

Optimaler Kaminofen und optimaler Ofenbetrieb

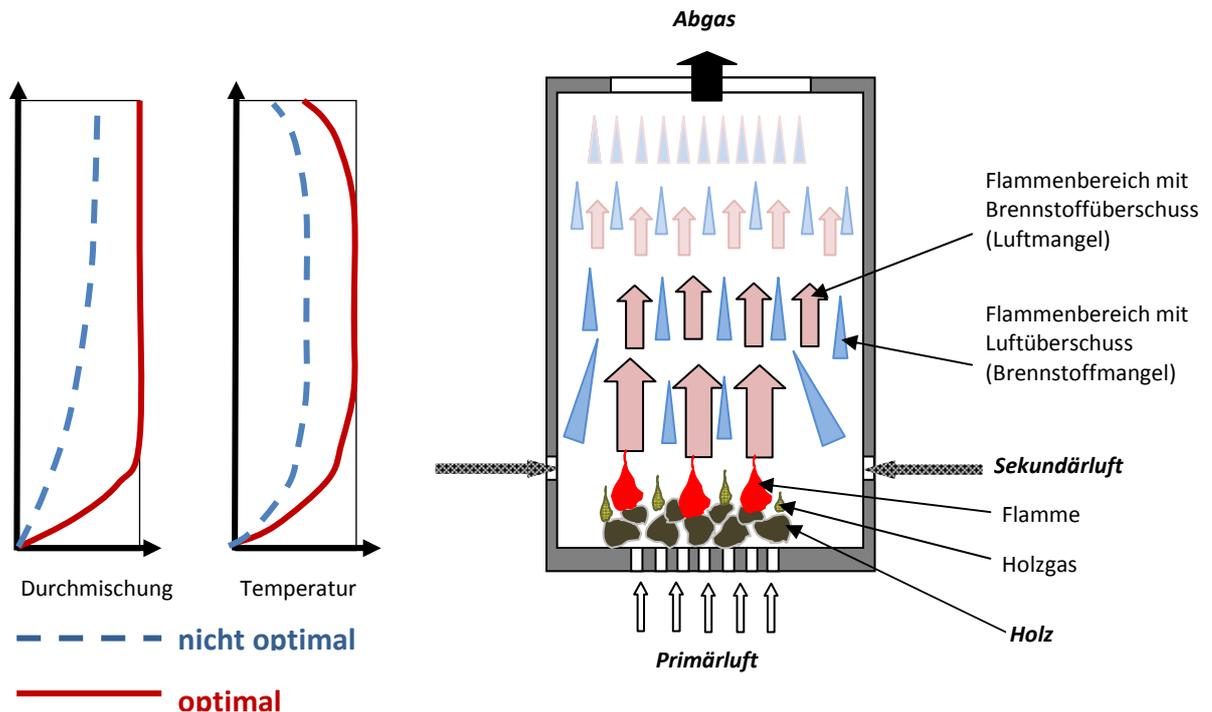


Bild 64: Prinzipskizze der Stückholzverbrennung im Kaminofen

Bild 64 zeigt die Prinzipskizze der Stückholzverbrennung im Kaminofen. Die Verbrennung verläuft optimal, wenn im Feuerraum schnell hohe Temperaturen erreicht werden und gleichzeitig schnell eine gute Durchmischung von Luft und Holzgas erreicht wird. Wenn eine dieser zwei Forderungen nicht erfüllt ist, wird die Verbrennung unvollkommen. In der englischsprachigen Literatur wird oft die Forderung **TTT** erstellt:

Time, Temperature, Turbulence
 – (Verweil)Zeit, Temperatur, Turbulenz (Durchmischung)

Werden die Forderungen hohe Temperatur und gute Durchmischung erfüllt, entschärft sich die Forderung an die Verweilzeit: bei hoher Temperatur und guter Durchmischung ist die Reaktionsgeschwindigkeit sehr hoch. Daher gilt der Spruch:

gut gemischt, gleich verbrannt,

und die Verweilzeit der Produkte kann entsprechend kürzer ausfallen. Eine längere Verweilzeit wird nur benötigt, wenn die anderen zwei Forderungen nicht richtig erfüllt sind, was wiederum in den meisten Fällen zutrifft. Die wichtigsten Forderungen lauten:

hohe Feuerraumtemperatur und gute Durchmischung der Reaktanten.

Ein typischer Fehler bei der Verbrennung in Kaminöfen wird in Bild 65 gezeigt: Ein Teil des Feuerraumes bleibt kalt. Dies ist für eine kurze Zeit nach der Zündung immer der Fall. Daher sollten die Holzstücke beim Anfachen des Feuers so gelegt werden, dass die Flamme nach weniger als 6 - 8 Minuten den Feuerraum gut ausfüllt. Wenn in einem Teil des Feuerraumes zu viel Luft (zu wenig Holzgas) ist oder die notwendige Verbrennungstemperatur nicht erreicht wird (kalte Wände), liegt die tiefste Stelle der Badewannenkurve für das CO- λ -Diagramm bei $\lambda > 3$, und das Minimum der CO-Konzentration liegt über 500 ppm bezogen auf 13 % Sauerstoff im Abgas.

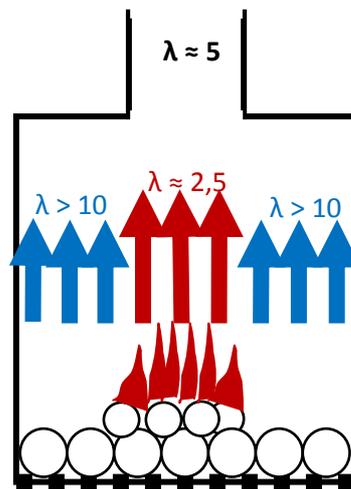


Bild 65: Schlechtes Schüren: ein Teil des Feuerraumes bleibt kalt

Ein weiterer Fehler wird in Bild 66 dargestellt. Hier wird die Sekundärluft zu weit oberhalb der aktiven Verbrennung zugeführt. Diese ist an der Stelle der Sekundärluft-Zufuhr bereits abgeschlossen. Die Folge für die Badewannenkurve im CO- λ -Diagramm ist dieselbe wie beim Fehler in Bild 65.

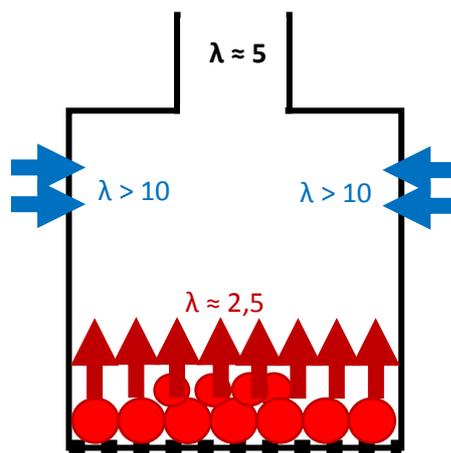


Bild 66: Schlechte Feuerraumkonstruktion: die Sekundärluft wird an der Stelle in den Feuerraum geführt, wo die Verbrennungsreaktion bereits abgeschlossen ist



(Wiederholung – Bild 22) Wird die Flamme abrupt abgekühlt, können die örtlich in der Flamme befindlichen Zwischenprodukte der Verbrennung nicht zu Ende reagieren: die Ruß-, die unverbrannte Kohlenwasserstoff- und die CO-Konzentration des Abgases steigen (Flammenlöschung – **Flame-Quenching**). Dieser Fall tritt auch ein, wenn die Flamme die kalte Feuerraumwand berührt; das Flammenvolumen soll dem Feuerraum angepasst sein. Bei guter Durchmischung wird die Flamme kleiner und die Konzentration an unverbrannten Emissionen sinkt. Bei zu langer Flamme kann die Erhöhung der Wandtemperatur die Schadstoffbildung reduzieren. Das Ersetzen der Schamottesteine durch Vermiculite-Platten führt zur Reduzierung des Flame-Quenching, zur Erhöhung der Feuerraumtemperatur und zur Schadstoffreduzierung bei der Feuerung.

Tritt einer der beiden in den Bildern 65 und 66 gezeigter Fehler auf, entsteht ein Multi-Badewannendiagramm, wie gezeigt in den Bildern 67-69.

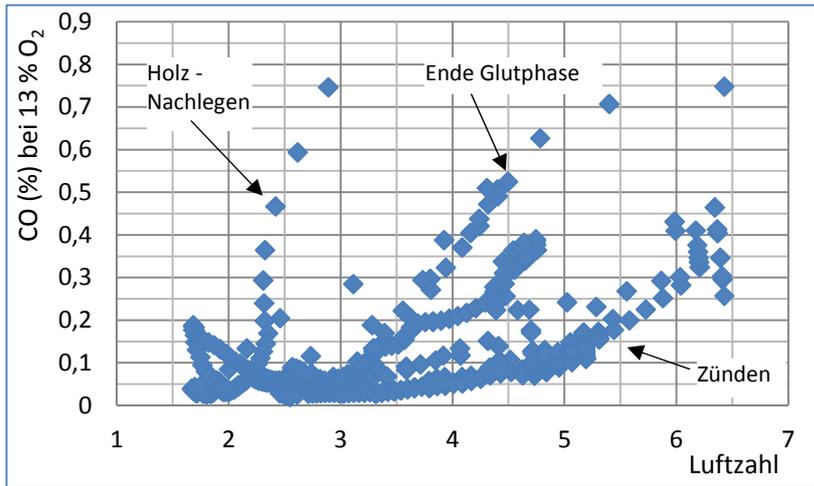


Bild 67: Schwach ausgeprägtes Multi-Badewannendiagramm

Die Tiefstelle der drei Badewannen (Zünden, Nachlegen, Glutphase) ist mit ca. 300 ppm CO sehr gut. Die Verschiebung der Tiefstelle beim Zünden zu $\lambda \approx 3,5$ kann mit Bild 65 erklärt werden. Der CO-Anstieg beim Holz-Nachlegen entstand durch die Abkühlung des Feuerraumes durch das nachgelegte Holz (Flame-Quenching). Der

Anstieg der CO-Konzentration am Ende der Glutphase ist typisch für Stückholzfeuerung und ist schwer zu beeinflussen.

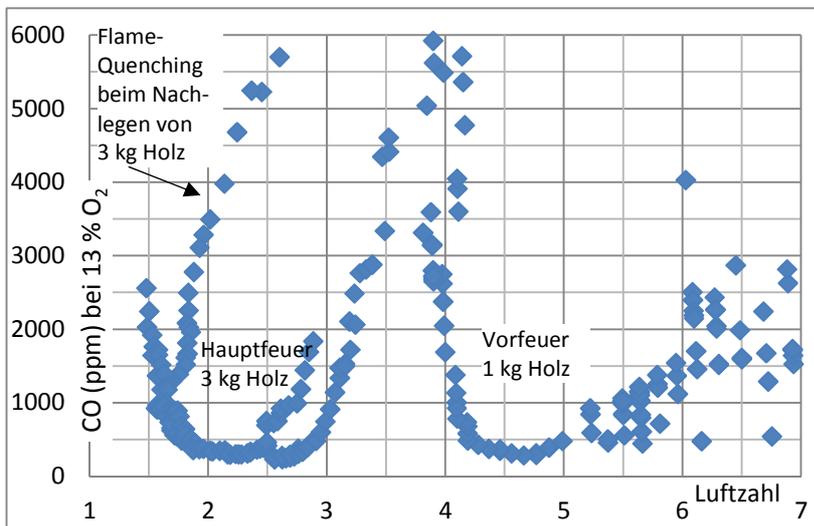


Bild 68: Multi-Badewannendiagramm durch Bedienungsfehler

Das Betreiben eines Kaminofens nach Bedienungsanleitung führt (leider) oft zu Bedienungsfehlern! Nach Bedienungsanleitung sollte nach einem Vorfeuer (1 kg Holz) das Hauptfeuer (2 – 4 kg Holz) durch Nachlegen auf Grundglut entstehen. Nebenstehendes Diagramm zeigt beim Vorfeuer den in Bild 65 geschilderten

Fehler. Beim Holz-Nachlegen entstand durch Flame-Quenching ein starker CO-Anstieg. Anschließend brannte das Hauptfeuer teilweise mit zu wenig Luftüberschuss ($\lambda \approx 1,5$). Im Luftzahlbereich $2 < \lambda < 3$ verlief die Feuerung ideal.

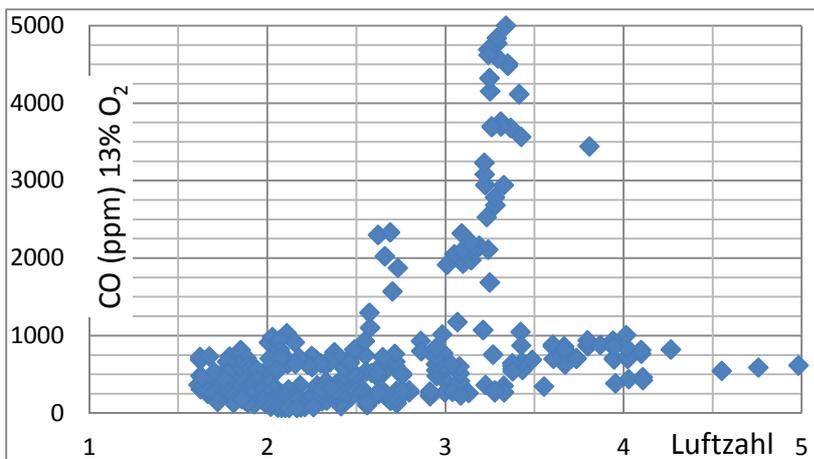


Bild 69: Ideales Feuer

Mehrere Badewannen liegen übereinander, deren niedrigste Werte bei der Luftzahl $\lambda \approx 2$ liegen und den Wert $\text{CO} < 250$ ppm unterschreiten. Der Anstieg der CO-Werte im Luftzahlbereich $3 < \lambda < 3,5$ entsteht in der Glutphase.

Die in den Bildern 68 und 69 gezeigten Versuche wurden am gleichen Ofen durchgeführt. In Bild 68 wurde der Ofen in der Originalversion nach Betriebsanleitung betrieben. In Bild 69 war der Ofen durch einige Änderungen im Feuerraum betrieben. Die Änderungen entsprachen den Forderungen **TTT**.

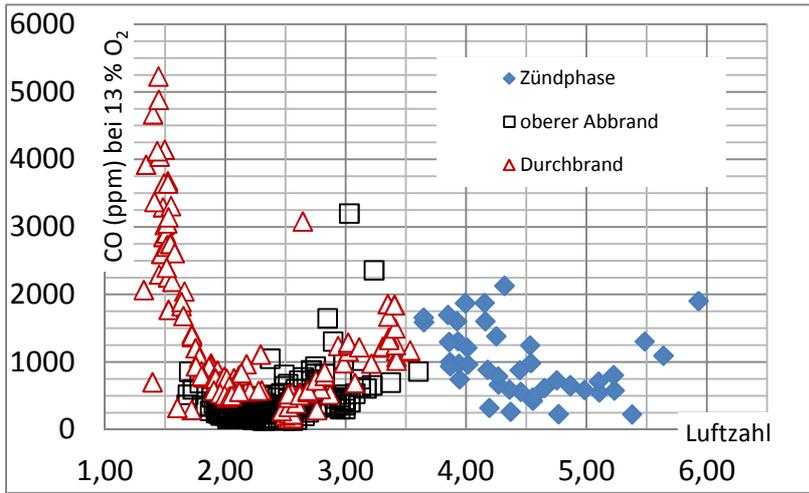


Bild 70: Während die Bedienungsanleitung 1 kg Holz für das Vorfeuer und 4 kg zum Nachlegen empfiehlt, wurden in der Feuerung zum nebenstehenden Diagramm 4 kg Holz zum ersten Anfeuern eingelegt und 2 kg als zweite Ladung. Die Badewanne der Zündphase entstand in der Zeit 5 – 15 Minuten (siehe Bild 71). Der hohe CO-Anstieg bei $\lambda \approx 1,5$ kam in der Zeit 50 – 55 Minuten zustande.

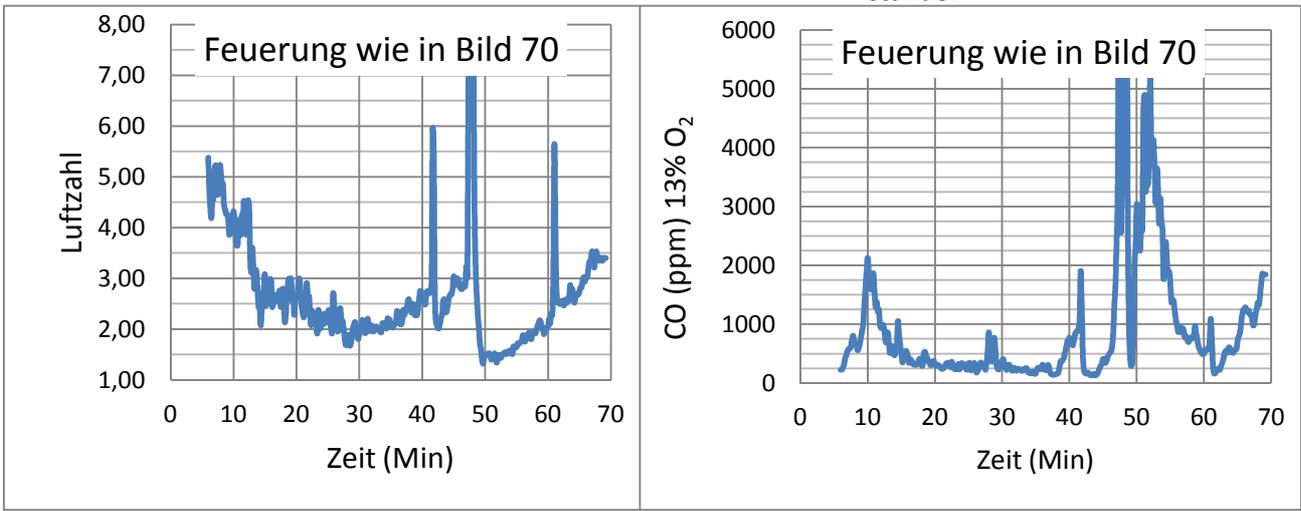


Bild 71: Zeitlicher Ablauf der Feuerung in Bild 70

Ähnliche Betriebsbedingungen (4 + 2 kg Holz) beim gleichen Ofen sind in den Bildern 58 – 59 gezeigt.

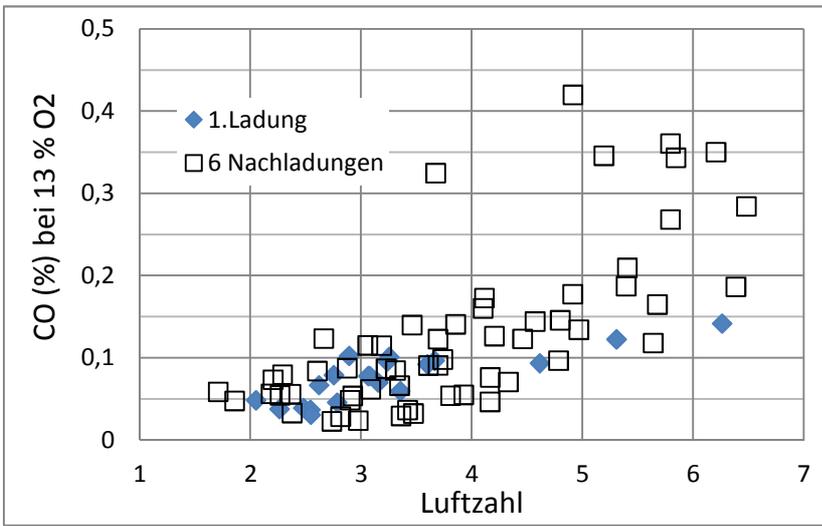


Bild 72: Die besten Verbrennungswerte (hoher Wirkungsgrad, niedrige Schadstoffbildung) werden durch Anpassung der Ladungsmengen an das optimale Flammenbild erreicht. Im gegebenen Fall: Verbrennung von ≈ 7 kg Holz (erste Ladung ≈ 2 kg, sechs Nachladungen $\approx 0,8$ kg). Diese Werte liegen oft weit entfernt von den Empfehlungen der Bedienungsanleitung.

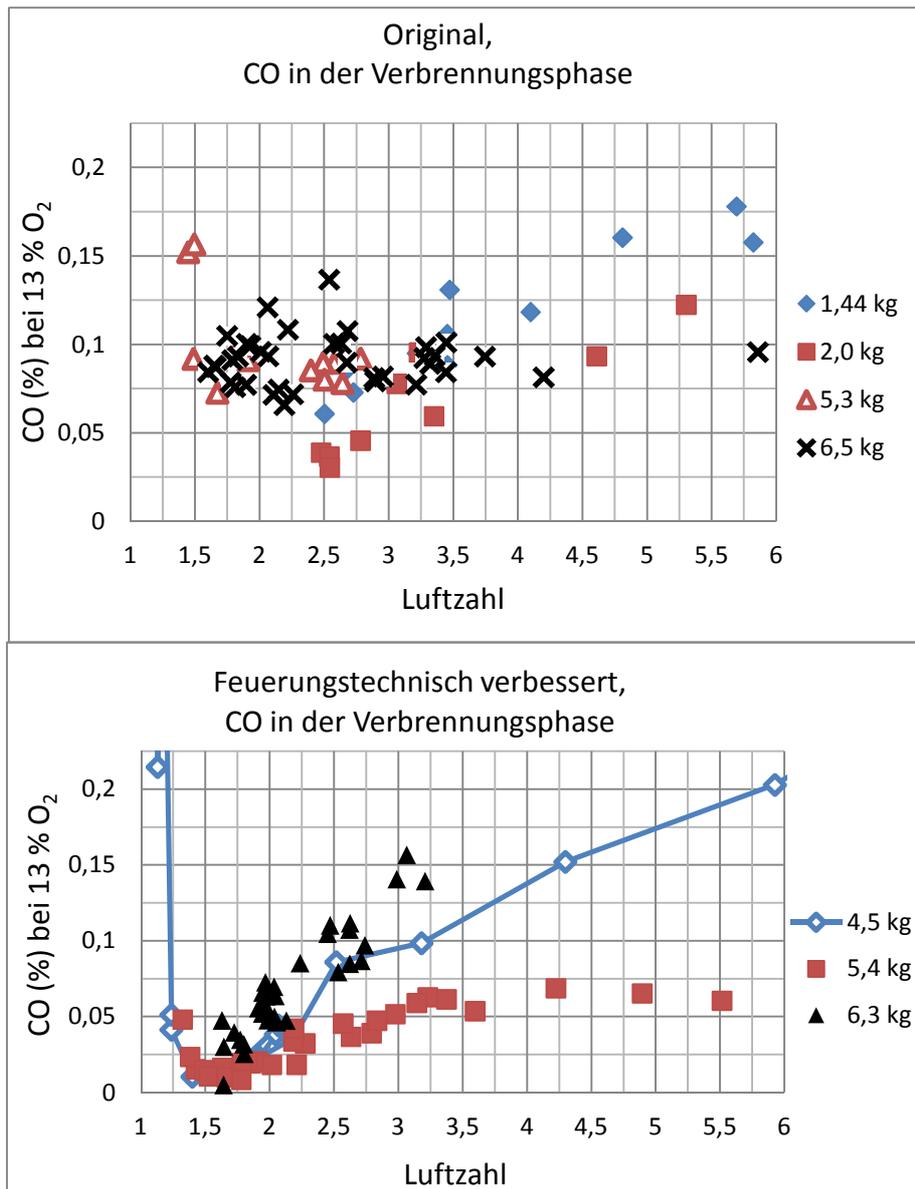


Bild 73: Vergleich der CO-Konzentration im Abgas eines Ofens in der Original- und in der feuerungstechnisch verbesserten Version

In den Bildern 68-69 ist die Möglichkeit der CO-Reduzierung in einem Ofen durch feuerungstechnische Verbesserungen gezeigt. Die gleichen Verbesserungsmaßnahmen zeigen auch in einem anderen Ofentyp ähnliche Vorteile.

Zeitlicher Verlauf der Verbrennung von 5,6 kg Holz im Modus „oberer Abbrand“ in einem Schvedenofen (Herstellungsjahr 1995, Gewicht 270 kg, Leistung 4 – 10 kW).

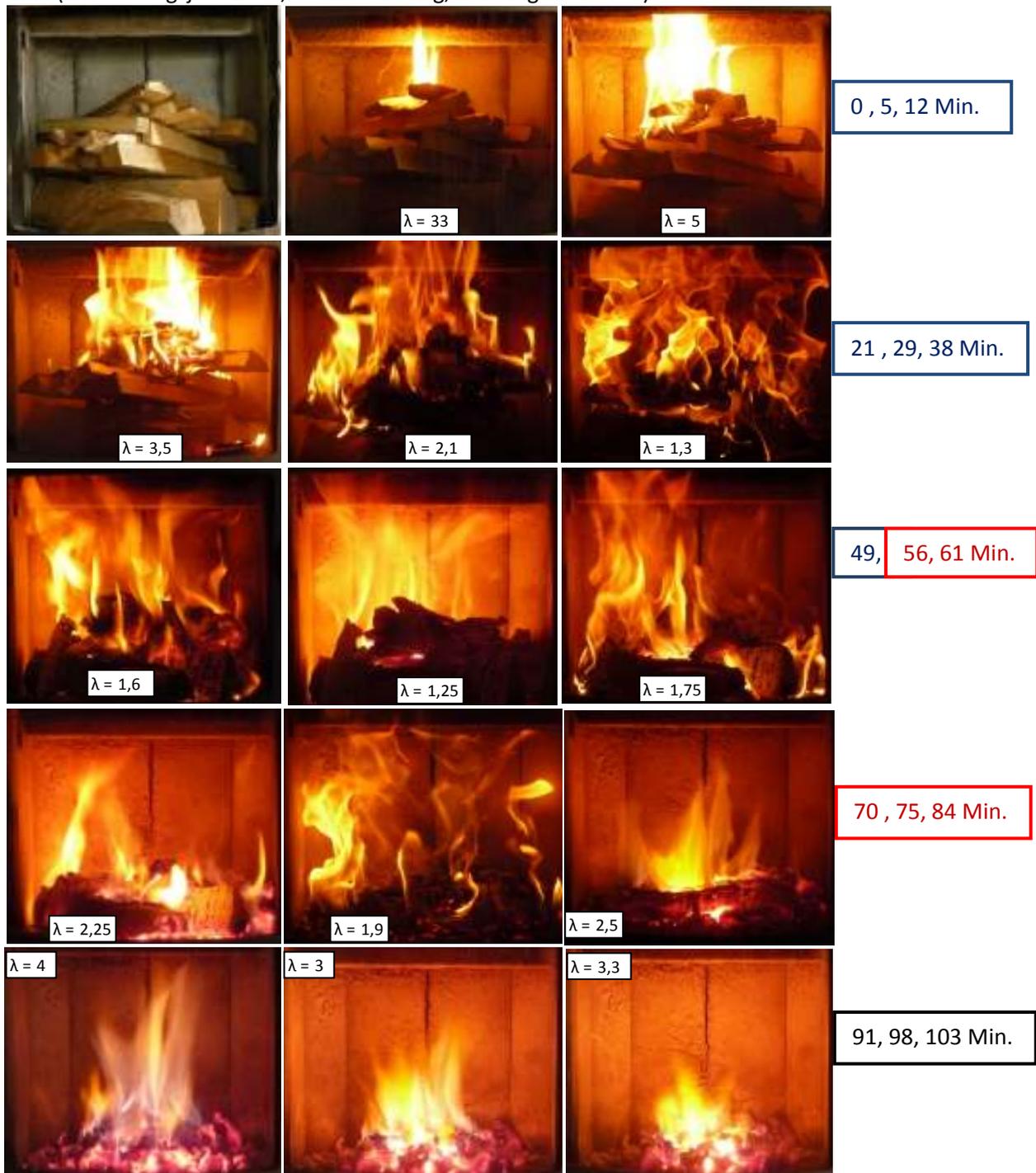


Bild 74: Flammenbilder zu verschiedenen Zeitpunkten während der Verbrennung einer Holzladung von 5,6 kg Scheitholz. Feuerungsmodus: oberer Abbrand; Ofentyp: Schvedenofen.

In Bild 74 wird zu jedem Flammenbild die augenblickliche Luftzahl angegeben. In den rechten Kästen stehen die Zeitpunkte der Aufnahmen (Zündung = 0). Die blaue Kastenfarbe bedeutet Entgasungsphase, die rote die Vergasungsphase, der schwarze Kasten bezeichnet die Glutphase.

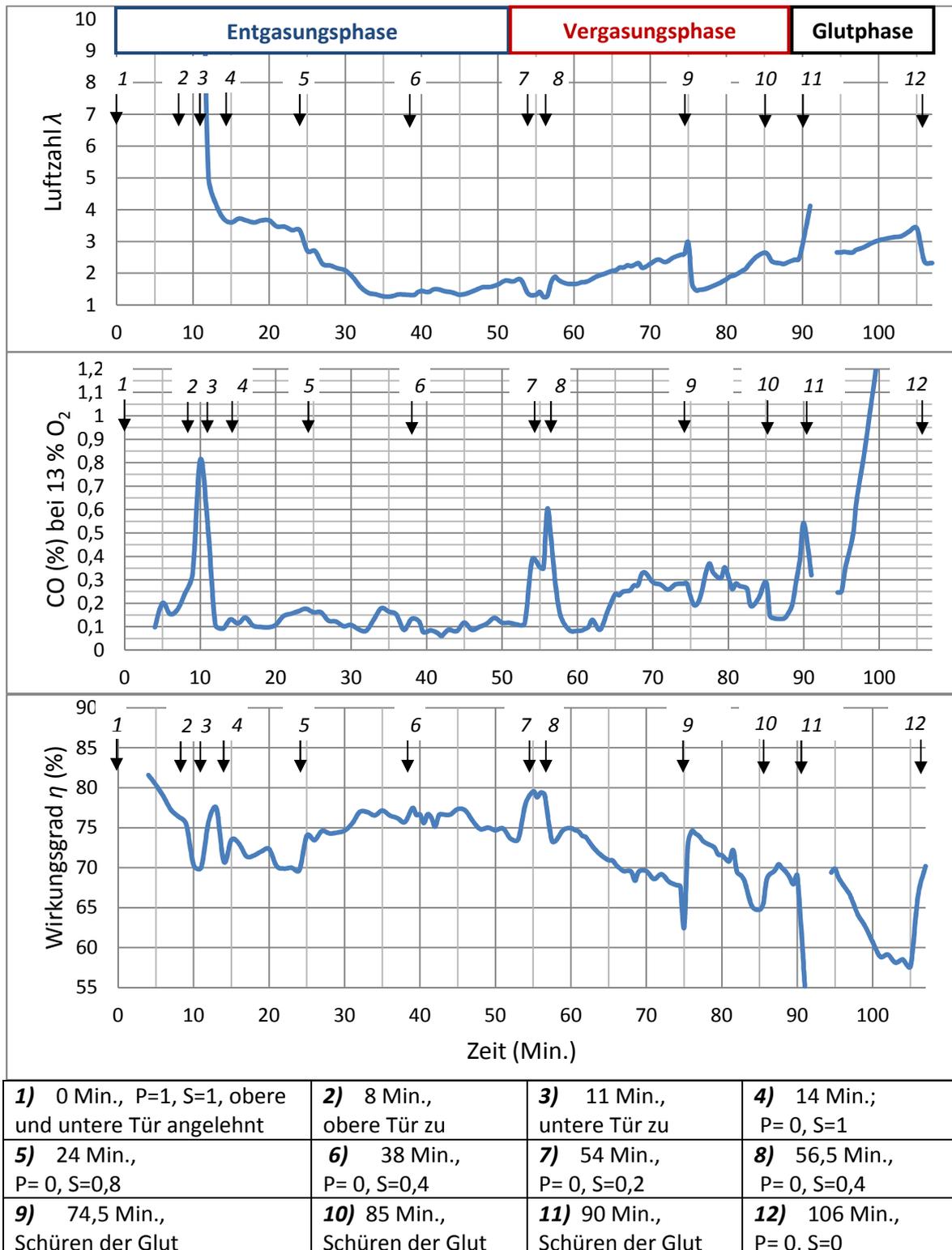


Bild 75: Zeitlicher Verlauf der Verbrennung einer Holzladung mit oberem Abbrand (Flammenbilder nach Abbildung 74). Zeitpunkt 0 = Zünden; P=Primärluft; S=Sekundärluft; 1 = offen; 0 = zu; zwischen 1 und 0 liegen die Zwischenstellungen.

Die Öffnung und Drosselung der Luft erfolgte nach Bedienungsanleitung. Die Luftzahl in den ersten 20 Minuten ist zu hoch. Bei deutlich weniger Luftzufuhr in der Zündphase verringert sich die CO-Bildung und steigt der Wirkungsgrad beim Anfachen des Feuers.

Zeitlicher Verlauf der Verbrennung von 1,6 kg Holz im Modus „oberer Abbrand“ in einem „Baumarktofen“ (Herstellungsjahr 2008, Gewicht 120 kg, Leistung 4 – 8 kW).

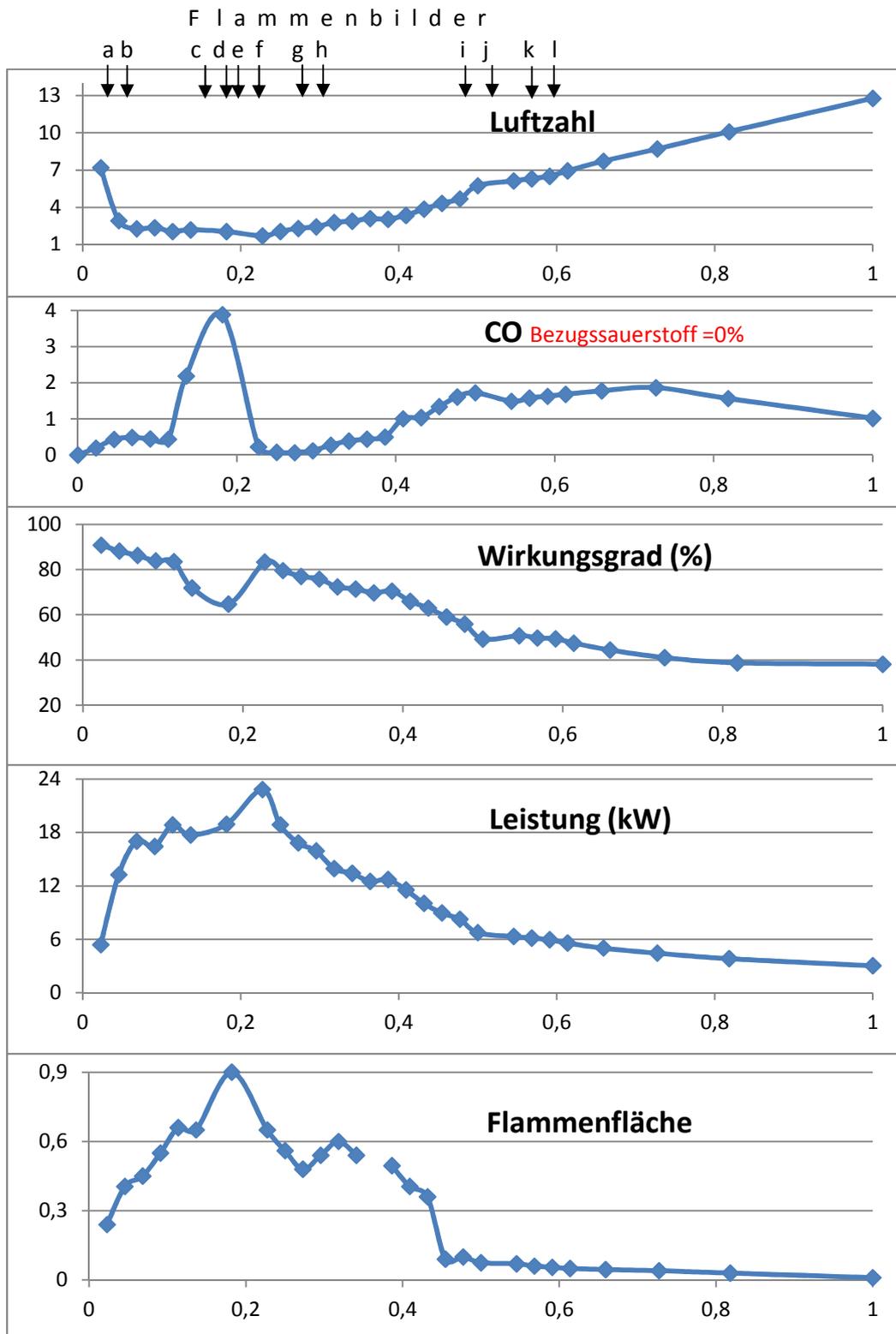


Bild 76: Zeitliche Entwicklung des Feuers bei Verbrennung von 1,2 kg Holz in einem „Baumarkt-Kaminofen“ als Funktion der Zeit t/t_{ges} mit $t_{ges} = 44$ Minuten



	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	L
t/t_{ges}	0,023	0,054	0,14	0,18	0,2	0,23	0,273	0,318	0,455	0,477	0,545	0,591
t (Min.)	1	2	6	8	9	10	12	14	20	21	24	26
λ	8	2,5	2,1	2	1,9	1,7	2,7	2,9	3,8	4,1	5,5	6,5
CO*(%)	0,2	0,4	2,1	3,9	2,3	0,15	0,08	0,25	1,3	1,6	1,5	1,7

Bild 77: Flammenfotos zu den Diagrammen in Bild 76; CO* Bezugssauerstoff O₂= 0% ($\lambda=1,0$)

Die CO-Bildung im Zeitbereich 6 – 9 Minuten nach Zünden (Flammenfotos c, d und e) ist extrem hoch. Die Flamme ist unsymmetrisch (Foto d) und berührt die kalte Wand. Danach erwärmt sich die Wand und die Flamme wird symmetrisch: die CO-Konzentration sinkt trotz abnehmender Luftzahl (Zeitpunkt 10 Min., Foto f).

Schlussfolgerungen

- 1 Die Betriebsanleitung der Kaminöfen ist verbesserungsbedürftig.
Ausführliche Information mit Bildern, Flammenfotos, Messdiagrammen und Ratgebern für richtiges Schüren des Feuers ist bei jedem Ofentyp unbedingt erforderlich! Ohne genaue Kenntnisse kann kein Ofen richtig betrieben werden.
- 2 Konstruktive Verbesserungen
Umsetzung der feuerungstechnischen Forderung **TTT**; es ist noch sehr viel Entwicklungsspielraum vorhanden.
- 3 Weiterbildung der Mitarbeiter der Herstellerfirmen
Zusammenarbeit mit Hochschulen, Förderzentren (z.B. Technologieförderzentrum (TFZ), Deutsches Biomassenforschungszentrum (DBFZ) aber auch TTZ Lampoldshausen)
- 4 Schulung der Benutzer
Gerätehersteller, Volkshochschulen, Presse sollten den Benutzern von Kaminöfen Informationen weitergeben, Kurse halten usw.
- 5 Rauchgascomputer verbessern
Es ist schwer zu verstehen, dass viele Hersteller CO-Sensoren für Messungen von bis zu 100 000 ppm anbieten, aber bei der Berechnung von Luftzahl, Wirkungsgrad usw. Gleichungen anwenden, als wäre die CO-Konzentration im Abgas gleich Null.
- 6 Kleine Wärmeleistung, große Speichermasse
Bei Konstruktion, Herstellung, Verkauf und Beratung sollten kleinerer Nennwärmeleistung und größerer Wärmespeichermasse mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Literatur:

Ein Teil der Bilder und Diagramme wurde in folgenden Arbeiten bereits veröffentlicht:

Z. Faragó: Richtiges Schüren des Kaminfeuers durch Flammenbetrachtung,
gi – Gesundheitsingenieur, Nr. 5, 2010

Z. Faragó: Schüren des Kaminfeuers – aber richtig, **gi – Gesundheitsingenieur**, Nr.4, 2011

Tabellen, Diagramme, Gleichungen, die aus anderen Veröffentlichungen stammen, wurden an den entsprechenden Stellen gekennzeichnet.

Empfehlenswerte weiterführende Literatur, die zum Teil aus dem Internet abrufbar ist:

Theory of wood firing;

http://www.videncenter.dk/Groenne%20trae%20haefte/Groen_Engelsk/Kap_06.pdf

Umweltbundesamt: Heizen mit Holz (Ein Ratgeber zum richtigen und sauberen Heizen)

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3151.pdf>

Jörgen Good, Thomas Nussbaumer: Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen. Publication Number: 195423, Program: Biomass & Wood Energy, Project: 910017, <http://www.bfe.admin.ch>

Kippel, Nussbaumer: Einfluss der Betriebsweise auf die Partikel-Emissionen von Holzöfen

www.verenum.ch/Publikationen/SBOfenmessun.pdf

Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen www.tfz.bayern.de/sonstiges/17745/handbuch_komplett.pdf