

Verbrennungstechnik

Ing. Leopold Lasselsberger, Bundesanstalt für Landtechnik (BLT)

1 Grundlagen der Verbrennungstechnik[1] und technische Umsetzung

Zusammensetzung von Holz

Feste Brennstoffe lassen sich sowohl durch ihre brennbaren und nicht brennbaren Bestandteile als auch durch ihre Elementaranalyse beschreiben. Nicht brennbare Bestandteile sind Asche und Wasser (Abb. 1). Holz unterscheidet sich von Kohle durch einen hohen Gehalt an flüchtigen (vergasbaren) Bestandteilen und einen geringen Gehalt an Asche. Der Wassergehalt von Holz ist variabel. Erntefrisches Waldholz hat einen Wassergehalt von 40 % bis 50 %, lufttrockenes Holz enthält 15 % bis 20 % Wasser.

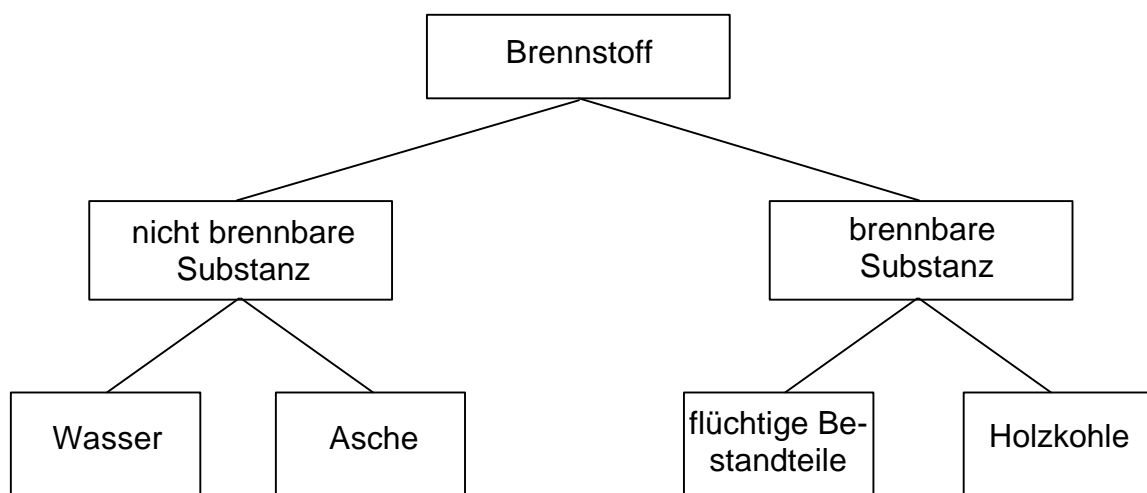


Abbildung 1: Schematische Zusammensetzung von festen Brennstoffen [2]

Die brennbaren Bestandteile sind hauptsächlich Kohlenstoff und Wasserstoff, daneben auch (unerwünschter) Schwefel. Als Ballaststoffe kommen Sauerstoff, Stickstoff, Asche und Wasser vor. In der Asche sind diejenigen festen Rückstände erfasst, die nicht mit Sauerstoff reagieren können, also z.B. Quarz u.a., aber auch der in Karbonaten gebundene Kohlenstoff und Sulfidschwefel. Die einzelnen Elemente liegen im Brennstoff in meist nicht näher bekannten Bindungen vor.

Die Mengen der vorhandenen Elemente werden durch eine **Elementaranalyse** ermittelt und als Massenanteile angegeben. Auch von der Asche und vom Wasser werden die Massenanteile bestimmt. Zur Kennzeichnung der Massenanteile werden

Kleinbuchstaben verwendet, z.B. bei Kohlenstoff (*c*), bei Wasserstoff (*h*), bei der Asche (*a*), beim Wassergehalt (*w*) usw.

Die **Elementarzusammensetzung** sagt etwas über den Heizwert des Brennstoffes aus, ermöglicht auch Rückschlüsse auf die zu erwartenden Emissionen und den Ascheanfall bei der Verbrennung. Holz (wie auch andere pflanzliche Biobrennstoffe) enthält erhebliche Mengen an gebundenem Sauerstoff. Dies zeigt an, dass ein Teil der Verbindungen bereits teilweise oxidiert ist. Holz hat daher einen geringeren Heizwert als Holzkohle oder Koks (besteht nahezu vollständig aus Kohlenstoff) oder Kohlenwasserstoffe (Gas und Heizöl), wie es aus der Abb. 2 ersichtlich ist.

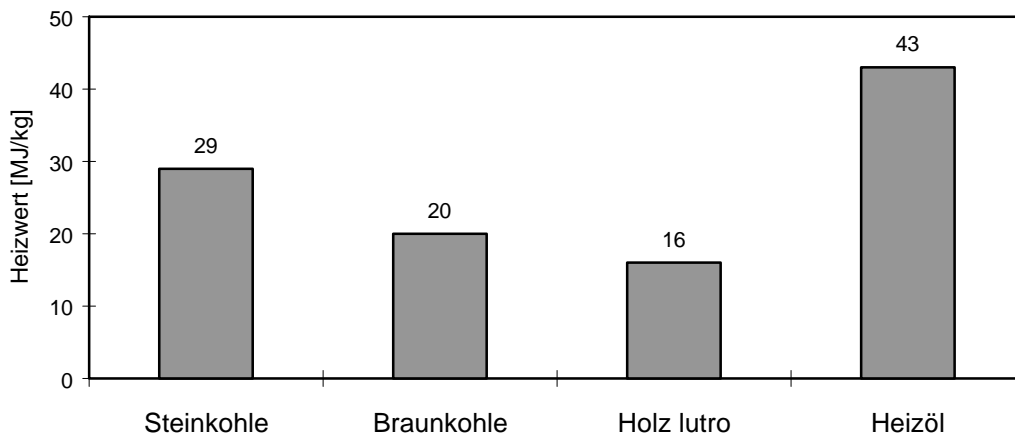


Abbildung 2: Heizwert verschiedener Brennstoffe im Vergleich [2]

Der Heizwert von Holz wird weiter durch den Gehalt an Stickstoff, an aschebildenden Mineralien und an Wasser vermindert.

Wassergehalt und Brennwert

Die entscheidende Größe des Holzes ist der **Wassergehalt** (*w*). Holz enthält in der Praxis stets mehr oder weniger Wasser. Der Wassergehalt hat einen Einfluss auf das Verbrennungsverhalten des Holzes und den Heizwert. Bei der Trocknung verflüchtigt sich das Wasser. In Freiluftlagerung erreicht das Holz den sogenannten **lufttrockenen Zustand** (lutro) von 15 % bis 20 %. Durch Erwärmung auf Temperaturen über 100 °C lässt sich die Holzfeuchte vollkommen entfernen. Dieser Zustand wird als **absolut trocken** (atro) bezeichnet.

Die **Holzfeuchte** (*u*) ist der Anteil des im Holz enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse des wasserfreien Holzes und wird aus der Differenz zwischen Frischgewicht (G_u =Gewicht bei *u* % Feuchte) und Darrgewicht (G_o =absolut Trockengewicht) errechnet.

$$u = \frac{G_u - G_o}{G_o} \cdot 100 \text{ in } \%$$

Der Wassergehalt (w) ist der Anteil des im Holz enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse des wasserhaltigen Holzes (Frischgewicht) und errechnet sich nach der Formel:

$$w = \frac{G_u - G_o}{G_u} \cdot 100 \quad \text{in \%}$$

Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Holzfeuchte:

$$w = \frac{100 \cdot u}{100 + u} \qquad u = \frac{100 \cdot w}{100 - w}$$

Ein hoher Wassergehalt vermindert den Heizwert pro kg Brennstoff (Abb. 3) und führt zu niedrigeren Verbrennungstemperaturen, die einen unvollständigen Ausbrand begünstigen.

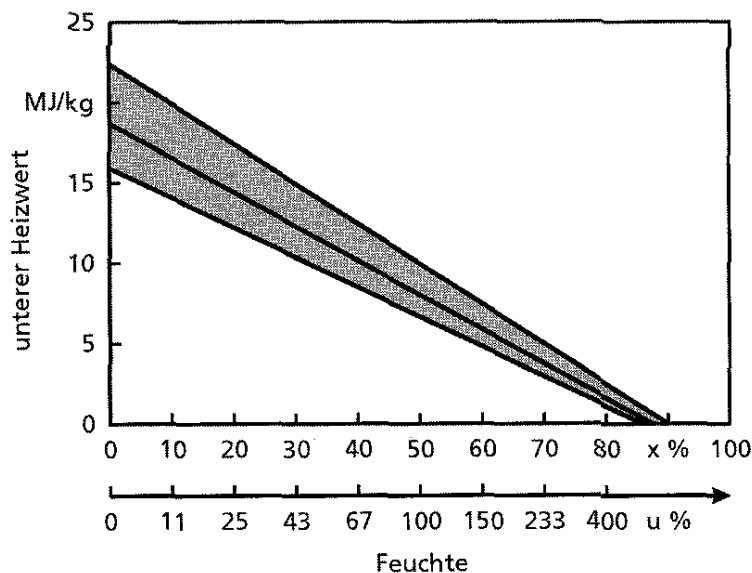


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Wassergehalt w bzw. Holzfeuchte u und dem Heizwert H_u bei Holz [2]

Die im Brennstoff gebundene Energie wird durch den Brennwert bzw. den Heizwert gekennzeichnet und stellt eine weitere wichtige Kennzahl des Brennstoffes dar.

Der **Brennwert** (H_o), früher oberer Heizwert oder Verbrennungswärme genannt, ist der Quotient aus der durch vollständige Verbrennung frei werdenden Wärmemenge und der Masse des Stoffes unter der Voraussetzung, dass

- die Temperatur des Brennstoffes vor dem Verbrennen und die seiner Verbrennungsprodukte 25 °C beträgt
- das vor der Verbrennung im Brennstoff bereits vorhandene und das durch die Verbrennung zusätzlich gebildete Wasser nach der Verbrennung in flüssiger Form vorliegt

- die Verbrennungsprodukte von Kohlenstoff und Schwefel als Kohlendioxid, Schwefeldioxid gasförmig vorliegen
- eine Oxidation des Stickstoffes nicht stattgefunden hat.

Der **Heizwert** (H_u), früher unterer Heizwert genannt, ist der Quotient aus der durch vollständige Verbrennung freiwerdenden Wärmemenge und der Masse des Stoffes unter der Voraussetzung, dass

- die Temperatur des Brennstoffes vor dem Verbrennen und die seiner Verbrennungsprodukte 25 °C beträgt
- das vor der Verbrennung im Brennstoff bereits vorhandene und das durch die Verbrennung zusätzlich gebildete Wasser nach der Verbrennung dampfförmig (bei 25 °C) vorliegen
- die Verbrennungsprodukte von Kohlenstoff und Schwefel als Kohlendioxid, Schwefeldioxid gasförmig vorliegen
- eine Oxidation des Stickstoffs nicht stattgefunden hat.

Der Brennwert ist um den Betrag der Verdampfungswärme des in den Abgasen enthaltenen Wassers größer als der Heizwert. In allen technischen Feuerungen enthalten die Abgase das Wasser in dampfförmigem Zustand, so dass bei Verbrennungsrechnungen i.a. mit dem Heizwert zu rechnen ist.

Es ist also:

$$H_o = H_u \cdot r \cdot \frac{(9H + W)}{100} \quad [\text{kJ /kg}]$$

- r Verdampfungsenthalpie des Wassers = 2441 kJ/kg bei 25 °C
- W Wassergehalt des Brennstoffes in %
- H Wasserstoffgehalt des Brennstoffes in %

Bei festen Brennstoffen lässt sich die genaue Größe des Heizwertes wegen der vielen möglichen Bindungsarten der Elemente nur auf kalorimetrische Weise ermitteln. Angenähert ist bei bekannter Zusammensetzung eines Brennstoffes der empirisch ermittelte Heizwert:

Feste und flüssige Brennstoffe (nach Boie):

		Brennstoff
H_u	$= 34,8 \cdot c + 93,9 \cdot h + 6,3 \cdot n + 10,5 \cdot s - 10,5 \cdot o - 2,5 \cdot w$	[kJ/kg]
c	Gehalt an Kohlenstoff	[kg/kg]
h	Gehalt an Wasserstoff	[kg/kg]
n	Gehalt an Stickstoff	[kg/kg]
o	Gehalt an Sauerstoff	[kg/kg]
s	Gehalt an Schwefel	[kg/kg]
w	Gehalt an Wasser	[kg/kg]

Der **Energiegehalt** und Raumbedarf von Holz bei einem Wassergehalt von 15 %:

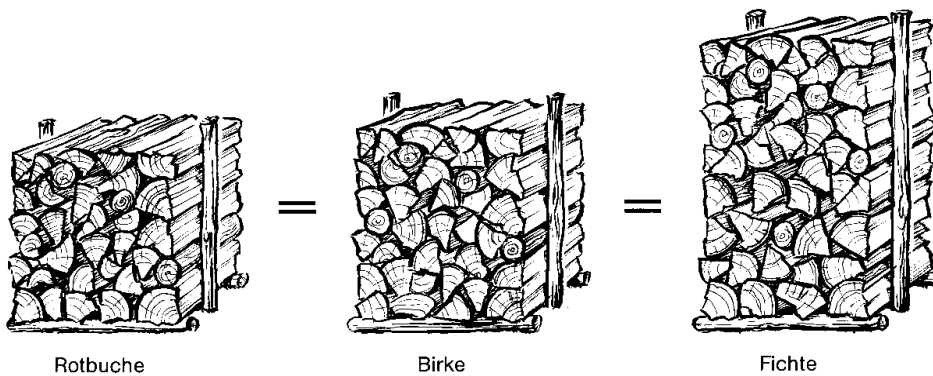


Abbildung 4: Rauminhalt von Holz
1 rm Buchenholz enthält gerade soviel Energie wie 1,56 rm Fichtenholz

Stückholz	[kg/rm]	[kWh/rm]
Buche 1rm, geschichtet	560	2325
Fichte 1rm, geschichtet	340	1490

Aufbau von Holz

Die Beschreibung der Zusammensetzung von Holz kann einerseits durch die chemischen Bestandteile erfolgen, welche die Holzsubstanz aufbauen (Tab. 1), andererseits durch die Elementaranalyse (Tab. 2).

Holz besteht zu fast 50 % aus Zellulose (verleiht dem Holz die Struktur), das in eine Matrix aus Hemizellulose (diese Matrix dient als Traggerüst) und Lignin (Bindemittel zwischen Zellulose und Hemizellulose) eingebettet ist. Weitere Bestandteile des Holzes sind Harze, Wachse, Fette, mineralische Stoffe usw.

	Hartholz	Weichholz
Zellulose	40-50	40-45
Hemizellulose	22-40	24-37
Lignin	30-35	26-38

Tabelle 1: Grundbausteine des Holzes [3]

Schwefel, Chlor sowie Schwermetalle sind in sehr kleinen Mengen im Holz vorhanden. Schädliche Emissionen, die auf diese Elemente zurückzuführen sind, treten bei der Holzverbrennung nicht auf.

	C	H	O	N	a
Fichte	50,74	5,40	43,47	0,10	0,29
Buche	49,67	5,30	44,36	0,22	0,45
Tanne	50,84	5,20	43,42	0,17	0,31

Tabelle 2: Elementarzusammensetzung von Holz bezogen auf die Trockenmasse in % [3]

Vergleicht man den Gehalt von ökologisch relevanten Spurenstoffen von Holz mit dem von Kohle, dann ist naturbelassenes Holz (Tabelle 3) ein sauberer Brennstoff.

Element	Holz	Kohle
Arsen	< 0,5 - 1	2 - 50
Blei	0,5 - 5	25 - 200
Chlor	10 - 100	> 1000
Chrom	< 0,5 - 5	5 - 100
Fluor	0,5 - 30	25 - 250
Kupfer	< 0,5 - 5	10 - 100
Quecksilber	< 0,5	0,5 - 1
Schwefel	100 - 400	5000 - 20000

Tabelle 3: Gehalt von Spurenelementen in naturbelassenem Holz und in Kohle in mg/kg Trockengewicht [2]

Ablauf der Holzverbrennung

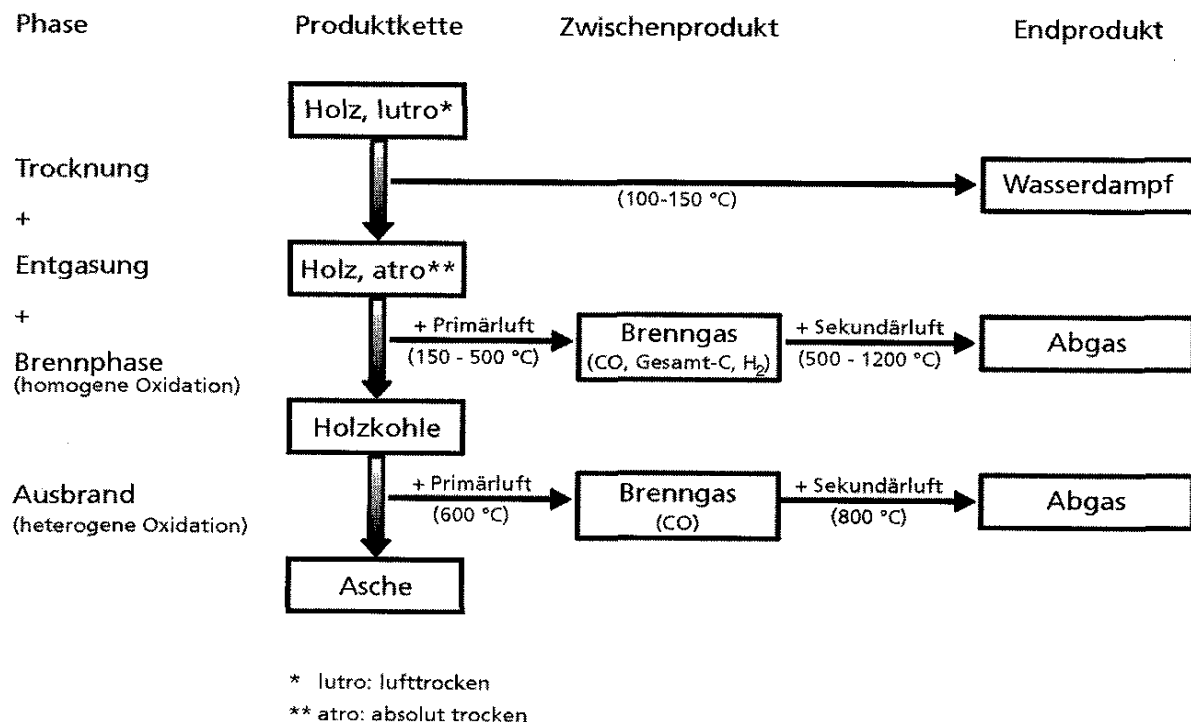


Abbildung 5: Schematischer Verlauf der bei der Holzverbrennung ablaufenden Vorgänge [2]

Die Verbrennung von Holz ist ein komplexer Vorgang, der in mehreren Stufen abläuft (Abbildung 5). Die Verbrennung beginnt mit der Trocknungs- und Entgasungsphase. Das Holz gibt zunächst das Wasser (15 bis 20 Massen- % bei luftgetrocknetem Holz) ab. Da für die Verdampfung des Wassers Energie gebraucht wird, verringert sich der Heizwert mit steigendem Wassergehalt.

In dieser Phase steigt die Temperatur des Holzes kaum über 100 °C. Wenn das auf der Oberfläche anhaftende oder in Hohlräumen der Zellen befindliche Wasser verdampft ist, steigt die Temperatur des Holzes.

Bereits ab 60 °C werden aus der Holzsubstanz die ersten organischen Abbauprodukte in Spuren freigesetzt. Die eigentliche thermische Zersetzung aber beginnt bei 160 bis 180°C (Pyrolyse oder Entgasungsphase). Mit steigender Temperatur nehmen die Abbaureaktionen immer stärker zu. Ab ca. 250 °C wird der Zersetzungsvorgang heftig. Jetzt erzeugen die Zersetzungsreaktionen mehr Wärme als sie verbrauchen. In dieser Phase sind die Pyrolysereaktionen nicht mehr kontrollierbar und eine Ursache dafür, warum die Verbrennung von Holz in einer handbeschickten Feuerung nicht durch Luftdrosselung geregelt werden kann. Die Entgasungsphase (Pyrolysephase) dauert bis etwa 600 °C an. Dann hat das luftgetrocknete Holz rund 85 % seiner Masse in Form vom Wasser, Kohlenstoffdioxid und brennbaren gasförmigen Produkten verloren. Es verbleibt energiereiche Holzkohle (Abb. 6).

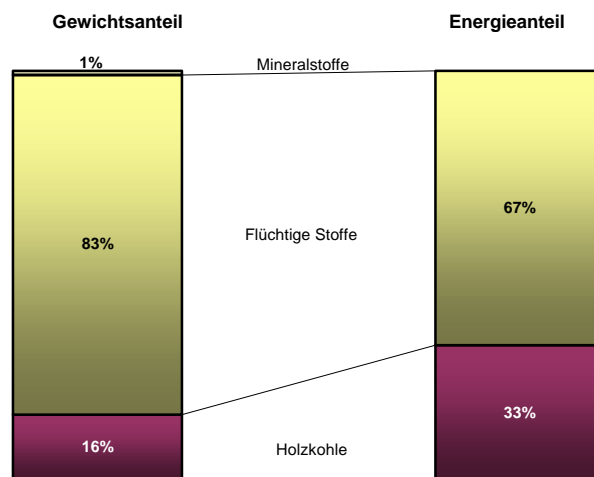


Abbildung 6: Gewichts- und Energieanteil der festen und flüchtigen Stoffe in Holz [4]

Während der Entgasungsphase werden ca. 70 % des Heizwertes von Holz freigesetzt. Das bei der Entgasung gebildete Gas enthält als brennbare Bestandteile vor allem Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff und organische Verbindungen. Das Gas ist sehr reaktiv und reagiert unter Flammenbildung in Gegenwart von Luft zu CO₂ und H₂O durch Freisetzung von Wärme (Energie). Werden die Verbrennungsvorgänge an dieser Stelle vorzeitig gestört, z.B. durch Wärmeentzug, dann entsteht ein schadstoffreiches und geruchintensives Gas, das außerdem mit schwer flüchtigen organischen Verbindungen, Ruß und Teer beladen ist.

Wesentliche Aufgabe des Konstrukteurs und des Betreibers einer Holzfeuerung ist es daher, einen möglichst ungestörten Ausbrand der Brenngase zu ermöglichen.

Verbrennung der Brenngase

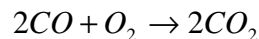
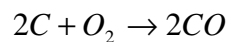
Die Reaktionen in der Flamme laufen über sogenannte Radikale ab. **Radikale** sind Moleküle oder Atome, die ungepaarte Elektronen haben und sehr reaktiv sind. Sie entstehen aus normalen Molekülen oder Atomen bei höheren Temperaturen oder aus bereits vorhandenen Radikale.

In dieser Phase ist es notwendig, ausreichend Luftsauerstoff zuzuführen und mit dem Brenngas gut zu vermischen und ausreichend lang reagieren zu lassen.

Verbrennung der Holzkohle

Das Endprodukt der Pyrolyse (Entgasung) von Holz ist Holzkohle. Dieser kohlenstoffreiche Rückstand (ca. 90 % C) verbrennt bei Temperaturen über 600 °C mit einer kleineren Flamme. Die Oxidation der Holzkohle setzt nochmals ca. 30 % des Heizwertes vom Holz frei. Am Ende der Verbrennung verbleibt die Asche mit einem Anteil von ca. 0,5 bis 1 Masse- %.

Holzkohle verbrennt weniger heftig. Chemisch gesehen ist es eine heterogene Reaktion. Luftsauerstoff (Gas) muss die Oberfläche von Holzkohle (Feststoff) erreichen. Es entsteht zuerst CO, das weiter mit Luftsauerstoff zu CO₂ reagiert (Boudouard Gleichgewicht).



Die Holzfeuerung verhält sich in dieser Phase wie eine mit gasarmen Festbrennstoff (Koks, Kohle) betriebene Anlage.

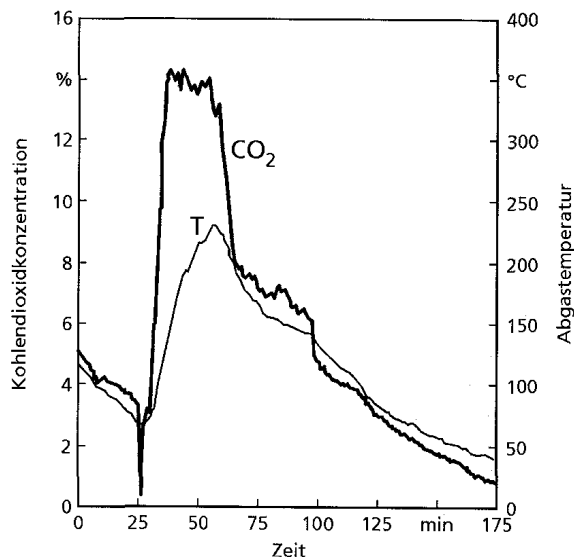


Abbildung 8: Verlauf der Temperatur und der CO₂-Konzentration im Abgas einer handbeschickten Holzfeuerung [2]

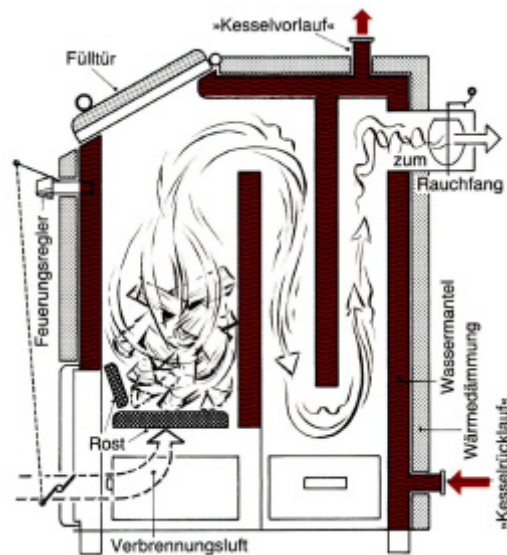


Abbildung 9: Durchbrandkessel

Der stufenweise Verlauf der Verbrennung lässt sich gut am Verlauf der CO₂-Konzentration im Abgas einer handbeschickten Feuerung erkennen (Abb. 8).

Bei Aufgabe von 10 kg Holz (luftgetrocknet) ist die Trocknungszeit nach ein paar Minuten zu Ende. Es setzt die Entgasungsreaktion, verbunden mit Flammenbildung und einem steilen Anstieg der CO₂-Konzentration ein. Nach ca. 15 Minuten erreichen die Verbrennungsvorgänge und die CO₂-Konzentration ein Maximum, das einige Minuten anhält. Danach nimmt der CO₂-Wert ab. Nach einer Stunde sind mehr als

95 % des Holzes verbrannt. Auch der Temperaturverlauf im Abgas (nach der Brennkammer) spiegelt diese Vorgänge wieder.

Bei kontinuierlich arbeitenden Feuerungen laufen die Vorgänge parallel ab, d.h. sie sind räumlich und zeitlich getrennt. Abbildung 10 zeigt eine Rostfeuerung, bei der die einzelnen Zonen nacheinander auf einem beweglichen Rost angeordnet sind.

Dem mehrstufigen Verbrennungsablauf des Holzes wird dadurch Rechnung getragen, dass die Verbrennungsluft stufenweise zugeführt wird. Mindestanforderung für eine Holzfeuerung ist eine zweistufige Luftzufuhr, die als Primär- und Sekundärluft bezeichnet wird.

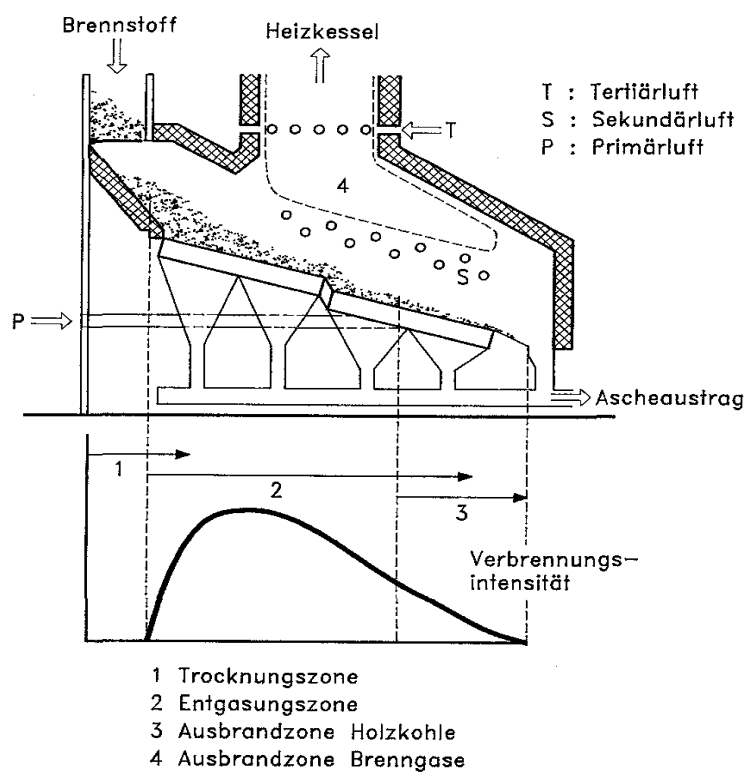


Abbildung 10: Räumliche Differenzierung der verschiedenen Phasen des Verbrennungsvorgangs bei Holz bei einer Schrägrostfeuerung [2]



Abbildung 11: moderne Holzfeuerung mit Hochtemperaturverbrennung

Verbrennungsgleichungen

Die brennbaren Bestandteile des Brennstoffes können mit Sauerstoff folgende Verbindungen eingehen:

C	+	O_2	=	CO_2
1 kmol		1 kmol		1 kmol
12 kg		32 kg		44 kg
12 kg		22,41 m ³		22,41 m ³
1 kg		1,867 m ³		1,867 m ³
$2 \cdot H_2$	+	O_2	=	$2 \cdot H_2O$
2 kmol		1 kmol		2 kmol
4 kg		32 kg		36 kg
4 kg		22,41 m ³		44,82 m ³
1 kg		5,6 m ³		11,2 m ³
S	+	O_2	=	SO_2
1 kmol		1 kmol		1 kmol
32 kg		32 kg		64 kg
32 kg		22,41 m ³		22,41 m ³
1 kg		0,7 m ³		0,7 m ³

Sauerstoffbedarf

Aus der Elementaranalyse eines Brennstoffes lässt sich der zur Verbrennung von festen (und flüssigen) Brennstoffen erforderliche Sauerstoffbedarf berechnen.

$$O_{2,\min} = 1,867 \cdot c + 5,6 \cdot h + 0,7 \cdot s - 0,7 \cdot o \quad [Nm^3/kg \text{ Brennstoff}]$$

Luftbedarf

Die zur vollkommenen Verbrennung von Brennstoffen theoretisch erforderliche Luftmenge wird als Mindestluftbedarf (L_{min}) bezeichnet.

In 1 Nm³ Luft sind 0,21 Nm³ und 0,79 Nm³ Stickstoff enthalten.

Die Luftmenge, die theoretisch zur vollständigen

Verbrennung erforderlich ist, beträgt daher

$$L_{min} = \frac{O_{2,min}}{0,21} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg Brennstoff}]$$

Faustformel zur Berechnung von Mindestluftbedarf:

$$L_{min} \approx 0,25 \text{ Nm}^3 \text{ je } 1000 \text{ kJ Heizwert.}$$

Luftüberschuss

Bei allen technischen Feuerungen ist jedoch, um eine vollkommene Verbrennung zu erhalten, mehr Luft zuzuführen, als theoretisch erforderlich ist, da sonst nicht jedem brennbaren Molekül der erforderliche Sauerstoff zugeteilt werden könnte.

Das Verhältnis der wirklich zugeführten Luftmenge L zu L_{min} nennt man (Luftverhältniszahl) Luftzahl λ .

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}} \quad [-]$$

Die tatsächlich zuzuführende Verbrennungsluftmenge ist

$$L = \lambda \cdot L_{min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg Brennstoff}]$$

Verbrennungsgasmenge

Enthalten die Verbrennungsgase noch Staub, Flugasche oder sonstige Feststoffe (Ruß), so spricht man von Rauchgasen. In den Schornstein eintretende reine oder gereinigte Gase sind Abgase. Bei vollständiger Verbrennung kann das Verbrennungsgas CO₂, SO₂, H₂O, N₂ und O₂ enthalten. Die gesamte auf die Brennstoffmenge bezogene feuchte Verbrennungsgasmenge ($V_{A,f}$) ist

$$V_{A,f} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$$

Ein Teil dieser Bestandteile entsteht bei der chemischen Reaktion des Brennstoffes, z.B. wird aus 1 kmol C 1 kmol CO₂. Aus der in 1 kg Brennstoff enthaltenen Kohlenstoffmenge $c/12$ (kmol C/kg Brennstoff) entsteht demnach die CO₂-Menge $c/12$ (kmol C/kg Brennstoff). Entsprechendes gilt für die übrigen brennbaren Elemente. Daneben gehen die im Brennstoff und in der Verbrennungsluft vorhandenen Wasser- und Stickstoffmengen und der überschüssige Sauerstoff in das Verbrennungsgas über. Die Stickstoffmenge des Brennstoffes ist $n/28$ (kmol N₂/kg Brennstoff), die Wassermenge im Brennstoff ist $w/18$ (kmol H₂O/kg Brennstoff).

Der Stickstoffgehalt der Luft ist $0,79 \cdot L_{\min}$, der Sauerstoffüberschuss ist $0,21 \cdot (L - L_{\min}) = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\min}$.

Trockene Abgasmenge $V_{A,tr}$

$$V_{A,tr} = N_{2,\min} + 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + (I - 1) \cdot 0,21 \cdot L_{\min} = I \cdot 0,79 \cdot L_{\min} + 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + (I - 1) \cdot 0,21 \cdot L_{\min}$$

$$V_{A,tr} = 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + (I - 0,21) \cdot L_{\min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg Brennstoff}]$$

Feuchte Abgasmenge $V_{A,f}$

$$V_{A,f} = V_{A,tr} + 11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w \quad [\text{Nm}^3/\text{kg Brennstoff}]$$

Unvollständige Verbrennung

Bei der unvollständigen Verbrennung treten im Verbrennungsgas brennbare Gase wie CO, CH₄ oder H₂ auf. Daher sind die oben genannten Gleichungen nicht anzuwenden.

Die Ursache kann Luftmangel oder ungenügende Durchmischung von Brennstoff und Luft (trotz ausreichender Luftzufuhr) sein. Weiters kann auch freier Sauerstoff im Verbrennungsgas auftreten. In Feuerungen ist die unvollständige Verbrennung wegen der hohen Verluste durch die chemisch gebundene Energie unerwünscht, da 1 % CO im Verbrennungsgas bereits einen Wirkungsgradverlust von etwa 4 % bis 6 % verursacht.

Die Verbrennungsgasmenge und -zusammensetzung ändern sich gegenüber der vollständigen Verbrennung durch die brennbaren Gase sowie den bei ungenügender Durchmischung nicht verbrauchten Sauerstoff.

Taupunkt der Rauchgase

Als **Taupunkt** eines wasserdampfhaltigen Gases wird die Temperatur bezeichnet, unterhalb der ein Auskondensieren des Wasserdampfes erfolgt, d.h. Tauwasserbildung einsetzt. Der Wasserdampf im Rauchgas kondensiert beim Taupunkt (Abb.12).

Wassergehalt und Wassertaupunkt von Abgas

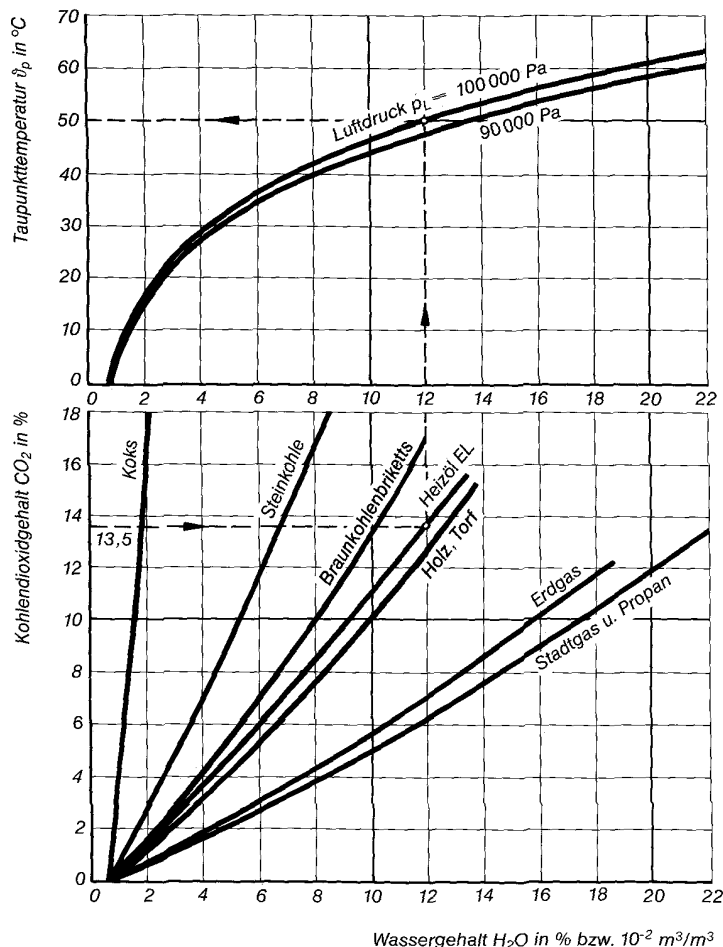


Abbildung 12: Taupunkt für Wasserdampf bei verschiedenen Brennstoffen in Abhängigkeit vom Luftverhältnis (CO₂-Gehalt) [5]

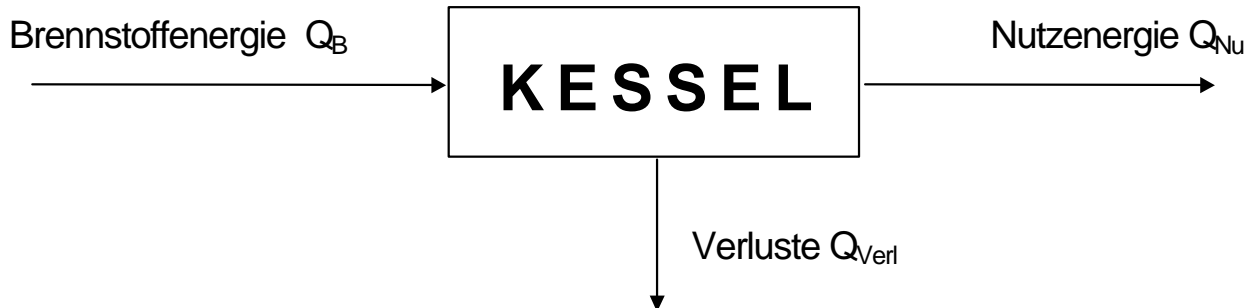
Da das aus dem Gas stammende Kondenswasser durch Lösen anderer Abgasbestandteile im Allgemeinen sauer reagiert, sollte zur Vermeidung von Korrosion eine Taupunktunterschreitung in herkömmlichen Anlagen weitgehendst vermindert werden. Eine Ausnahme bilden hier die speziell für den Kondensationsbetrieb vorgesehenen Feuerungs- oder Wärmeerzeugungsanlagen.

Der Taupunkt ist abhängig von der Brennstoffart und dem Luftüberschuss. Er steigt auch mit dem Schwefelgehalt des Brennstoffes an, was besonders bei schwefelhaltigen Brennstoffen zu beachten ist (Säuretaupunkt).

Die Taupunkttemperatur der Abgase ist um so höher, je höher der Wasser- und Wasserstoffgehalt des Brennstoffes ist.

Wärmebilanz und Kesselwirkungsgrad

Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmeerzeugungsanlage ist durch den Anteil der ausgenutzten Wärme zu der im Brennstoff enthaltenen Energie bestimmt. Zum Nachweis der Nutzwärmeabgabe dient eine Wärmebilanz (Abb. 13) und die daraus resultie-



rende Berechnung des Wirkungsgrades η .

Abbildung 13: Wärmebilanz einer Feuerung

Wirkungsgrad

Der **Wirkungsgrad** ist das unter Prüfbedingungen ausgedrückte Verhältnis von zugeführter zur abgegebenen Wärme. Es ergeben sich zwei Methoden zur Ermittlung des Wirkungsgrades.

Direkte Methode

Bei dieser Methode wird der Wirkungsgrad (η_K) direkt über die abgegebene Nutzwärme bestimmt. Der Wirkungsgrad nach der direkten Methode ist das Verhältnis in Prozent von eingesetzter Leistung (Brennstoffenergiestrom Q_B) zur nutzbaren Leistung (Nutzenergiestrom Q_{Nu}). Die erzeugte Wärme wird an einen Wärmeträger übertragen, z.B. Wasser

$$h_K = \frac{Q_{Nu}}{Q_B} \cdot 100$$

$$h_k = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_V - T_R)}{H_u \cdot B} \cdot 100 \text{ in } \%$$

m Wasserdurchfluss [kg/h]

c_p spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgers [kJ/kgK] (Wasser ~4,2 kJ/kgK)

T_V Vorlauftemperatur [K]

T_R Rücklauftemperatur [K]

H_u Heizwert des Brennstoffes [kJ/kg]

B Brennstoffmenge [kg/h]

Indirekte Methode

In der Praxis ist das direkte Messen der zugeführten und nutzbar abgegebenen Wärme schwierig oder teilweise unmöglich. Deshalb begnügt man sich bei Kontrollmessungen meistens mit der Bestimmung des Wirkungsgrades nach der indirekten Methode. Der Wirkungsgrad nach der indirekten Methode in Prozent entspricht der eingesetzten Leistung (Brennstoffenergiestrom Q_B) minus der Verluste Q_{Verl} .

$$h_K = \frac{Q_{Nu}}{Q_B} \cdot 100 = \frac{Q_B - \sum Q_{Verl}}{Q_B} \cdot 100 = 100 - \frac{\sum Q_{Verl}}{Q_B} = 100 - (Q_A + Q_U + Q_F + Q_S)$$

Q_A Abgasverluste

Q_U Unverbrannte Gase

Q_F Brennbare Rückstände

Q_S Strahlungsverluste

Abgasverluste durch freie Wärme

Wenn die Abgase den Kessel verlassen, besitzen sie noch eine höhere Temperatur als die Luft und der Brennstoff bei Eintritt in die Feuerung. Diese Differenz des Wärmehaltes der Heizgase stellt den bedeutendsten Verlust dar. Wenn auch anzustreben ist ihn möglichst klein zu halten, so sind hierfür noch Grenzen gesetzt. Einmal muss der notwendige Kaminzug gesichert sein, zum anderen muss durch genügend hohe Abgastemperatur der Tauwasserbildung und der Korrosion im Kessel und Schornstein vorgebeugt werden.

Bei bekannter Abgasmenge und Abgaszusammensetzung ergibt sich der Abgasverlust aus folgender Gleichung:

$$Q_A = \frac{V_{A,f} \cdot c_{pm} (T_A - T_L)}{H_u} \cdot 100 \text{ in } \%$$

$V_{A,f}$ Feuchte Abgasmenge [m^3/kg Brennstoff]

c_{pm} Spezifische Wärmekapazität des Abgases [$\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$]

T_A Abgastemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

T_L Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

H_u Heizwert des Brennstoffes

Für überschlägige Rechnungen genügt die ältere, aber viel benutzte Formel von Sievert mit dem Faktor (σ). Es gilt:

$$Q_A = s \cdot \frac{T_A - T_L}{CO_2} \text{ in } \%$$

Ein Anstieg der Abgastemperatur und damit eine Erhöhung des Verlustes Q_A tritt allerdings auch ein, wenn durch Verschmutzung der Kesselheizfläche der Wärmeübergang behindert wird. Um einen wirtschaftlichen Betrieb zu sichern, empfiehlt sich daher ein regelmäßiges Überwachen der Abgastemperatur um danach die Notwendigkeit einer Kesselreinigung zu überprüfen.

Verluste durch unverbrannte Gase

Von den im Abgas etwa noch vorhandenen unverbrannten Gasen spielt praktisch nur der Kohlenoxidgehalt eine Rolle. Der anteilmäßige Verlust lässt sich berechnen durch

$$Q_U = V_{A,tr} \cdot CO_{gem} \cdot \frac{12630}{H_u}$$

$V_{A,tr}$ trockenes Abgasvolumen [m^3/kg]

CO_{gem} der gemessene Kohlenmonoxidgehalt der Gase in Raumanteilen

12630 Heizwert von CO [kJ/Nm^3]

Sind außer Kohlenmonoxid noch andere unverbrannte Gase vorhanden (z.B. Kohlenwasserstoffe), so vergrößert sich der Verlust.

Verluste durch brennbare Rückstände

Im Rostdurchfall ist je nach Beschaffenheit des Brennstoffes und der Betriebsweise der Feuerung eine mehr oder weniger große Menge an Unverbranntem enthalten.

Verluste durch Strahlung

Dieser Verlust ist abhängig von der Bauart und den Betriebsverhältnissen. Bei modernen Anlagen liegt er unter 0,5 % der Nenn-Wärmeleistung.

Schadstoffe im Abgas (Emissionen)

Wie schon erwähnt, findet bei Verbrennungsvorgängen eine große Anzahl komplexer physikalischer und chemischer Vorgänge statt. Voraussetzung für eine vollständige Verbrennung sind folgende Bedingungen in der Ausbrandzone einer Holzfeuerungsanlage:

- ausreichend hohe Temperatur (mindestens 800 °C)
- ausreichende Verweilzeit (mindestens 2 Sekunden bei 800 °C)
- gute Durchmischung von Brenngas und Luftsauerstoff
- genügend Luftsauerstoff durch Primär- und Sekundärluftzufuhr

Im englischen Sprachgebrauch werden die Vorbedingungen für einen guten Ausbrand durch die 3-T-Regel verdeutlicht:

Temperature, Time and Turbulence

Die Bildung von Schadstoffen bei Verbrennungsprozessen ist unvermeidlich und lässt sich in der Praxis nur durch Optimierung der Verbrennung (Primärmaßnahmen) oder durch Abgasreinigung (Sekundärmaßnahmen) vermindern.

Die Emissionen von Holzfeuerungen werden in folgenden Kategorien eingeteilt:

- **Emissionen bei vollständiger Verbrennung:**

Kohlenstoffdioxid, Wasser, Aschepartikel, Schwefeloxide, Stickstoffoxide (Halogenwasserstoffe, Schwermetalle)

- **Emissionen bei unvollständiger Verbrennung:**

Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe (organisch Gesamt-C), Teer, Ruß, unverbrannte Partikel, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

- **Emissionen durch Nebenreaktionen:**

Stickstoffoxide, Dioxine

Kohlenmonoxid CO

Zwischenprodukte des Entgasungs- und Verbrennungsvorganges sind vor allem Kohlenmonoxid und organische Verbindungen. Sie lassen sich stets in unterschiedlichen Konzentrationen nachweisen.

Die Oxidation des Kohlenmonoxids erfordert eine sogenannte Anspringtemperatur von 500 °C und für einen vollständigen Abbrand eine gewisse Verweilzeit von mindestens 1 sec bei einer Temperatur zwischen 500 und 700 °C. Bei zu geringer Verweilzeit in der Flamme und zu geringer Temperatur oder auch bei Luftmangel kann ein Teil des Kohlenmonoxids in das Abgas gelangen.

Kohlenmonoxid ist stark toxisch, farb- und geruchlos und gilt deshalb als besonders gefährlich.

Organische Kohlenwasserstoffe

Unter dem Sammelbegriff organisch Gesamt-C verbirgt sich eine Vielzahl von organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen, die, wie das Kohlenmonoxid, eine Folge der nicht vollständigen Oxidation sind.

Bei Luftmangel kann eine thermische Zersetzung einsetzen, die zur Bildung neuer, ursprünglich nicht im Brennstoff enthaltenen Kohlenwasserstoffe führt. Auf diese Weise stellt man sich die Bildung von polyzyklischen aromatischen Verbindungen (PAK) vor, von denen einige als krebserregend bekannt sind.

Staubförmige Emissionen

Hiezu zählen alle Substanzen, die eine Feuerstätte als Feststoffpartikel im Abgas verlassen.

Schwefeloxide

Schwefeloxide (SO₂ und SO₃) zählen zu den Verbindungen, die ein normales Produkt der Verbrennung sind, wenn der Brennstoff Schwefel enthält.

Der mit dem Brennstoff zugeführte Schwefel ist nach seiner Verbrennung in den Verbindungen SO₂, SO₃ und H₂SO₄ ebenso für die Umweltschäden verantwortlich, wie auch die Stickstoffoxide (Stichwort: saurer Regen, Bauwerkschäden usw.).

Das bei der Verbrennung zunächst entstehende SO₂ ist ein farbloses, stechend riechendes und hoch toxisches Gas, das seine Giftwirkung auf alle Lebewesen gleichsam ausübt.

Holz enthält nur geringe Mengen an Schwefel (hauptsächlich durch Umwelteinflüsse z.B. saurer Regen in der Rinde). Auch liegt ein Teil des Schwefels als Sulfat vor, so dass SO₂ nicht von Bedeutung ist.

Stickstoffoxide

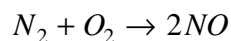
Stickstoffoxide lassen sich durch Optimierung des Ausbrandes vermindern aber nicht grundsätzlich vermeiden. Stickstoffoxide (NO_x) sind der Oberbegriff für die beiden Oxide des Stickstoffs - Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂). Auch Distickstoffoxid N₂O (Lachgas) gehört dazu. Bei Konzentrationsangaben wird unabhängig von der Zusammensetzung des Abgases NO_x als NO₂ berechnet. Die Stickstoffoxide werden auf dreierlei Weise gebildet:

- Thermisches NO_x
- Chemisches NO_x
- Prompt- NO_x

Thermisches NO_x

Bei Temperaturen oberhalb 1300 °C reagieren Luftstickstoff und Luftsauerstoff miteinander unter Bildung von NO.

Formell kann diese Reaktion durch folgende Gleichung dargestellt werden:



Die Bildungsreaktion nimmt mit steigender Temperatur stark zu. Da die kritische Temperatur von 1300 °C bei Holzfeuerungen nicht erreicht wird, spielt diese Art von NO_x hier keine praktische Rolle.

Prompt- NO_x

Bei diesem Bildungsweg entsteht Stickstoffoxid über Zwischenverbindungen, die aus kohlenstoffhaltigen Radikale und Luftsauerstoff in heißen Bereichen der Flamme gebildet werden und weiter oxidieren. Auch diese Art der Bildung hat für Holzfeuerungen keine nennenswerte Bedeutung.

Chemisches NO_x

Holz enthält geringe Mengen an organisch gebundenem Stickstoff (0,2 bis 0,5 Masse- %). Bei der Verbrennung wird der gebundene Stickstoff zunächst als gasförmiges Ammoniak oder Cyanwasserstoff freigesetzt. Im weiteren Verlauf der Verbrennung werden diese Verbindungen teilweise zu Stickstoffoxiden oxidiert. Die Bildung von chemischem NO_x nimmt auch mit steigender Temperatur zu.

Technische Umsetzung – Feuerungstechnik

Warmwasserzentralheizungsanlagen bestehen aus einem Heizkessel mit Brenner, einem Warmwasserverteilungssystem mit Pumpen und Heizkörpern in den Räumen, einer Warmwasserbereitungsanlage, einer Regelungseinheit und der Abgasabfuhr-einrichtung. Die Heizkessel werden dabei mit verschiedenen Brennstoffen und unterschiedlicher Beschickung betrieben.

Handbeschickte Kessel

Stückholzkessel werden händisch mit Holzstücken (abgelängt und gespalten) oder grobem Energiehackgut beschickt. Bei modernen Kesseln mit unterem Abbrand wird die Verbrennungsluft über Gebläse (Saugzug- oder Druckgebläse) als Primär- und Sekundärluft getrennt zugeführt.

Traditionelle Bauweise

Durchbrandkessel haben große, gekühlte Brennräume. Die Flamme brennt durch die gesamte Brennstofffüllung. Die Verbrennung ist schwer zu kontrollieren, Systembedingt ist mit kurzen Nachlegeintervallen zu rechnen und die Verluste im Abgas sind hoch. Aufgrund bestehender Anforderungen sind diese Kessel für Holz nicht mehr zu empfehlen .

Kessel mit unterem Abbrand wurden auf das Brennverhalten von Holz abgestimmt. Die Verbrennung erfolgt im unteren Teil des Füllraums. Auf Grund des höheren heizgasseitigen Widerstandes und der meist geringen Abgastemperaturen ist in der Praxis vor allem beim Anfeuern und im gedrosselten Betrieb mit Problemen zu rechnen.

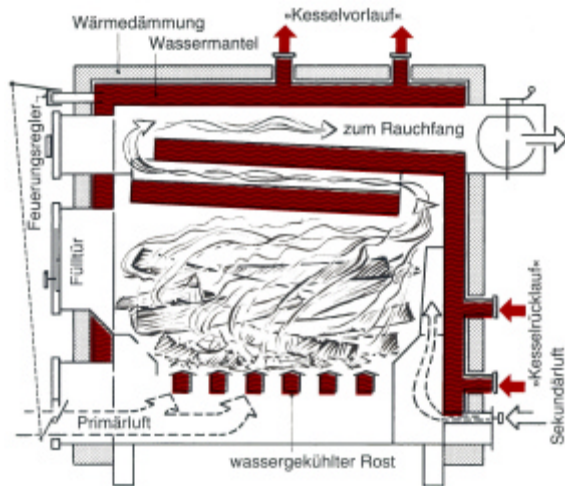


Bild 14: Durchbrandkessel

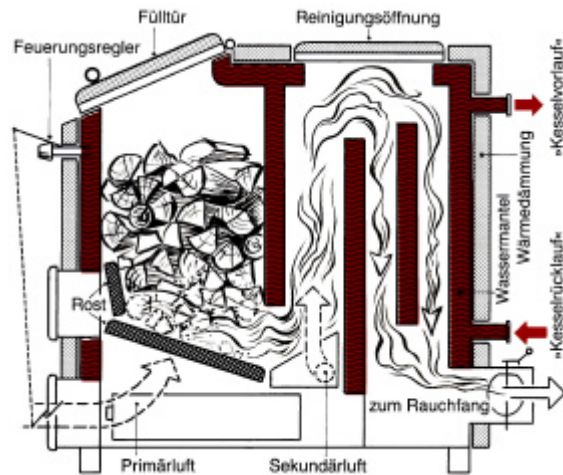


Bild 15: Stückholzkessel mit unterem Abbrand

Neue Kesselgeneration

Gebälsekessel: Stückholz wird im Füllraum auf das Glutbett, wo die Primärverbrennung stattfindet, aufgebracht. Durch den von einem Ventilator erzeugten Überdruck im Füllraum werden die Holzgase durch eine Öffnung (Brenner), in den darunter gelegenen heißen Brennraum gedrückt, in welchem die Gase unter Zufuhr von Sekundärluft bei hohen Temperaturen ausbrennen können.

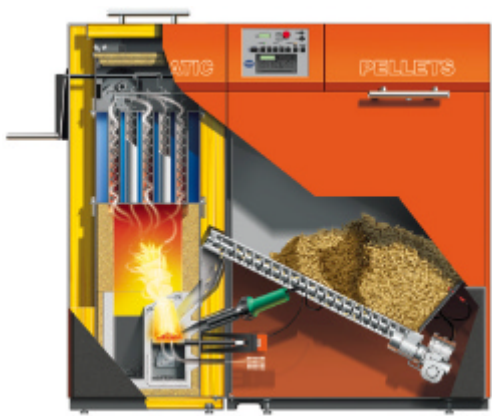
Saugzugkessel: Im unteren Teil des Füllraumes wird durch Zufuhr von Primärluft Wärme freigesetzt und brennbares Gas erzeugt. Das Gas wird durch das Saugzuggebläse - am Übergang vom Wärmetauscher zum Kamin - nach unten, oder seitlich neben dem Füllraum, in den Brennraum gesaugt, verwirbelt und brennt ohne Wärmeabgabe unter Zufuhr von Sekundärluft aus.



Automatisch beschickte Feuerungen

Hackgutfeuerungen kleiner Leistung für die Beheizung des Wohnraumes werden überwiegend mit Holzhackgut bis zu einer Körnung von 30 mm automatisch beschickt. Meist werden die Systeme mit in den Wärmetauscher integrierten Brennräumen oder Voröfen verwendet.

Pelletsfeuerungen sind als Heizkessel, ähnlich Holzhackgutfeuerungen, oder als Kaminöfen zur Wohnraumbeheizung aufgebaut. Diese Feuerungen werden automatisch aus einem Vorrats- oder Zwischenbehälter beschickt. Der sehr rieselfähige Brennstoff mit konstantem Wassergehalt ermöglicht einen einfacheren Aufbau der Fördereinrichtung und einfachere Regelungen.



Regelung der Feuerungen

Grundsätzlich wird die Leistungsabgabe der im Handel befindlichen händisch oder automatisch beschickten Holzfeuerungen durch die Kesselsolltemperatur geregelt. Eine Begrenzung der höchsten und tiefsten Abgastemperatur ermöglicht ebenfalls die Leistungsregelung. Unterstützend wird auch eine Unterdruckmessung und -kontrolle im Brennraum eingesetzt. Diese Regelparameter drosseln vor allem die Primärluftzufuhr durch Öffnen oder Schließen von Stellschiebern und/oder durch Drehzahlregelung der Verbrennungsluftgebläse.

Bei **einfachen Regelungen** wird die Sekundärluftzufuhr durch festgelegte Stellgrößen entsprechend dosiert. Mit einer **Lambdasondenregelung** kann die Sekundärluftmenge weiter optimiert werden.

Als weitere Regelgrößen zur Leistungsanpassung bzw. Verbrennungsoptimierung werden eine **Brennraumtemperaturregelung** oder **Luftmengenmessungen** von Primärluft und Sekundärluft verwendet.

Händisch beschickte Feuerungen können nur über die Zufuhr der Verbrennungsluftmenge geregelt werden. Bei automatisch beschickten Feuerungen kann zusätzlich die Brennstoffmenge kontrolliert zugeführt werden. Mit Hilfe von Füllstandskontrollen wird mechanisch oder optisch die optimale Füllmenge im Brennraum garantiert.

Durch die Anpassung der mit dem Brennstoff zugeführten Energie an den Wärmebedarf kann bei automatisch beschickten Feuerungen das Teillastverhalten wesentlich verbessert werden. Eine entsprechende Steuerung mit zusätzlichen Sensoren (wie u.a. O₂-Sonde oder CO-Sonde) regelt die Brennstoff- und Luftmengen-zufuhr und optimiert damit die Verbrennung.

Literaturhinweise

- [1] E. Padouvas, Vortrags - Skriptum, Biowärme Installateur Seminar 1999, Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik, Getreidemarkt 9/159, A-1060 Wien
- [2] R. Marutzky, K. Seeger; Energie aus Holz und anderer Biomasse, DRW-Verlag 1999
- [3] J. Schwarzott, Diplomarbeit TU Wien, Inst. Für Verfahrenstechnik, 1993
- [4] H. P. Ebert; Heizen mit Holz, Ökobuch, 6. Auflage, 1998
- [5] Herausgeber: Buderus Heiztechnik GmbH; Handbuch der Heizungstechnik Beuth Verlag, 1994

Quelle: Ing. Lasselsberger BLT Wieselburg – Österreichischer Biomasseverband