

6. Theorie der Holzverbrennung

Eine effiziente und vollständige Verbrennung ist unabdingbar, um Holz als umweltverträglichen Brennstoff nutzen zu können. Außer einer hohen Energieausnutzung muss der Verbrennungsvorgang die Destruktion des Holzes gewährleisten und verhindern, dass umweltbelastende Verbindungen entstehen.

Um eine Verbrennung aufrecht zu erhalten, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein (48).

- Es muss eine starke Vermischung von Brennstoff und Sauerstoff (Luft) in einem bestimmten Verhältnis gewährleistet sein.
- Die Wärme des angezündeten Brennstoffs muss auf den neuen Brennstoff ausstrahlen, damit der Verbrennungsprozess ablaufen kann.

Es ist wichtig zu verstehen, dass Gase wie Flammen brennen, feste Partikel glühen und dass bei der Verbrennung von Holz ca. 80% der Energie als Gas und der Rest aus dem Koksrückstand freigesetzt wird.

Bei der Vermischung von Brennstoff und Luft muss ein guter Kontakt zwischen dem Sauerstoff der Luft und den brennbaren Bestandteilen des Holzes erreicht werden. Je besser der Kontakt, umso schneller und besser die Verbrennung. Bei gasförmigen Brennstoffen, z.B. Erdgas, ist die Vermischung optimal, denn es gibt zwei luftförmige Stoffe, die im gewünschten Verhältnis gemischt werden können. Die Verbrennung kann schnell erfolgen, damit ist auch die Regulierung schnell, da mehr oder weniger Brennstoff zugeführt werden kann. Um mit Holz eine in etwa gleiche Situation zu erreichen, muss das Holz sehr fein zermahlen werden (wie Mehl). Diese feinen Holzpartikel folgen den Bewegungen der Luft. Hierdurch kann eine gute Vermischung erreicht werden mit einer Verbrennung, die einer Gas- oder Ölf Flamme ähnelt. Die Herstellung von Holzpulver ist allerdings so teuer, dass Holzpulver in Dänemark nur in begrenztem Umfang verwendet wird. Normalerweise wird Holz in Größen von Hackschnitzel bis Scheitholz als Brennstoff genutzt.

Die Verbrennungstechnologie für Holz und andere feste Brennstoffe ist daher schwieriger und komplizierter als bei erdgas- oder ölbefeuerten Anlagen.

Phasen der Verbrennung

Um verbrennen zu können, muss der Brennstoff drei Phasen durchlaufen - siehe auch Schaubild 13.

- Trocknung
- Entgasung und Verbrennung
- Ausbrennen des Kokes

Wenn das Holz erwärmt wird, beginnt das Wasser von der Oberfläche zu verdampfen. Danach geschieht zweierlei: teils beginnt die Holzoberfläche zu entgasen - zu pyrolysieren (die Erhitzung eines Brennstoffs ohne Zusatz eines Vergasungsmittels, z.B. Sauerstoff und Wasser, wird als Pyrolyse bezeichnet) - , teils steigt die Temperatur im Inneren des Holzes, so dass auch das Wasser aus den tiefer liegenden Holzschichten verdampft. Das Wasser verdampft nach und nach, und der Bereich, der pyrolysiert wird, breitet sich aus.

Das freigesetzte Gas entzündet sich über dem Brennstoff, die Wärme strahlt zurück und sorgt für eine fortgesetzte Verdampfung und Pyrolyse. Der Verbren-

nungsvorgang läuft jetzt von selbst ab. Das entgaste Holz wird zu glühendem Koks (Holzkohle), der mit Sauerstoff umgesetzt wird, bis nur noch Asche übrig ist.

Brennstoffgröße

Je größer die Brennstoffpartikel sind, desto länger dauert die Verbrennung. Eine Hand voll Sägespäne, die in ein Feuer geworfen wird, brennt schnell. Hier besteht guter Kontakt zwischen Brennstoff und Luft, da die kleinen Partikel schnell trocknen, vergasen und brennen und somit eine hohe Verbrennungsintensität erzielt wird.

Legt man stattdessen ein Holzscheit ins Feuer, dauert es erheblich länger, bis es ausgebrannt ist. Man kann dies mit einem Braten vergleichen, der in die Bratröhre geschoben wird: selbst nach einer Stunde ist er in der Mitte noch nicht durchgebraten. Die Brennstoffgröße ist also von großer Bedeutung für die Verbrennungsgeschwindigkeit.

Feuchtegehalt

Der Feuchtegehalt des Brennstoffs reduziert den durch den Heizwert, $H_{n,v}$ (siehe Kapitel 4) ausgedrückten Energiegehalt, da ein Teil der Energie für

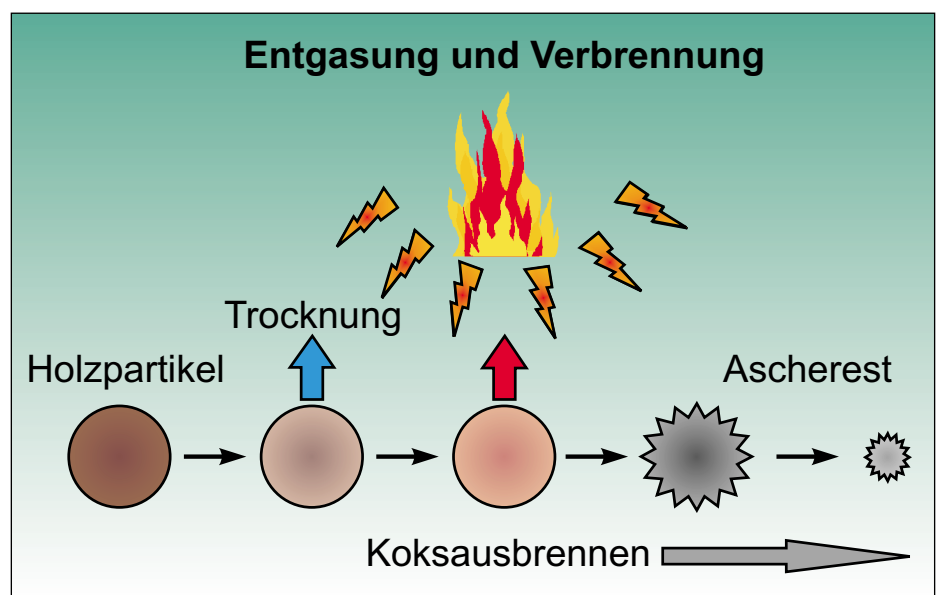


Schaubild 13. Verbrennung eines Holzpartikels. Der frische Holzpartikel wird getrocknet und entgast, dabei bilden sich Flammen. Der Partikel brennt aus und endet als Ascherest (49).

die Verdampfung des Wassers aufgewendet werden muss. Trockenholz hat einen hohen Heizwert, und die bei der Verbrennung entstehende Wärme muss aus dem Feuerraum abgeleitet werden, damit es nicht zu Überhitzung und daraus resultierenden Materialschäden kommt. Nasses Holz hat einen geringen Heizwert pro kg Gesamtgewicht, und damit die Wärme nicht entweicht und der Verbrennungsvorgang ablaufen kann, muss die Verbrennung isoliert werden. Dazu wird die Feuerstelle typischerweise mit feuerfesten und wärmedämmenden Steinen ausgemauert. Der Feuerraum ist daher normalerweise so ausgelegt, dass Holz in einem bestimmten Feuchteintervall verbrannt werden kann.

Bei einem Feuchtegehalt des Holzes von über 55-60% des Gesamtgewichts kann ein Verbrennungsvorgang nur sehr schwer aufrecht erhalten werden.

Aschegehalt

Der Brennstoff enthält verschiedene Unreinheiten in Form unbrennbarer Bestandteile - Asche. Asche an sich ist unerwünscht, denn sie erfordert, dass die Partikel aus den Rauchgasen abgefiltert werden müssen und Asche und Schlacke anschließend entsorgt werden. Die Asche im Holz stammt in erster Linie von Erde und Sand in der Rinde. Ein kleinerer Teil stammt von Salzen, die der Baum während seines Wachstums aufgenommen hat.

Die Asche enthält außerdem Schwermetalle, die eine Umweltbelastung darstellen. Allerdings ist der Schwermetallgehalt generell niedriger als bei anderen festen Brennstoffen.

	% der TS
Kalium (K)	0,1
Natrium (Na)	0,015
Phosphor (P)	0,02
Kalzium (Ca)	0,2
Magnesium (Mg)	0,04

Tabelle 11: Typische mineralische Fraktionen in Holzhackschnitzel, angegeben in % der Holztrockensubstanz (TS). Verglichen mit Stroh liegt der Kaliumgehalt von Hackschnitzel ca. 10% niedriger (50, 51).

		Holzhackschnitzel	Stroh (Weizen)	Variation nach Baumart (Bspl.)		
				Buche	Kiefer	Fichte
Kohlenstoff	C % der TS	50	47,4	49,3	51	50,9
Hydrogen	H % der TS	6,2	6	5,8	6,1	5,8
Sauerstoff	O % der TS	43	40	43,9	42,3	41,3
Stickstoff	N % der TS	0,3	0,6	0,22	0,1	0,39
Schwefel	S % der TS	0,05	0,12	0,04	0,02	0,06
Chlor	Cl % der TS	0,02	0,4	0,01	0,01	0,03
Asche	a % der TS	1	4,8	0,7	0,5	1,5
Flüchtige Bestandteile	% der TS	81	81	83,8	81,8	80
Heizwert	MJ/kg TS	19,4	17,9	18,7	19,4	19,7
Typischer Feuchtegehalt	%	35-45	10-15			
Heizwert	MJ/kg	9,7-11,7	14,8-15,8			

Tabelle 10: Brennstoffdaten für Holzhackschnitzel und die Vergleichsdaten für Stroh. Zu beachten ist, dass die Bestandteile der Trockensubstanz (TS) variieren, teils nach der Baumart, teils nach den Wachstumsbedingungen. Hier ist als Beispiel die Abweichung zwischen Buche, Kiefer und Fichte dargestellt. Bei Holzhackschnitzel enthält die Rinde ca. 6% Asche, das Stammholz nur ca. 0,25% Asche (50,51).

Ein Charakteristikum von Asche sind die wärmedämmenden Eigenschaften. Bei Kaminöfen bildet die Ascheschicht am Boden eine heiße Fläche, die das Ausbrennen der Holzkohle fördert. Bei rostbefeuerten Anlagen trägt der Aschegehalt dazu bei, den Rost gegen die Wärmestrahlung der Flammen zu schützen.

Das Holz enthält Salze, die wichtig für den Verbrennungsprozess sind. Es handelt sich primär um Kalium (K) und teils Natrium (Na). K und Na ergeben eine klebrige Asche, die zu Belägen im Kessel führen kann. Der Na- und K-Gehalt in Holz liegt normalerweise so niedrig, dass bei den herkömmlichen Verbrennungstechnologien keine Probleme auftreten.

Flüchtige Bestandteile

Holz und andere Biomasse enthält ca. 80% flüchtige Stoffe (in % TS). Das heißt, dass die Holzbestandteile bei Erwärmung 80% ihres Gewichts als Gase freisetzen, der Rest ist Holzkohle. Dies ist u.a. der Grund dafür, dass ein Sack Holzkohle viel leichter ist, als sein Volumen vermuten lässt. Die Holzkohle hat im Wesentlichen das ursprüngliche Volumen des frischen Holzes behalten, aber 80% des Gewichtes verloren.

Der hohe Gehalt an flüchtigen Bestandteilen bedeutet, dass die Verbrennungsluft grundsätzlich über der Brennstoffschicht (Sekundärluft) zugeführt werden muss, wo das Gas verbrennt, und

nicht unter der Brennstoffschicht (Primärluft).

Luftüberschuss

Um stöchiometrisch umgesetzt zu werden, erfordert ein bestimmter Brennstoff eine bestimmte Menge Luft (Sauerstoff), entsprechend einer Luftüberschusszahl (Lambda) von 1. Der Brennstoff wird stöchiometrisch umgesetzt, wenn genau die Sauerstoffmenge vorhanden ist, die für das Umsetzen des Brennstoffes unter idealen Bedingungen erforderlich ist. Wird mehr Sauerstoff zugeführt, als gleich 1 entspricht, enthalten die Rauchgase Sauerstoff. Bei gleich 2 beispielsweise wird doppelt so viel Luft wie zur Verbrennung des Brennstoffes erforderlich zugeführt.

	Luftüberschuss λ	O ₂ , trocken (%)
Offener Kamin	>3	>14
Kaminofen	2,1-2,3	11-12
Fernwärme Waldhackschn.	1,4-1,6	6-8
Fernwärme Holzpellets	1,2-1,3	4-5
Kraftwärme Holzpulver	1,1-1,2	2-3

Tabelle 12: Typische Luftüberschusszahlen, λ , und der daraus resultierende Sauerstoffgehalt in den Rauchgasen (23).

Normalerweise erfolgt die Verbrennung immer mit einer Luftüberschusszahl > 1 , da eine stöchiometrische Luftmenge keine befriedigende Verbrennung ergibt. Tabelle 12 zeigt die typischen Luftüberschusszahlen und den daraus resultierenden Sauerstoffgehalt (in %) in den Rauchgasen.

Wie Tabelle 12 zeigt, hängt die Luftüberschusszahl in hohem Maße von der Verbrennungstechnologie und in einem gewissen Maße vom Brennstoff ab.

Umwelt

Der Brennstoff beeinflusst die Verbrennungsqualität. Bei vollständiger Verbrennung bilden sich Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Eine verkehrte Kombination von Brennstoff, Anlagentyp und Luftzufuhr kann zu einer schlechten Brennstoffnutzung und einer daraus folgenden Umweltbelastung führen.

Eine wirkungsvolle Verbrennung erfordert:

- ausreichend hohe Temperatur
- ausreichenden Sauerstoffüberschuss
- ausreichende Verweildauer
- ausreichende Vermischung

Prozent in trockenem Rauchgas

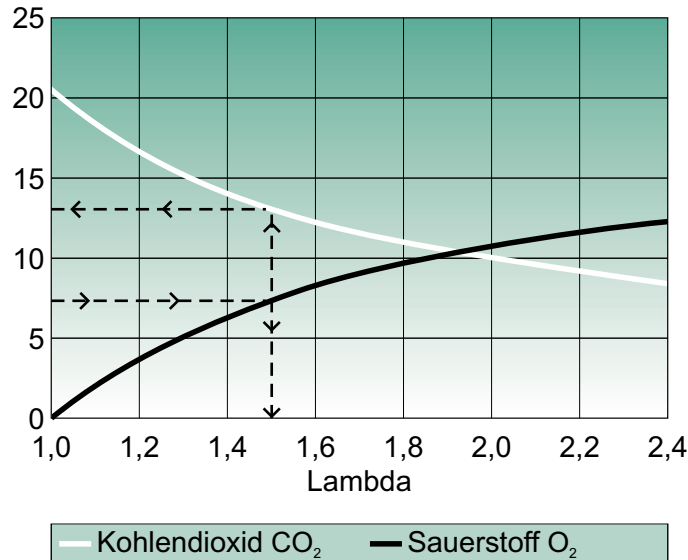


Schaubild 14: Holz verbrennt am besten bei einer Luftüberschusszahl zwischen 1,4 und 1,6. Als Beispiel werden 7,5% Sauerstoff im Rauchgas gemessen. Die Kurve zeigt einen Kohlendioxidgehalt von ca. 13% und einen Luftüberschuss von 1,5.

Dies gewährleistet eine geringe Emission von Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen und polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sowie einen geringen Gehalt an unverbranntem Kohlenstoff in der Schlacke. Leider sind diese Bedingungen (hohe Temperatur, hoher Luftüberschuss, lange Verweildauer) auch eine wesentliche Ursache für die

Bildung von NO_x . Die eingesetzte Technologie muss daher Verfahren umfassen, die zu einer geringeren NO_x -Emission führen.

Die Rauchgase enthalten außer CO_2 und H_2O Luft (O_2 , N_2 und Ar) sowie größere oder kleinere Mengen unerwünschter Reaktionsprodukte wie CO , Kohlenwasserstoffe, PAK, NO_x u.a.