

TTZ Lampoldshausen
Seminar
24. Mai 2012
74329 Hardthausen-Lampoldshausen

Zoltán Faragó

Verbrennungsvorgänge in Kaminöfen

**Wirtschaftsförderung Raum Heilbronn GmbH,
Technologie-Transfer-Zentrum Lampoldshausen,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**



Grundlagen	Seiten 1 – 6
Vorwort; Wärmebedarf – Heizleistung; Verbrennungsgrundlagen – Definitionen	
Chemie der Holzverbrennung	Seiten 7 – 15
Homogene und heterogene Reaktion; Globalreaktion und Teilreaktion; Ablauf der Holzverbrennung; Diffusionsflamme und Vormischflamme; Dissoziation und Wärmetönung	
Flammenleuchten – Rußbildung	Seiten 16 – 22
Lichtstrahlung der Rußpartikel; Lichtstrahlung angeregter Radikale	
Lesen aus der Flamme	Seiten 23 – 30
Interpretation von Flammenbildern; Flammenbetrachtung durch Spektralbrille	
Formel und Kennzahlen	Seiten 31 – 43
Berechnung der Luftzahl; Berechnung des Abgas-Luft-Verhältnisses; Wirkungsgradbestimmung; Emissionsgrenzwerte	
Optimales Feuern	Seiten 44 – 53
<i>Time, Temperature, Turbulence</i> ; Badewannendiagramme; Verbrennungsabläufe	

Vorwort

In der Regel betreibt der Nutzer einen Kaminofen nach der Betriebsanweisung des Herstellers. Ob bei der Feuerung das Drosseln der Luftzufuhr den Wirkungsgrad verbessert oder verschlechtert, den Schadstoffausstoß reduziert oder fördert, hängt unter anderem vom momentanen Schornsteinzug ab. Der Schornsteinzug wiederum ist wind- und wetterabhängig. Die Betriebsanweisung hilft in vielen Fällen nicht weiter. Aus diesem Grund werden handbeschickte Stückholzfeuerungsanlagen oft nicht unter ihren optimalen Betriebsparametern betrieben und verursachen eine hohe Emission von Kohlenmonoxid und Ruß. Form und Farbe der Flamme helfen zwar den optimalen Betriebspunkt anzunähern, aber nur wenige Menschen können aus der Flamme lesen, d.h. die Flammenbilder richtig deuten.

Der Referent des halbtägigen Seminars hat vor seinem Studium als Porzellanbrenner gearbeitet. Bei dieser Tätigkeit hat er gelernt, die Flammenbilder zu deuten. Nach dem Studium der Chemie und Verfahrenstechnik war er in der Forschung und Entwicklung in Ungarn, Deutschland und den USA tätig. Er war Entwicklungsingenieur in der Öl- und Gasindustrie sowie in der Heizgeräte-Industrie. Im Kernforschungszentrum Karlsruhe und beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Er hat an der Entwicklung des DLR-Raketebrenners maßgeblich teilgenommen: unter anderem entwickelte er einen regelbaren Brenner für den Leistungsbereich 6 bis 23 kW. Als pensionierter Wissenschaftler gibt er sein Wissen über Verbrennungen im DLR_School_Lab Lampoldshausen weiter. In seiner unbezahlten Arbeit wird er durch einen Messgeräte-Hersteller aus Iserlohn (rbr-Messtechnik) und einen Ofenbaumeister aus dem Odenwald (Ofenbau-Ries, Buchen) unterstützt. Seine Vision ist, Wissenschaftler, Schornsteinfeger, Ofenbauer und Benützer von Kaminöfen an einen Tisch zu bringen und durch richtige Deutung des Flammenbildes beim Schüren des Kaminfeuers die Schadstoffemission zu senken und den Wirkungsgrad anzuhähen.

Wärmebedarf, Heizleistung:

Die erforderliche Heizleistung ist bei durchgehender Beheizung im Wesentlichen abhängig von der jeweiligen Außentemperatur. Die Heizungsanlage wird nach dem Bedarf der kältesten Tage dimensioniert. Dazu kommen evtl. Zuschläge für die Warmwasserbereitung und für unterbrochenen Heizbetrieb.

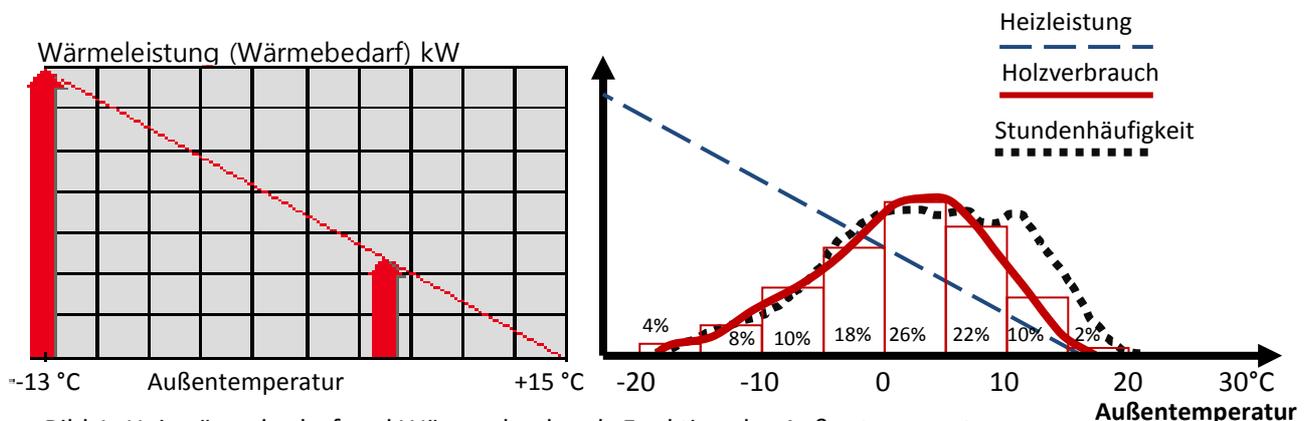


Bild 1: Heizwärmebedarf und Wärmeabgabe als Funktion der Außentemperatur

Die Nennleistung eines Ofens ist die Wärmeabgabe, die der Ofen bei idealem Betrieb abgibt. Sie liegt bei den meisten Kaminöfen zwischen 4 und 10 kW. Bei einigen Öfen sind eine Minimalleistung und

eine Maximalleistung angegeben, z.B. 3 – 7 kW. Die maximale Heizlast (maximaler Wärmebedarf) eines beheizten Raumes ist die Heizwärme, die bei der größten anzunehmenden Kälte zur Heizung benötigt wird. Die größte anzunehmende Kälte ist die sogenannte Auslegungs-Außentemperatur; das ist der niedrigste 2-Tagestemperatur-Mittelwert, der an dem jeweiligen Standort in den vergangenen zwanzig Jahren zehnmal gemessen wurde. Die Auslegungstemperatur liegt in Deutschland je nach Standort zwischen -10 und -16 °C. Die maximale Heizlast eines gut isolierten Einfamilienhauses beträgt in Deutschland 6 – 8 kW.

Der Ofen ist in der Regel in einem Raum aufgestellt, dessen maximale Heizlast höchstens 1,5 kW beträgt. Bei einer Außentemperatur von 0 °C sinkt der Wärmebedarf auf weniger als 1 kW. Bei einer Außentemperatur von 15 °C beträgt die Heizlast des Raumes nur noch annähernd 10 % der Nennleistung. Der Wärmebedarf des Aufstellraumes und die Leistung des Ofens sind in den meisten Fällen nicht aufeinander abgestimmt, der Ofen ist in der Regel überdimensioniert.

Bild 1 zeigt den Wärmebedarf und den Brennstoffverbrauch als Funktion der Außentemperatur. Die Balken in der rechten Bildhälfte präsentieren den Brennstoffverbrauch als Funktion der Temperatur: der höchste Verbrauch im Jahr tritt im Außentemperaturbereich zwischen 0 und +5 °C (26 %), der zweithöchste im Bereich +5 bis +10 °C auf (22%). Die relative Auslastung des Ofens beträgt im Temperaturbereich +5 bis +10 °C lediglich ca. 25 %. Demzufolge sollte ein Ofen bei 25-30-prozentiger Auslastung den höchsten Wirkungsgrad und die niedrigste Schadstoffbildung aufweisen!

Das Problem kann mit einem Wärmespeicherofen gelöst werden. Ein Wärmespeicherofen wird eine kurze Zeit mit der Nennleistung befeuert, gibt die Wärme aber über einen längeren Zeitraum ab. Die Wärmeabgabe des Ofens kann so mit dem Wärmebedarf des Raumes in Einklang gebracht werden. Öfen mit 300 – 500 kg Gesamtgewicht werden aus verkaufsstrategischen Gründen bereits als Wärmespeicheröfen bezeichnet. Bei einem so kleinen Gesamtgewicht beträgt die Speicherkapazität des Ofens lediglich 2 – 3 Stunden. Soll die Wärmeabgabe des Ofens auf 5 Stunden nach Ende der Feuerung ausgedehnt werden, wird ein Gesamtgewicht von über 700 kg benötigt. Ein Speicherofen mit 1200 kg Gewicht kann einen kleinen Aufstellraum mit einer einzigen Feuerung einen ganzen Tag lang beheizen. In einem Raum von etwa 40 m² Grundfläche wird ein Ofengewicht von wenigstens 1500 kg benötigt, um den Wärmebedarf für einen ganzen Tag mit einer Feuerung abzudecken.

Wärmeleistung des Ofens

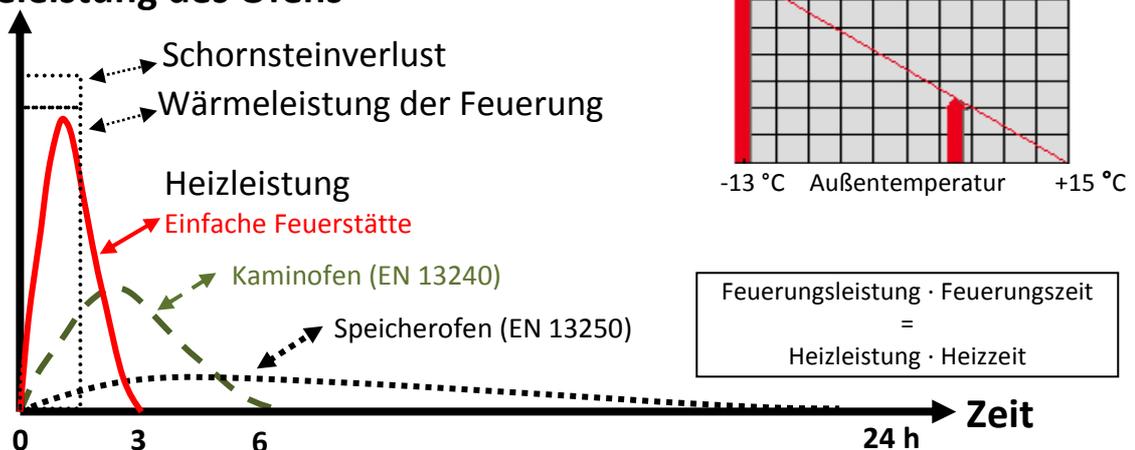


Bild 2: Entkoppelung der Feuerungsleistung von der Heizleistung bei Speicheröfen

In Bild 2 zeigt die Y-Achse die Leistung, die X-Achse die Zeit. Die Fläche unter den Leistungskurven ist die Heizarbeit (Wärme). Dabei gilt: **Feuerungswärme – Schornsteinverlust = Heizwärme**.

Wärmebedarf und Heizleistung können durch folgende Maßnahmen aneinander angepasst werden:
 1) Anpassung der Feuerungsleistung (Nennwärmeleistung bei großem Wärmebedarf, Schwachlast bei kleinem);
 2) Häufigeres Anfeuern bei großem Wärmebedarf.

Es gilt im allgemeinen, wenn auch gelegentliche Ausnahmen möglich sind:

- Größere Nennwärmeleistung ist verbunden mit niedrigerer Schadstoffbildung.
- Bei Schwachlast bilden sich mehr Schadstoffe als bei der Nennwärmeleistung.
- Bei Durchbrandfeuerung bilden sich mehr Schadstoffe als bei oberem Abbrand.
- Bei oberem Abbrand bilden sich mehr Schadstoffe als bei unterem Abbrand.
- Bei Dauerbrand bilden sich mehr Schadstoffe als bei Zeitbrand.

Die häufigsten Ofenkonstruktionen und Betriebsarten sind:

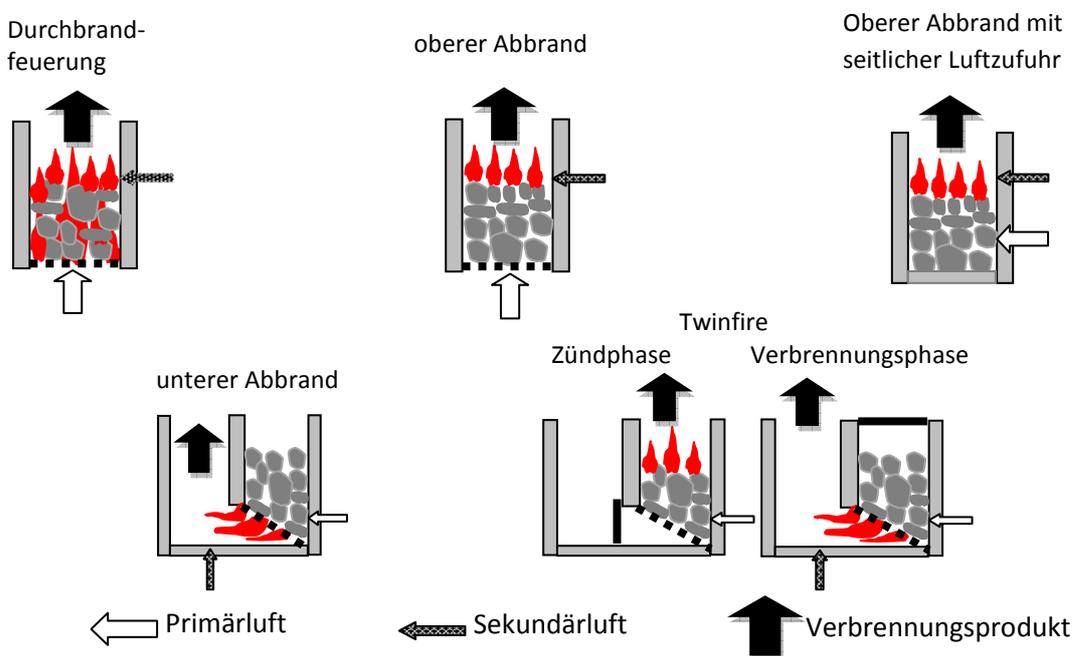


Bild 3: Die häufigsten Konstruktions- und Betriebsarten der Kaminöfen

Verbrennungsgrundlagen, Verbrennung und Schadstoffbildung

Die Holzverbrennung ist eine Oxidation des Holzes mit dem Sauerstoff der Luft. Die Verbrennungsprodukte sind Kohlendioxid, Wasserdampf und Wärme. Die zur vollständigen Verbrennung unbedingt notwendige Luftmenge bezeichnet man auch als theoretischen bzw. stöchiometrischen Luftbedarf oder Mindestluftbedarf (L_{min}) der Verbrennung. Wird weniger Luft als L_{min} der Verbrennung zugeführt, verläuft die Verbrennung nicht vollständig: Es bleiben im Abgas unverbrannte Bestandteile (Schadstoffe wie Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Ruß, usw.) erhalten und der Wirkungsgrad (Nutzwärme/Verbrennungswärme) sinkt. Um das zu vermeiden, ist die in den Feuerraum zugeführte Luftmenge (L) höher als L_{min} . Die Luftzahl (λ) ist das Verhältnis der zur Verbrennung tatsächlich zugeführten Luftmenge L zum Mindestluftbedarf ($\lambda = L / L_{min}$). Das Symbol der Luftzahl ist der griechische Buchstabe λ (Lambda). Wenn λ zu groß ist, verläuft die Verbrennung ebenfalls nicht vollständig: Zu viel überschüssige Luft kühlt die Flamme aus, so dass in der kalten Flamme die Verbrennung unvollständig ist. Auch in diesem Fall entstehen unverbrannte Abgasbestandteile, und ebenso sinkt der Wirkungsgrad.

Es gibt eine optimale Luftzahl, bei der die Verbrennung am besten verläuft und der Wirkungsgrad am höchsten ist. Bei Stückholzfeuerung in Kleinanlagen liegt sie zwischen $1,5 < \lambda < 3$. Bei einem gut konstruierten Ofen ist sie kleiner als bei einem weniger guten Herd, bei richtigem Schüren des Feuers liegt sie niedriger als bei schlechtem. Beim richtigen Schüren des Feuers kann also die Schadstoffbildung reduziert und der Wirkungsgrad erhöht werden. Wer die Zusammenhänge kennt, hat einen saubereren Ofen, einen saubereren Schornstein und spart Holz.

Der Feuerraum von Holzöfen mit Naturzug weist unten einen Rost auf, darunter befindet sich der Aschenkasten. Die seitlichen Wände und die Hinterwand sind feuerfest ausgekleidet. In der Vorderwand ist die Ofentür angebracht, welche bei Kaminöfen meist eine große Sichtscheibe enthält. Ein Teil der Verbrennungsluft, die Primärluft, wird durch den Rost dem Feuerraum zugeführt. Der andere Teil, die Sekundärluft, strömt von vorne, von der Seite oder von hinten in den Feuerraum. Beim alt hergebrachten Betrieb wird auf dem Rost ein kleines Feuer angezündet, auf das die größeren Holzstücke gelegt werden. Diese Betriebsweise heißt Durchbrandfeuerung, da die Flamme durch die gesamte Betriebsfüllung brennt. Eine modernere und schadstoffärmere Betriebsweise solcher Öfen ist der obere Abbrand: Hier werden die größten Holzstücke auf den Rost gelegt, dann die kleineren, und der Holzstapel wird von oben angezündet (siehe Bild 3). Die Flamme steigt nach oben und brennt nicht durch die Holzfüllung. Bei rostlosen Kachelöfen wird die Verbrennungsluft seitlich zugeführt.

Der Mindestluftbedarf beträgt ca. $4,62 \text{ m}^3/(\text{kg Holz})$. Die Mindestabgasmenge ($A_{tr, min}$) ist das Abgasvolumen, das entstünde, wenn die Verbrennung beim Mindestluftbedarf vollständig verlief. Sie beträgt bei Holzfeuerung ca. $4,58 \text{ m}^3/(\text{kg Holz})$. Die tatsächliche Abgasmenge ist größer, da der Luftüberschuss der Verbrennung die Abgasmenge vergrößert. Die Hauptbestandteile des Abgases sind Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf und Sauerstoff. Für die Messung wird das Abgas gekühlt, der Dampf kondensiert zu Wasser, und es entsteht das trockene Abgas. Bei der Abgasverdünnung durch den Luftüberschuss ist die im Abgas gemessene Schadstoffkonzentration niedriger als es bei unverdünntem Abgas wäre. Die im verdünnten Abgas gemessene Schadstoffkonzentration wird zur Vergleichbarkeit auf das trockene unverdünnte Abgas oder auf eine definierte O_2 -Konzentration im Abgas umgerechnet.

Der Wirkungsgrad (η) des Ofens gibt an, wie viel Prozent der Verbrennungswärme genutzt werden kann. Die nicht nutzbare Wärme verlässt den Ofen durch den Schornstein. Der Schornsteinverlust besteht teils aus der fühlbaren Abgaswärme (thermischer Verlust), teils aus dem chemischen Verlust, das ist die Heizwärme der nicht verbrannten Abgasbestandteile (vorwiegend Kohlenmonoxid). Während des Abbrandes ändern sich ständig die Luftzahl und der Wirkungsgrad der Verbrennung. Der thermische Verlust ist am Anfang am niedrigsten (ca. 10 %), am Ende des Abbrandes mit 30 – 50 % am höchsten, im ungünstigen Fall über 100 %! Ein „negativer Wirkungsgrad“ entsteht, wenn mehr Wärme durch den Schornstein entweicht, als bei der Verbrennung entsteht. Dies tritt in der Regel ein, wenn die Ofentür geöffnet wird, um das Feuer zu schüren. Der chemische Verlust ist am Anfang des Abbrandes weniger als 1 %, am Ende kann er 10 % übersteigen. Bei Luftmangel oder zu wenig Luftüberschuss kann der chemische Verlust während des gesamten Abbrandes 10 % deutlich übersteigen.

Der Wirkungsgrad einer modernen Pellet-Zentralheizung liegt über 90 %, während bei Stückholzfeuerung ein Wirkungsgrad über 75 % als gut angesehen werden kann. Über den Brennstoffverbrauch entscheidet jedoch nicht der Wirkungsgrad, sondern der Jahresnutzungsgrad. Der Jahresnutzungsgrad berücksichtigt die sogenannten Bereitschafts- und Stillstandverluste der Heizungsanlage. Der Jahresnutzungsgrad einer Holz-Zentralheizung liegt im Bereich von 50 – 70 %. Speicheröfen haben wiederum nur dann Stillstandsverluste, wenn nach der Feuerung die Ofentür nicht luftdicht geschlossen wird oder zu spät geschlossen wird. In diesem Fall entsteht der negative Wirkungsgrad und der Jahresnutzungsgrad sinkt.

In der Fachliteratur wird der Verbrennungsvorgang in drei Phasen eingeteilt: **1** –Anheizphase (von 0 – 15 % der Gesamtverbrennungszeit), **2** – Hauptverbrennungsphase (von 16 – 70 %) und **3** – Abbrandphase (von 71 – 100 %). Für eine Beschreibung, wie der Kaminofen zu bedienen ist, ist diese Typologisierung nicht optimal, weil während der Feuerung nicht klar ist, wie lange der Verbrennungsvorgang dauern wird beziehungsweise in welcher Phase sich die Feuerung gerade befindet. Deshalb wird eine neue Typologisierung vorgeschlagen, welche anhand des Flammenbildes die verschiedenen Betriebsphasen eines Feuerungsvorganges voneinander unterscheidet:

Entgasungsphase: In der ersten 45-55% der Gesamtverbrennungszeit brennt das Holz mit stark leuchtender und nicht-transparenter Flamme. Die eingelegten Holzscheite verändern in dieser Zeit weder ihre Lage, noch ihre Form. Das Holz liefert für die Verbrennung das Holzgas, das durch Entgasung aus dem Holz entweicht. Das Holzgas verbrennt als Diffusionsflamme, da die Mischung von Gas und Luft durch Diffusion zustande kommt. Die Verbrennung ist eine homogene Oxidationsreaktion, d. h. sowohl das Brenngas als auch die Luft sind gasförmig und bilden eine homogene Mischung. Der Ruß verleiht der Diffusionsflamme eine große Leuchtkraft. Die optimale Luftzahl wird in dieser Zeit so eingestellt, dass die Luftzufuhr langsam gedrosselt wird; dabei wird die Flamme größer. Wenn die Flamme plötzlich viel größer und gleichzeitig dunkelrot wird, ist die Luftzufuhr zu niedrig: Die Luftklappe soll jetzt ein wenig geöffnet werden, bis die rote Flammenfarbe ins Gelbliche überschlägt. Dies ist die optimale Luftmenge in der Entgasungsphase. Da sich die Verbrennungsgeschwindigkeit ständig ändert, verändert sich stets der optimale Luftbedarf. Wird die Flamme kleiner, soll die Luftzufuhr gedrosselt werden. Wird die Flamme größer und dunkelrot, soll mehr Luft zugeführt werden.

Vergasungsphase: Von 45-55% bis 80-90% der Gesamtverbrennungszeit dauert die Vergasungsphase; deren typische Merkmale sind: Das Holz bröckelt ab, der Holzhaufen fällt zusammen, das Holz wandelt sich in glühende Holzkohle. Die Flamme wird kleiner und transparenter. Die Verbrennungsgeschwindigkeit wird geringer, der Verbrennungsluftbedarf sinkt. Die Flammentransparenz wird größer, weil die Rußbildung ständig abnimmt. Am Anfang dieser Phase ist die Flamme gelb, weil sich noch ein wenig Ruß in der Flamme bildet. Später ist die Rußkonzentration so gering, dass es für eine Farbgebung nicht mehr ausreicht. Jetzt wird die Flamme vom Natriumgehalt und/oder Kaliumgehalt der Asche gelb oder blau gefärbt. Die Flammenfarbe hilft nicht mehr die optimale Luftdosierung zu ermöglichen. Auch in der Vergasungsphase gilt, dass die Flamme bei Drosselung der Luftzufuhr sich vergrößert. Die Drosselung soll so lange erfolgen, wie lange eine langsame Drosselung der Luft mit einer langsamen Vergrößerung der Flamme verbunden ist. Wenn die langsame Luftdrosselung eine plötzlich starke Flammenvergrößerung mit sich bringt, ist die Luftzufuhr zu wenig: die Luftzufuhr soll ein wenig geöffnet werden. Die Schwierigkeit bei dieser Prozedur besteht darin, dass bei einer transparenten Flamme die Flammengröße schwer zu sehen ist. Eine Verdunkelung des Raumes kann Abhilfe verschaffen. Nach einer gewissen Übung ist die präzise Luftdosierung auch bei Tageslicht möglich.

Glutphase(Ausbrandphase): Das Brennholz hat sich bereits in glühende Holzkohle gewandelt, deren Volumen etwa ein Drittel des eingelegten Holzvolumens entspricht. Anzahl und Form der eingelegten Holzscheite ist nicht mehr erkennbar. Am Anfang der Glutphase ist das Gesamtvolumen von Glut und Flamme bereits kaum größer als das ursprüngliche Volumen der eingelegten Holzscheite; mit zunehmendem Abbrand verringern sich weiter das Glutvolumen und die Flamme. Die Flamme ist transparent und kaum sichtbar. Die Luftzufuhr sollte so gelassen werden, wie die letzte Einstellung der Vergasungsphase ist. Durch Schüren der Glut kann das Flammenvolumen vergrößert, der Wirkungsgrad gesteigert und die Kohlenmonoxidbildung reduziert werden. Durch Schüren sollte die Glut möglichst kompakt in der Feuerraummitte gehalten werden. Die glühende Holzkohle brennt in der Ausbrandphase als heterogene Verbrennung. Hier reagiert fester Brennstoff mit gasförmiger Luft. Die heterogene Verbrennung ist sehr langsam, die Reaktion findet trotz gedrosselter Luftzufuhr mit viel Luftüberschuss statt. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad ist gering, die CO-Bildung ist hoch.

