 35 66
www.sfih.ch

Holzindustrie Schweiz
Schweizer Verband der Säge- und Holzindustrie
Mottastrasse 9
CH-3000 Bern 6
Telefon 031 350 89 89
www.holz-bois.ch
admin@holz-bois.ch

Holzenergie Schweiz
Neugasse 6
CH-8005 Zürich
Telefon 044 250 88 11
www.holzenergie.ch
info@holzenergie.ch

VKF
Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen
Bundesgasse 20, Postfach
CH-3001 Bern
Telefon 031 320 22 22
www.vkf.ch
mail@vkf.ch

VHP
Verband Schweizerischer Hafner- und Plattengeschäfte
Solithurnerstrasse 236
CH-4603 Olten
Telefon 062 205 90 80
www.vhp.ch
info@vhp.ch

WVS
Waldwirtschaft Schweiz
Rosenweg 14
CH-4501 Solothurn
Telefon 032 625 88 00
www.wvs.ch
info@wvs.ch