



verenum

*Verenum Dr. Thomas Nussbaumer
Ingenieurbüro für Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik*

Holzbacköfen in Bäckereien und Pizzerien

Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung

Adrian Lauber

Thomas Nussbaumer

Peter Zotter

Auftraggeber

Kanton Aargau
Departement Bau, Verkehr und Umwelt
Claude Furginé
Entfelderstrasse 22
5001 Aarau

Kanton Graubünden
Amt für Natur und Umwelt
Hans Michel
Ringstrasse 10
7001 Chur

Verenum, Zürich, 30.7.2020

Inhalt

1	Zielsetzung	3
2	Emissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung.....	4
3	Holzbacköfen.....	6
3.1	Kategorien.....	6
3.2	Pizzabacköfen.....	7
3.3	Brotbacköfen ohne separate Brennkammer	8
3.4	Brotbacköfen mit separater Brennkammer	9
3.5	Brotbacköfen mit mehreren synchron betriebenen Backräumen	10
3.6	Brotbacköfen mit mehreren autonomen Backräumen	10
4	Emissionen	12
4.1	Zusammensetzung	12
4.2	Abgas der Holzverbrennung	13
4.3	Abluft des Backguts	13
5	Emissionsmessung	14
5.1	Standardmessverfahren.....	14
5.2	Einschränkungen der Standardmessverfahren	15
5.3	Emissionsmessung unter Berücksichtigung von Nachlegen	16
5.4	Messung von Betriebszyklen bei Backöfen mit mehreren autonomen Backräumen	17
5.5	Anwendbarkeit und Bewertung der Messverfahren.....	17
6	Massnahmen zur Emissionsminderung	19
6.1	Verbrennungsoptimierung.....	19
6.2	Abgasnachbehandlung	19
7	Literatur.....	21

1 Zielsetzung

Ziel des vorliegenden Berichts ist eine Auslegeordnung zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) an gewerblich genutzten Holzbacköfen in Bäckereien und Pizzerien. Der Bericht behandelt Backöfen, welche das Abgas der Holzfeuerung und die Abluft des Backprozesses über einen gemeinsamen Kamin in die Umgebung leiten. Dazu zählen Pizzaöfen und Brotbacköfen, die manuell mit Stückholz oder automatisiert mit Holzpellets befeuert werden. Der Vollzug der LRV gemäss Emissions-Messempfehlungen des BAFU für Holzfeuerungen [1], [2] ist bei solchen holzbefeuerten Backöfen aus folgenden Gründen schwierig:

- Die O₂-Konzentration im Kamin ist teilweise auch während des Feuerungsbetriebs so hoch, dass die Definition für das Ende des Feuerungsbetriebs anhand des O₂-Schwellenwerts von 18 Vol.-% nicht anwendbar ist.
- Oft kann nicht genügend lange gemessen werden, weil die Betriebsphasen mit für Emissionsmessungen zulässigen Bedingungen zu kurz sind.
- In automatisierten Backöfen mit mehreren autonom befeuerten Backräumen werden die einzelnen Backräume in der Regel nicht gleichzeitig mit Backgut beschickt, sodass sich die Betriebsphasen der Backräume überlagern. Eine Emissionsmessung im Kamin erfasst dann das aus mehreren Backräumen zusammengeführte Abgas. Eine Zuordnung zu den einzelnen Backräumen und deren Betriebsphasen ist deshalb nicht möglich.
- Die höchsten Emissionen von Holzbacköfen treten oft während Betriebsphasen auf, die nicht in der standardisierten Emissionsmessung berücksichtigt werden.

Der vorliegende Bericht beschreibt verschiedene Anlagentypen, die Betriebsphasen und deren Emissionen, sowie emissionsmindernde Massnahmen. Für Emissionsmessungen werden mögliche Varianten und deren Anwendbarkeit auf die verschiedenen Anlagentypen beschrieben.

2 Emissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung

Für die Beurteilung des Abgases von Holzbacköfen nach LRV ist zu beachten, dass es Abgas der Holzverbrennung und Abluft des Backprozesses enthält. Im vorliegenden Bericht werden für eine bessere Verständlichkeit die Begriffe «Abgas» und «Abluft» wie folgt unterschieden, obwohl gemäss Anhang 1 Ziffer 21 LRV die Abluft auch als Abgas bezeichnet wird:

1. Für das Abgas der Holzfeuerung gelten gemäss Anhang 3 Ziffer 1 Absatz b LRV die Emissionsgrenzwerte (EGW) von Anhang 3 Ziffer 522 LRV, wenn sie mit Holzbrennstoffen nach Anhang 5 Ziffer 31 Absatz 1 LRV betrieben werden (Tabelle 1). Mit der Änderung der LRV vom 1.4.2020 gelten die gesonderten EGW nicht nur für handbeschickte, sondern auch für automatisch mit Brennstoff beschickte Holzbacköfen. Davor wurden bei automatisch beschickten Holzbacköfen teilweise die EGW für automatische Holzfeuerungen angewendet. Für gewerbliche Holzbacköfen mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) über 500 kW definiert die LRV jedoch keine EGW, so dass die Vollzugsbehörde individuelle EGW festlegen muss. Für die Festlegung des EGW ist gemäss Anhang 3 Ziffer 3 LRV die Feuerungswärmeleistung der betrieblichen Einheit massgebend. Da Betriebe mit mehreren Backöfen keinen variablen Wärmebedarf abdecken, kann Anhang 3 Ziffer 3 Absatz 3 LRV bei Holzbacköfen nicht angewendet werden. Massgebend ist somit die Summe der Feuerungswärmeleistungen aller installierten Backöfen.
2. Für die Abluft des Backprozesses gelten die allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen nach Anhang 1 LRV. Für den Backprozess ist aus der Liste der allgemeinen EGW mindestens derjenige für Ethanol zu beachten, da im Backprozess Ethanol freigesetzt wird. Für Ethanol bzw. zusammenfassend für Alkylalkohole gilt nach Anhang 1 Ziffer 7 LRV ein EGW von 150 mg/m³ ab einem Massenstrom von 3 kg/h. Dieser Abluft-Massenstrom entspricht einer Produktion von rund 3.6 t Brot pro Stunde (siehe Kapitel 4.3).

Wenn ein wesentlicher Teil der Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden gestört wird, kann jedoch eine zusätzliche Emissionsbegrenzung erforderlich sein, auch wenn die EGW nicht überschritten werden (Artikel 2 Ziffer 5 Absatz b LRV).

Tabelle 1 Emissionsgrenzwerte für Holzfeuerungen gemäss Anhang 3 Ziffer 52 LRV. Dargestellt sind die Bezugs-Sauerstoffkonzentration (O₂), die Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid (CO), Feststoff und Stickoxide (NO_x) in Abhängigkeit der Feuerungswärmeleistung. Einen Emissionsgrenzwert für Gesamtkohlenstoff (VOC) im Abgas gibt es gemäss Anhang 3 Ziffer 522 LRV erst ab einer Feuerungswärmeleistung von 10 MW.

¹⁾ Grenzwert gilt ab einem Massenstrom von 2'500 g/h. Gemäss Kapitel 13 der Emissions-Messempfehlung des BAFU [1] muss der Massenstrom jedoch nicht berechnet werden, sondern es müssen die NO_x-Konzentration bei Holzfeuerungen > 3 MW gemessen werden.

Emissionsgrenzwerte der LRV für Holzfeuerungen				
	< 70 kW	70 kW – 500 kW	500 kW – 1 MW	> 1 MW
O ₂ Bezug [Vol.-%]	13	13	13	11
gewerblich genutzte Backöfen				
CO [mg/m ³]	4000	4000	–	–
Feststoffe [mg/m ³]	100	50	–	–
NO _x [mg/m ³]	–	–	–	–
automatische Holzfeuerungen				
CO [mg/m ³]	1000	500	500	250
Feststoffe [mg/m ³]	50	50	20	20
NO _x [mg/m ³]	–	–	–	(250) ¹⁾

3 Holzbacköfen

3.1 Kategorien

Die Art und Charakteristik von Abgas und Abluft gewerblicher Holzbacköfen ist anhand ihres Aufbaus und der Art ihrer Befuerung zu unterscheiden. In allen Kategorien von Holzbacköfen wird ein Backraum zum Backen von Brot und Pizzen durch die Verbrennung von Holz aufgeheizt. Der Backraum wird teilweise auch als Herd bezeichnet. Die LRV und die EN 12815 verwenden die Bezeichnung Herd jedoch ausschliesslich für handbeschickte Kochherde im privaten Bereich.

Bei Holzbacköfen ist zwischen Brot- und Pizzabacköfen ohne separate Brennkammer und Brotbacköfen mit räumlicher Trennung zwischen Brennkammer und Backraum zu unterscheiden (Bild 1). Ohne separate Brennkammer wird der Brenn- und Backraum durch das Feuer direkt aufgeheizt. Bei Backöfen mit einer separaten Brennkammer kann die Verbrennung vollständig in der Brennkammer stattfinden oder der Backraum vor dem Backprozess als Nachbrennkammer dienen. Teilweise wird auch nur ein Teil des Abgases durch den Backraum geführt und dieser hauptsächlich indirekt beheizt.

Zusätzlich sind Brotbacköfen mit mehreren Backräumen in einer betrieblichen Einheit und einer gemeinsamen Abgasführung in den Kamin gesondert zu betrachten (Bild 2). Backöfen mit einer Brennkammer und mehreren Backräumen sind in der Regel handbeschickt. In Backöfen mit mehreren Brennkammern werden die Brennkammern dagegen meist automatisch beschickt, wozu in der Regel Holzpellets als Brennstoff dienen.

Daneben sind noch weitere hier nicht aufgeführte Bauformen möglich.

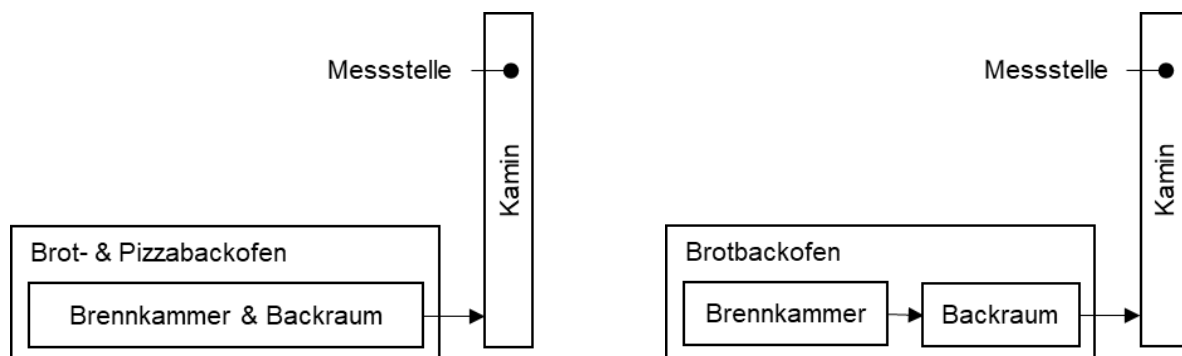


Bild 1 Unterscheidung zwischen einem Brot- und Pizzabackofen ohne separate Brennkammer (links) und einem Brotbackofen mit räumlicher Trennung zwischen Brennkammer und Backraum (rechts).

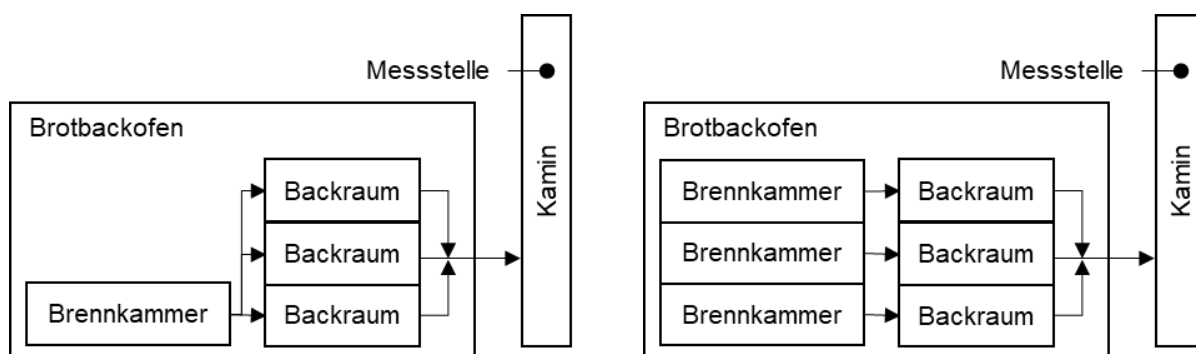


Bild 2 Brotbacköfen mit einer Brennkammer und mehreren Backräumen (links) und Brotbacköfen mit mehreren Brennkammern und Backräumen (rechts).

3.2 Pizzabacköfen

Bild 3 zeigt einen charakteristischen Betriebsablauf eines handbeschickten Pizzabackofens. Nach einem Kaltstart wird der Backofen vollständig aufgeheizt. Dazu wird oft nach dem ersten Ausbrand noch eine Charge Holz nachgelegt, um im Backraum die Betriebstemperatur zu erreichen. Vor dem Backen wird die Glut zur Seite geschürt, sodass während des Backbetriebs regelmässig einzelne Holzscheite auf diese Glut nachgelegt werden können, um den Ofen über eine längere Zeit auf Backtemperatur zu halten. Im Unterschied zu Brotbacköfen finde somit während des Backbetriebs auch weiterhin eine Verbrennung statt.

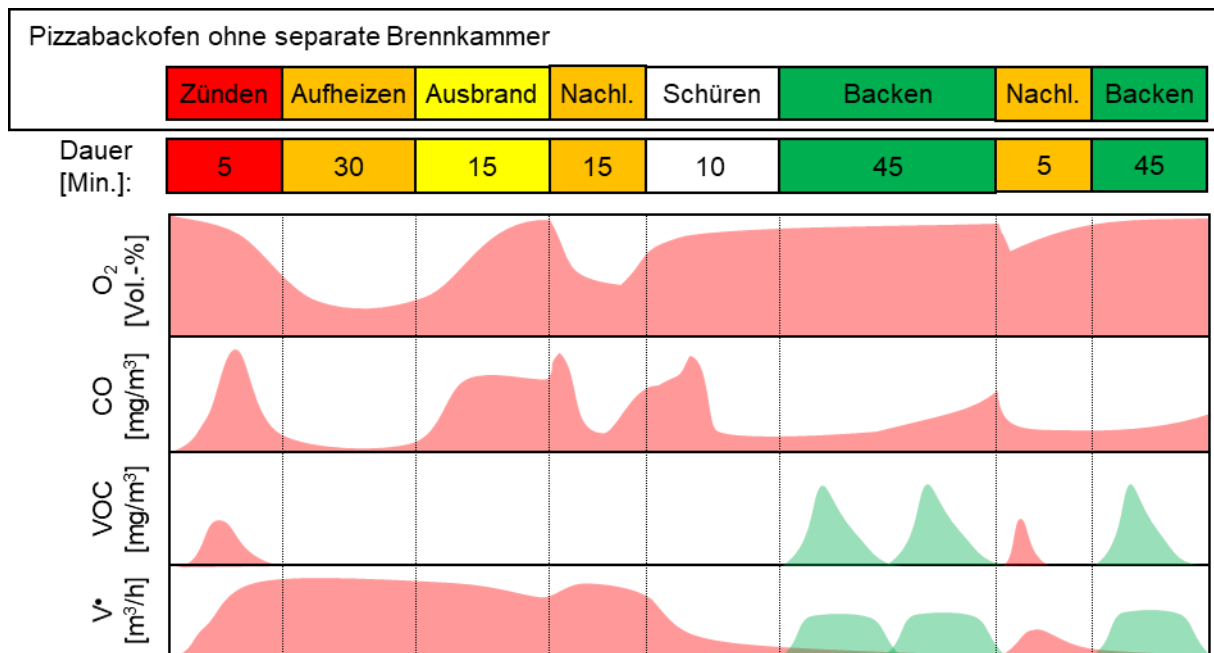


Bild 3 Oben: Schematisches Beispiel für den zeitlichen Betriebsablauf in einem Pizzabackofen. Während des Backens werden regelmässig einzelne Holzscheite nachgelegt (orange) und die Phasen Backen und Nachlegen wiederholen sich. Unten: Verlauf von O_2 , Emissionen (CO, VOC) sowie der Volumenströme (V^*) des Abgases der Holzverbrennung (rot) und der Abluft des Backprozesses (grün). Die Verläufe sind Praxismessungen nachempfunden, die Volumenströme von Abgas und Abluft, sowie der Ethanolgehalt der Abluft wurden jedoch nicht gemessen, weshalb deren Verlauf abgeschätzt ist.

Der Verlauf der Emissionen in Bild 3 ist demjenigen einer kontinuierlichen Praxismessung in einer Pizzeria über einen Zeitraum von fünf Stunden nachempfunden [3]. Während dieser Praxismessung wurden während der ersten rund 15 Minuten eine Überschreitung des CO-Grenzwerts und erhöhte VOC-Emissionen gemessen. Danach waren die CO-, VOC- und O_2 -Konzentrationen tief, bis mit dem Beginn des ersten Ausbrands die CO- und O_2 -Konzentrationen anstiegen. Durch das Nachlegen sanken die Konzentrationen erneut, bis zum zweiten Ausbrand, an dessen Ende auch geschürt wurde und damit eine zusätzliche unvermeidliche Emissionsspitze mit einer Überschreitung des CO-Grenzwerts auftrat. Nach dem Schüren wurde im Backbetrieb während rund zweieinhalb Stunden alle 30 Minuten ein einzelnes Holzscheit nachgelegt. Dabei lag die O_2 -Konzentration zwischen 18 und 20 Vol.-% und der CO-Grenzwert wurde nie überschritten. In einer weiteren Backphase wurden die Holzscheite dagegen nicht genau auf die Glut gelegt, wodurch der CO-Grenzwert deutlich überschritten wurde.

3.3 Brotbacköfen ohne separate Brennkammer

Bild 4 zeigt einen charakteristischen Betriebsablauf eines handbeschickten Brotbackofens ohne separate Brennkammer. Dieser wird einmal vollständig aufgeheizt. Dazu wird oft nach dem ersten Ausbrand noch eine Charge Holz nachgelegt, um im Backraum die Betriebstemperatur zu erreichen. Nach dem Erlöschen der Flammen wird in der Regel geschürt und die Glut gleichmässig im Backraum verteilt, damit sie vollständig ausglühen kann. Vor dem Backen werden die restliche Glut und Asche aus dem Backraum entfernt. Nach dem Backen startet der Betriebszyklus neu. Bei einem handbeschickten Backofen ohne separate Brennkammer muss für einen direkt anschliessenden Backzyklus ein Warmstart mit manuellem Zünden durchgeführt werden, da im Brenn- und Backraum keine Glut vorhanden ist, auf welche Holz nachgelegt werden kann.

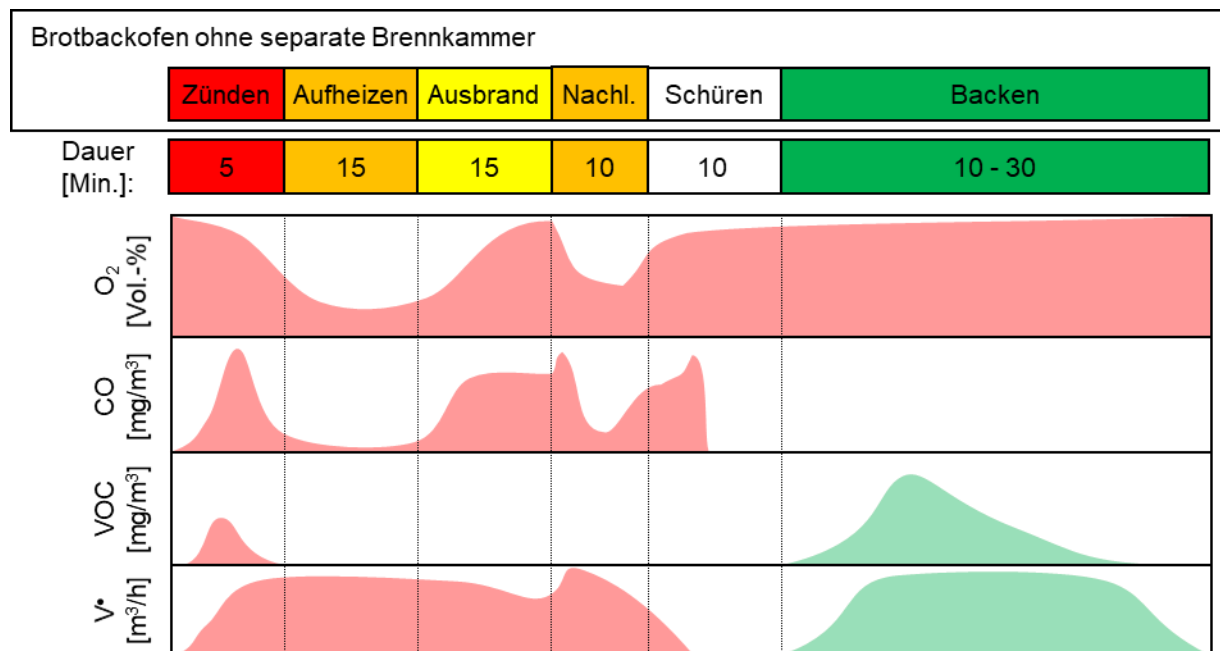


Bild 4 Oben: Schematisches Beispiel für den zeitlichen Betriebsablauf in einem Brotbackofen ohne separate Brennkammer. Vor dem Backen wird Holz nachgelegt und nach dem Schüren die restliche Glut und Asche aus dem Backraum entfernt. Unten: Verlauf von O₂, Emissionen (CO, VOC) sowie der Volumenströme (V*) des Abgases der Holzverbrennung (rot) und der Abluft des Backprozesses (grün). Die Verläufe sind Praxismessungen nachempfunden, die Volumenströme von Abgas und Abluft, sowie VOC der Holzfeuerung und der Ethanolgehalt der Abluft wurden jedoch nicht gemessen, weshalb deren Verlauf abgeschätzt ist.

Der Verlauf der Emissionen in Bild 4 ist demjenigen einer Praxismessung während drei mal acht Minuten an einem handbeschickten Brotbackofen ohne separate Brennkammer nachempfunden [4]. Während dieser Praxismessung, die 15 Minuten nach dem Kaltstart begann, wurden O₂-Konzentrationen zwischen 11 und 18 Vol.-%, CO-Konzentrationen zwischen 1500 und 6000 mg/m³ und Feststoffkonzentrationen von rund 100 mg/m³ bezogen auf 13 Vol.-% O₂ gemessen. Die grosse Variabilität der drei Messwerte ist auf die kurzen Messintervalle in Kombination mit einer kurzen Aufheizphase vor dem Beginn des Ausbrands zurückzuführen.

3.4 Brotbacköfen mit separater Brennkammer

Bild 5 zeigt einen charakteristischen Betriebsablauf eines Brotbackofens mit separater Brennkammer, der sowohl handbeschickt als auch automatisch mit Pellets befeuert sein kann. Bei diesen Backöfen kann die Verbrennung vollständig in der Brennkammer stattfinden oder der Backraum vor dem Backprozess als Nachbrennkammer dienen. Teilweise wird auch nur ein Teil des Abgases durch den Backraum geführt und dieser hauptsächlich indirekt beheizt. Diese Backöfen werden nach dem Kaltstart einmal vollständig aufgeheizt. Bei handbeschickten Backöfen wird oft nach dem ersten Ausbrand noch eine Charge Holz nachgelegt, um im Backraum die Betriebstemperatur zu erreichen. Damit im Backraum eine gleichmässige Temperaturverteilung eintritt, kann vor dem Backen eine Ausgleichsphase eingefügt werden, in der keine Verbrennung stattfindet. Nach dem Backen startet der Betriebszyklus neu. Bei handbeschickten Backöfen ist der Startvorgang davon abhängig, ob noch genügend Glut zum Nachlegen von Holz vorhanden oder ein Warmstart mit manuellem Zünden erforderlich ist.

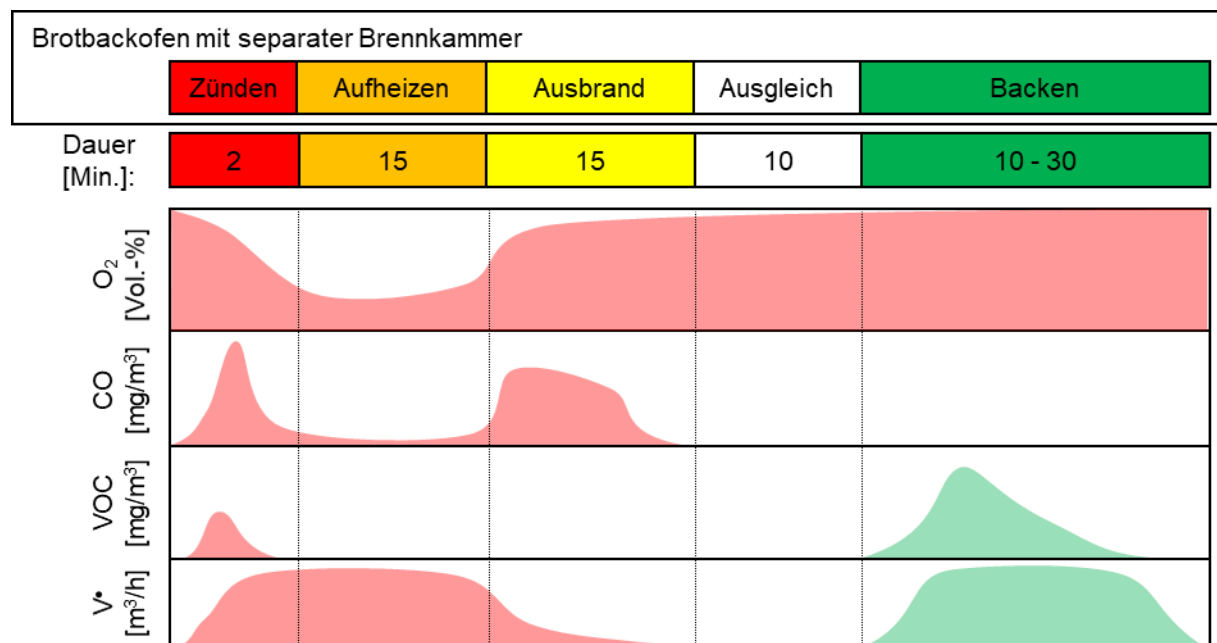


Bild 5 Oben: Schematisches Beispiel für den zeitlichen Betriebsablauf in einem Brotbackofen mit einem einzelnen Backraum. Dargestellt sind die einzelnen Betriebsphasen und die die Verläufe der Emissionen.
Unten: Verlauf von O₂, Emissionen (CO, VOC) sowie der Volumenströme (V*) des Abgases der Holzverbrennung (rot) und der Abluft des Backprozesses (grün). Die Verläufe sind Praxismessungen nachempfunden, die Volumenströme von Abgas und Abluft, sowie VOC der Holzfeuerung und der Ethanolgehalt der Abluft wurden jedoch nicht gemessen, weshalb deren Verlauf abgeschätzt ist.

Der Verlauf der Emissionen in Bild 5 ist demjenigen einer kontinuierlichen Praxismessung an einem handbeschickten Brotbackofen während rund fünf Stunden nachempfunden [4]. Während dieser Praxismessung wurde in den ersten rund 15 Minuten eine Überschreitung des CO-Grenzwerts gemessen. Danach waren die CO- und O₂-Konzentrationen tief, bis mit dem Beginn des Ausbrands die CO- und O₂-Konzentrationen erneut stiegen. Dreimal wurde nach 30 Minuten bis 2 Stunden, direkt nach der Backphase, jeweils eine Charge Holz nachgelegt. Nach dem Nachlegen wurde der CO-Grenzwert erneut während rund 15 Minuten überschritten. Danach sanken die CO- und O₂-Konzentrationen während rund 30 bis 60 Minuten deutlich, bevor sie mit dem Beginn des jeweiligen Ausbrands stiegen.

Die CO-Emissionen in den Abbrandphasen nach dem Nachlegen waren höher als während des Abbrands nach dem Kaltstart, da nach der Backphase in der Brennkammer nur noch wenig Glut vorhanden war und das Holz deshalb nur langsam zündete.

3.5 Brotbacköfen mit mehreren synchron betriebenen Backräumen

Bild 6 zeigt einen charakteristischen Betriebsablauf eines Brotbackofens mit mehreren synchron betriebenen Backräumen. Diese synchrone Betriebsweise ist bei handbeschickten Brotbacköfen mit einer einzelnen separaten Brennkammer möglich, mit deren Abgas mehrere Backräume beheizt werden. Bei einem solchen synchronen Betrieb entspricht der Verlauf der Emissionen jenem aus Bild 5.

Brotbackofen mit 3 Backräumen					
Backraum 3	Zünden	Aufheizen	Ausbrand	Ausgleich	Backen
Backraum 2	Zünden	Aufheizen	Ausbrand	Ausgleich	Backen
Backraum 1	Zünden	Aufheizen	Ausbrand	Ausgleich	Backen
Dauer [Min.]:	2	15	15	10	10 - 30

Bild 6 Schematisches Beispiel für den zeitlichen Betriebsablauf in einem Brotbackofen mit mehreren synchron betriebenen Backräumen.

3.6 Brotbacköfen mit mehreren autonomen Backräumen

Bild 7 zeigt einen charakteristischen Betriebsablauf eines automatisierten Brotbackofens mit mehreren autonom betriebenen Backräumen, welche in der Regel mit Pellets befeuert werden. Bei diesen Backöfen kann die Verbrennung vollständig in der Brennkammer stattfinden oder der Backraum vor dem Backprozess als Nachbrennkammer dienen. Teilweise wird auch nur ein Teil des Abgases durch den Backraum geführt und dieser hauptsächlich indirekt beheizt. Die Pelletbrenner werden automatisch gezündet, um den Backraum aufzuheizen. Nach dem Ausbrand wird vor dem Backen meist eine Ausgleichsphase eingefügt, um im Backraum eine gleichmässige Temperaturverteilung zu erreichen. Nach dem Backen startet der Betriebszyklus automatisch neu. Die einzelnen Backräume werden individuell und automatisiert nach den Bedürfnissen der Backprozesse betrieben. Da mehrere Backräume eine betriebliche Einheit bilden und deren Abgase zusammengeführt werden, ist eine Unterscheidung der Betriebsphasen der einzelnen Backräume im Abgas in der Regel nicht möglich.

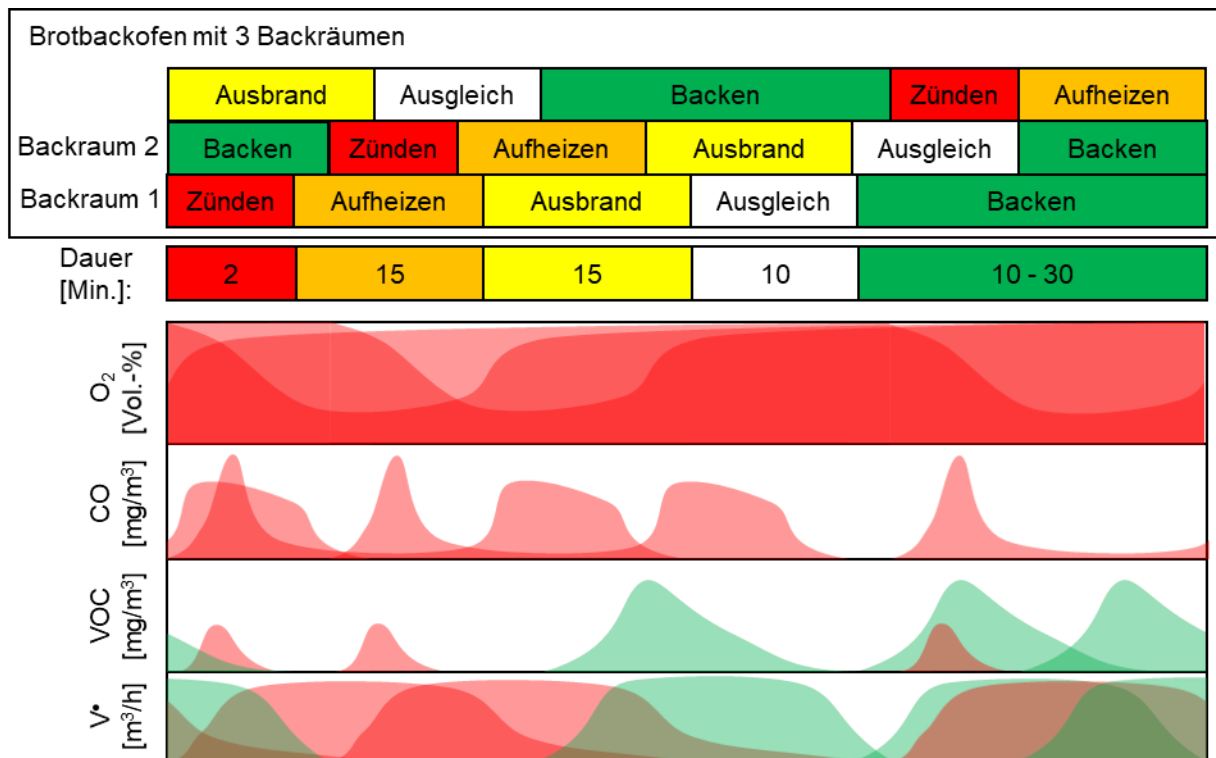


Bild 7 Oben: Schematisches Beispiel für den zeitlichen Betriebsablauf in einem Brotbackofen mit drei individuell betriebenen Backräumen.
 Unten: Verlauf von O₂, Emissionen (CO, VOC) sowie der Volumenströme (V*) des Abgases der Holzverbrennung (rot) und der Abluft des Backprozesses (grün). Die Verläufe sind Praxismessungen nachempfunden, die Volumenströme von Abgas und Abluft, sowie VOC der Holzfeuerung und der Ethanolgehalt der Abluft wurden jedoch nicht gemessen, weshalb deren Verlauf abgeschätzt ist.

Der Verlauf der Emissionen in Bild 7 ist demjenigen einer Praxismessung an mehreren automatisierten Brotbacköfen in einer Grossbäckerei während rund drei Stunden nachempfunden [5]. Die einzelnen Backöfen verfügen über je drei Backräume und haben eine Feuerungswärmeleistung von je rund 500 kW. Die Aufheizphase mit den Pelletbrennern dauerte dabei teilweise weniger als 15 Minuten. Die O₂-Konzentration betrug während 12 Messungen, während jeweils 15 Minuten, zwischen 17.0 und 20.8 Vol.-% bei einem Mittelwert von 18.9 Vol.-%. Die O₂-Konzentration erreichte nur bei vier von 12 Messungen Werte unter 18 Vol.-%. Bei sieben von 12 Messungen lag die O₂-Konzentration unter 19 Vol.-% und bei acht von 12 Messungen unter 20 Vol.-%. Die mittlere CO-Konzentration von allen 12 Messungen betrug 1'500 mg/m³ bezogen auf 13 Vol.-% O₂. Die Feststoffkonzentration lag zwischen 60 und 70 mg/m³ bezogen auf 13 Vol.-% O₂, wobei eine Begrenzung auf Messwerte mit O₂-Konzentrationen kleiner 18 Vol.-% keine wesentliche Änderung ergab.

4 Emissionen

4.1 Zusammensetzung

Das Abgas von Brotbacköfen und Pizzaöfen setzt sich aus dem Abgas mit den Schadstoffemissionen der Holzverbrennung und der Abluft des Backprozesses mit den vom Backgut freigesetzten Emissionen zusammen. Die zwei Gasströme werden über eine gemeinsame Abgasleitung in die Umgebung geleitet. Die Phasen mit den jeweils grössten Massenströmen von Abgas und Abluft fallen aber nicht gleichzeitig an (Bild 3 bis Bild 5). Im Kamin von automatisierten Backöfen mit mehreren autonomen Backräumen können sich hohe Massenströme von Abgas und Abluft jedoch überlagern, da die Abgasströme der Backräume im Backofen zusammengeführt werden (Bild 7).

Zum Backen von 1 kg Brot wird 0.3 bis 1.5 kWh Wärme benötigt [6], was abhängig vom Backofen 85 bis 445 g Holz entspricht. Aus der Verbrennung von 85 g Pellets entsteht rund 145 g Abgas, wovon 135 g CO₂ sind (Tabelle 2). Während des Backvorgangs entweicht Wasserdampf aus dem Backgut, dadurch verliert Brot zum Beispiel rund 10 – 20 % seines Gewichts [7]. Zusätzlich wird zum Teil Wasserdampf für den Backprozess in den Backraum eingedüst. Damit dominiert Wasserdampf den Massenstrom der Abluft während des Backprozesses mit 90 bis 150 g/kg Brot (Tabelle 2). In einem energieeffizienten Backofen kann Wasserdampf bis zu 52 % des Massenstroms des gemeinsamen Abgases im Kamin ausmachen.

Tabelle 2 Beispiele zu den Emissionen beim Backen von 1 kg Brot unter Einsatz von 85 g Holzpellets in einem automatisierten Backofen und 445 g Stückholz in einem handbeschickten Backofen. Die prozentuale Angabe zum Anteil der Abluft bezieht sich auf die Summe aus Abgas und Abluft von der jeweiligen Komponente.

n.b.: nicht bekannt

a) Daten nach NIP Australien [9]. Für Ethanol gibt die Studie EPA USA [10] 0.5 – 8 g / kg an.

b) Die Zahlen entsprechen dem prozentualen Anteil von Wasserdampf im gesamten Massenstrom.

	Abgas Pellets¹ [g / kg Brot]	Abgas Stückholz² [g / kg Brot]	Abluft [g / kg Brot]	Anteil der Abluft an der Gesamtmenge
Wasserdampf	10	111	90 – 150	45 % – 94 %
CO ₂	132	662	n.b.	n.b.
Ethanol	–	–	0.83 ^{a)}	> 99 %
gesamt VOC	0.01	2.88	0.832 ^{a)}	22 % – 90 %
CO	0.22	28.80	n.b.	n.b.
NO _x	0.09	0.50	0	0 %
Feststoff	0.06	1.44	0	0 %
Total	142.38	806.62	91 – 151	10 % – 52 % ^{b)}

¹ Annahmen Pellets: Gesamtwirkungsgrad 75 %, Energieinhalt 4.8 kWh/kg, Wassergehalt: 11 %. Emissionsfaktoren [8]: CO₂: 92 g/MJ, CO: 150 mg/MJ, VOC: 5 mg/MJ, NO_x: 60 mg/MJ, Feststoff: 40 mg/MJ

² Annahmen Stückholz: Gesamtwirkungsgrad 75 %, Energieinhalt 4.5 kWh/kg, Wassergehalt: 25 %. Emissionsfaktoren [8]: CO₂: 92 g/MJ, CO: 4'000 mg/MJ, VOC: 400 mg/MJ, NO_x: 70 mg/MJ, Feststoff: 200 mg/MJ

4.2 Abgas der Holzverbrennung

Wenn Holzbacköfen sachgerecht befeuert werden, ist im warmen Zustand ein emissionsarmer Betrieb möglich. Während des Zündens, im Ausbrand, während des Schürens und beim Nachlegen sind höhere Emissionen dagegen unvermeidlich. Um störende Geruchs- (VOC) und Russemissionen zu minimieren ist es wichtig, dass diese Phasen kurz gehalten werden (siehe Kapitel 6). CO-Spitzen, die während des Zündens und Ausbrands möglich sind, bedeuten aber nicht zwingend, dass diese Phasen in Bezug auf VOC und Russ kritisch sind. Umgekehrt sind in allen Phasen auch Betriebszustände mit tiefer CO-Konzentration aber hohen VOC- oder Russemissionen möglich. So kann zum Beispiel bei zu viel Verbrennungsluft ein ausgeprägtes Mitreissen von Brennstoff- und Glutpartikeln aus dem Brennstoffbett zu Bedingungen mit hohen sichtbaren Grobstaubemissionen bei tiefen CO-Konzentrationen führen (was teilweise als Flockenruss bezeichnet wird). VOC aus der Holzverbrennung umfassen zahlreiche verschiedene Verbindungen (z.B. Methan, Methanol, Benzen) und unterscheiden sich damit von den VOC aus der im nachfolgenden Kapitel 4.3 beschriebenen Abluft des Backguts. Die häufigste Ursache für erhöhte Emissionen sind unsachgemässes Anfeuern, Schüren und Nachlegen von Holz auf die Grundglut. Bei Backöfen ohne separate Brennkammer ist ein emissionsarmer Betrieb durch die optimale Einstellung der Luftzufuhr anspruchsvoll und oft wird nicht genügend Sekundärluft zugeführt [3]. Bei Backöfen mit separater Brennkammer können die Lufteinstellungen dagegen einfacher optimiert werden und ein emissionsarmer Betrieb kann meistens erreicht werden. Weitere Massnahmen für einen emissionsarmen Feuerungsbetrieb werden in Kapitel 6 beschreiben.

4.3 Abluft des Backguts

Tabelle 2 zeigt, dass neben Wasserdampf auch VOC-Emissionen in der Abluft des Backprozesses zu finden sind. Diese bestehen hauptsächlich aus Ethanol, das während der Fermentation der Hefe entsteht [11]. Die Emissionen treten zum grössten Teil während des Backvorgangs auf (Bild 5). Werden bei einer Emissionsmessung auch VOC im Abgas gemessen, ist deshalb der Einfluss des Backguts zu berücksichtigen. Für eine korrekte Messung der VOC mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) sind die unterschiedlichen Kalibrierfaktoren von Abgas und Abluft zu berücksichtigen.

Zu CO- und CO₂-Emissionen des Backprozesses sind keine Literaturangaben zu finden. Da aus Fettsäuren CO gebildet werden kann, sind messbare Emissionen an CO und CO₂ in der Abluft wahrscheinlich. Im Verhältnis zu den CO-Emissionen des Abgases sind die entsprechenden Frachten aber vernachlässigbar.

5 Emissionsmessung

5.1 Standardmessverfahren

Zur Überprüfung der Emissionsgrenzwerte schreibt die LRV Messungen nach den anerkannten Regeln der Messtechnik vor, die in den Messempfehlungen des BAFU festgehalten sind und das Vorgehen für mehrere Kategorien von Holzfeuerungen beschreiben [1], [2]. Aus den Beschreibungen der Messempfehlungen kann aber gefolgert werden, dass bei all diesen Kategorien Heizkessel oder Einzelraumfeuerungen gemeint sind.

Bei handbeschickten Feuerungen wird ein Abbrand nach einem Kaltstart geprüft (Tabelle 3). Die Messung beginnt bei handbeschickten Feuerungen in der Regel 15 Minuten nach dem Zünden, bei Holz-mengen kleiner 4 kg jedoch bereits nach 5 Minuten. Bei automatischen Feuerungen muss im Auto-matikbetrieb gemessen werden und die Messung kann starten, sobald die Feuerung die Betriebs-temperatur erreicht hat.

Die Messdauer richtet sich nach dem Feuerungstyp, wobei üblicherweise mehrere Einzelmessungen von je 15 Minuten durchgeführt und daraus Mittelwerte gebildet werden. Der Unterbruch zwischen zwei Messungen sollte dabei höchstens 5 Minuten betragen [2]. Wird dreimal 15 Minuten gemessen, sind daraus zwei Halbstundenmittelwerte zu bilden, welche beide den Grenzwert einhalten müssen. Die Messung wird nach Ablauf der Messdauer oder beim Einsetzen des Ausbrandes beendet. Dieser ist optisch dadurch definiert, dass kaum mehr Flammen sichtbar sind [2]. Messtechnisch wird die Messung meist bei O₂-Konzentrationen über 18 Vol.-% abgebrochen.

Tabelle 3 Unterschiede und Anwendung von Varianten von standardisierten Emissionsmessungen nach Mess-empfehlung BAFU [1], [2] und der EN 12815.

	Emissions-Messempfehlungen BAFU für Holzfeuerungen		Prüfnorm für Herde nach EN 12815
Anlagentyp	handbeschickt	automatisch	handbeschickt
Prüfbetrieb	Kaltstart	Betriebswarm	Betriebswarm
Start	Holz <4 kg: 5 Minuten nach Zündung Holz >4 kg: 15 Minuten nach Zündung	Automatikbetrieb	Direkt nach dem Nachlegen auf Grundglut
Messdauer	Einzelraumfeuerung [2]: 15 Minuten Heizkessel < 70 kW [2]: 30 Minuten Heizkessel > 70 kW [1]: 45 Minuten		mindestens 60 Minuten
Abbruch	Messdauer erreicht oder O ₂ > 18 Vol.-% seltener angewendete Kriterien [2]: CO ₂ < 2.5 Vol.-% oder sinkende Abgastemperatur		nach Erreichen der Grundglut

Die EN 12815 beschreibt die Typenprüfung für handbeschickte (Koch-) Herde im häuslichen Bereich, die in der Regel getrennte Brenn- und Backräume haben. In diesem Prüfverfahren wird während der Leistungsprüfung bei normalen Betriebsbedingungen eine mittlere CO-Konzentration bestimmt. Dazu wird der Herd zuerst aufgeheizt und Grundglut erzeugt. Die Emissionsmessung dieser Prüfung startet unmittelbar nach dem Auflegen von Holz auf die Grundglut. Die minimale Messdauer in diesem Prüfzyklus ist mit einer Stunde vorgeschrieben. Die Emissionsmessung wird abgebrochen, sobald in der Brennkammer wieder eine Grundglut erreicht wird.

Werden während der Messung Einstellungen verändert, muss gemäss den Messempfehlungen des BAFU und auch gemäss EN 12815 die Messung wiederholt werden.

5.2 Einschränkungen der Standardmessverfahren

Die Beispiele aus Kapitel 3 zeigen, dass standardisierte Emissionsmessungen nach den Messempfehlungen des BAFU aus folgenden Gründen teilweise nicht oder nur schwierig durchführbar sind:

- Die O₂-Konzentration im Kamin ist teilweise auch während des Feuerungsbetriebs so hoch, dass die Definition für das Ende des Feuerungsbetriebs anhand des O₂-Schwellenwerts von 18 Vol.-% nicht anwendbar ist.
- Oft kann nicht genügend lange gemessen werden, weil die Betriebsphasen mit für Emissionsmessungen zulässigen Bedingungen zu kurz sind.
- In automatisierten Backöfen mit mehreren autonom befeuerten Backräumen werden die einzelnen Backräume in der Regel nicht gleichzeitig mit Backgut beschickt, sodass sich die Betriebsphasen der Backräume überlagern. Eine Emissionsmessung im Kamin erfasst dann das aus mehreren Backräumen zusammengeführte Abgas. Eine Zuordnung zu den einzelnen Backräumen und deren Betriebsphasen ist deshalb nicht möglich.
- Die höchsten Emissionen von Holzbacköfen treten oft während Betriebsphasen auf, die nicht in der standardisierten Emissionsmessung berücksichtigt werden.

Die Messempfehlungen des BAFU definieren einen O₂-Schwellenwert von 18 Vol.-% als Abbruchkriterium. Dieser Schwellenwert wurde festgelegt, um das Ende des Feuerungsbetriebs zu definieren und die Messunsicherheit zu begrenzen (Bild 8). Praxismessungen zeigen jedoch, dass dieser Schwellenwert für Holzbacköfen ungeeignet ist, um das Ende des Feuerungsbetriebs zu definieren, da die O₂-Konzentration während des Feuerungsbetriebs oft nur unwesentlich unter diesem Schwellenwert oder gar darüber liegt. Für Emissionsmessungen während des gesamten Feuerungsbetriebs von Holzbacköfen muss deshalb teilweise auch bei O₂-Konzentration über 18 Vol.-% gemessen werden.

In Anhang 3 LRV sind für gewerblich Holzbacköfen spezifische EGW festgelegt. Es ist deshalb nicht zulässig die vorsorglichen Emissionsbegrenzungen nach Anhang 1 LRV anzuwenden, um eine Normierung auf die Bezugs O₂-Konzentration zu vermeiden. Mit Anhang 1 LRV könnte zudem nur der Verzicht auf die Anwendung von EGW begründet werden, da die definierten Schwellenwerte für die Massenströme auch in grossen Bäckereien in der Regel deutlich unterschritten werden. Der Schwellenwert für den Massenstrom des Feststoffs wurde bei Praxismessungen zum Beispiel um mehr als das 10-fache unterschritten [3]. Wie in Kapitel 2 ausgeführt wird, darf Anhang 1 LRV ausschliesslich zur Beurteilung der VOC-Emissionen der Abluft verwendet werden.

Wie Bild 8 zeigt, ist mit präzisen O₂- oder CO₂-Messgeräten bis zu O₂-Konzentrationen von 20 Vol.-% eine Messunsicherheit kleiner 20 % möglich, sodass dadurch der effektive EGW zugunsten des Betreibers von 4'000 mg/m³ auf 4'800 mg/m³ steigt. Diese Erhöhung ist im Vergleich zu 4'400 mg/m³ bei der üblichen Messunsicherheit von 10 % moderat. Da die Messunsicherheit mit zunehmender O₂-Konzentration exponentiell steigt, sollte der Schwellwert jedoch nur soweit wie nötig erhöht werden. Zudem ist ein Schwellenwert notwendig, da Messungen nur während des Feuerungsbetriebs sinnvoll sind. Die in Kapitel 3 beschriebenen Praxismessungen haben gezeigt, dass mit einem O₂-Schwellenwert zwischen 19 und 20 Vol.-% als Abbruchkriterium der beurteilbare Anteil des Feuerungsbetriebs im Vergleich zu 18 % O₂ deutlich verlängert werden kann.

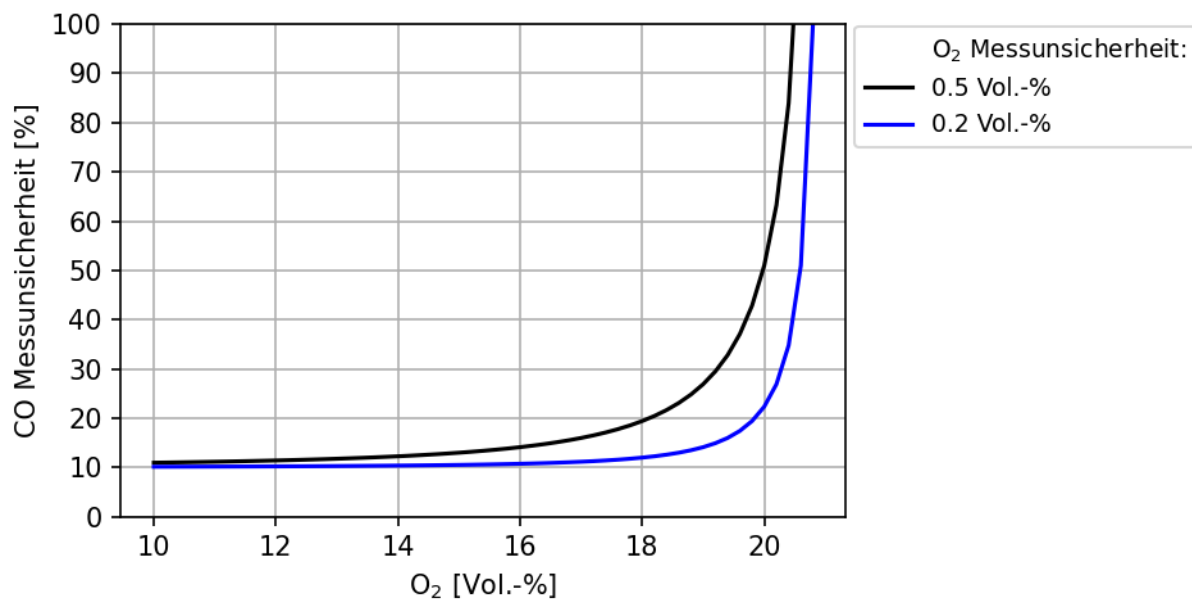


Bild 8 Messunsicherheit der auf O₂-Bezug normierten CO-Konzentration in Funktion der O₂-Konzentration für zwei unterschiedliche O₂-Messunsicherheiten. Die Berechnung basiert auf der Formel aus der Messempfehlung des BAFU [1].

5.3 Emissionsmessung unter Berücksichtigung von Nachlegen

Das Nachlegen von Holz kann bei Holzbacköfen mit separater Brennkammer und bei Pizzabacköfen zu erheblichen Emissionen führen, vor allem bei unsachgemäßem Betrieb zum Beispiel bei zu spätem Nachlegen oder beim Nachlegen von zu grossen Holzmengen, wie das in Kapitel 3.3 beschriebene Praxisbeispiel zeigt. Bei handbeschickten Holzbacköfen gehört das mehrfache Nachlegen von Holz zum üblichen Backbetrieb. Mit einem verlängerten Messverfahren in Anlehnung an die EN 12815 kann die Betriebsphase mit Nachlegen von Holz miterfasst werden. Spätestens wenn die O₂-Konzentration das Abbruchkriterium erreicht hat, wird die Messung unterbrochen. Das Nachlegen von Holz erfolgt gemäss Betriebsanleitung oder gemäss dem üblichen Betriebsablauf. Entsprechend der EN 12815 ist die nachfolgende Messung jeweils unmittelbar nach dem Nachlegen des Holzes zu starten.

Bei Brotbacköfen ohne separate Brennkammer wird die Glut vor dem Backen vollständig aus dem Backraum entfernt. Bei diesen Backöfen ist deshalb nach dem Backen kein Nachlegen von Holz auf Glut möglich.

5.4 Messung von Betriebszyklen bei Backöfen mit mehreren autonomen Backräumen

Im Normalbetrieb von automatisierten Holzbacköfen mit mehreren autonomen Backräumen können die einzelnen Betriebsphasen im gemeinsamen Abgas nicht unterschieden werden (Bild 7). Ohne Unterbrechung des regulären Backbetriebs sind bei diesen Backöfen deshalb nur Messungen von Betriebszyklen möglich und es können nur deren mittlere Emissionen beurteilt werden. Dies ist im Einklang mit der Messempfehlung des BAFU, welche im Kapitel zur Beurteilung von Emissionsmessungen erläutert, dass Grenzwerte der LRV grundsätzlich für sämtliche üblichen Betriebszustände gelten [1], ausser zum Beispiel für Holzheizungen (siehe Kapitel 5.1), für welche in der LRV abweichende Vorgaben festgelegt wurden. Demzufolge sind diejenigen Betriebszustände zu messen, welche üblicherweise die höchsten Emissionen aufweisen. Als Beispiel werden Stundenmittelwerte des Vollastbetriebs oder von Betriebszyklen aufgelistet.

Bei der Emissionsmessung von Backöfen mit mehreren autonomen Backräumen ist die Messdauer somit so zu wählen, dass die durchschnittlichen Emissionen eines typischen Arbeitstags bestimmt werden können [1]. Dies bedeutet, dass von jedem Backraum der betrieblichen Einheit mindestens eine vollständige Aufheizphase durchlaufen werden muss, was beim Beispiel in Bild 7 rund eine Stunde dauert. Damit aber eine Messung möglich ist, muss der O₂-Schwellenwert wie in Kapitel 5.2 beschrieben zwingend angehoben werden.

5.5 Anwendbarkeit und Bewertung der Messverfahren

Tabelle 4 gibt einen Überblick und eine Bewertung zur Anwendbarkeit der beschriebenen Messverfahren auf die verschiedenen Kategorien von Holzbacköfen. Basierend auf den wenigen verfügbaren Praxismessungen kann aber nicht abschliessend beurteilt werden, welches der oben beschriebenen Messverfahren für eine Kategorie tatsächlich am besten geeignet ist.

Emissionsmessungen gemäss Messempfehlungen des BAFU während mindestens 15 Minuten sind bei allen Kategorien grundsätzlich möglich. Bei automatisierten Backöfen mit mehreren autonomen Backräumen müsste dafür allerdings der Backprozess unterbrochen und jeder Backraum in einem manuellen Betriebsmodus einzeln gemessen werden. Dies ist jedoch kaum zweckmässig da kein Bezug zum Praxisbetrieb besteht. Die in Kapitel 5.2 beschriebene Anhebung des O₂-Schwellenwerts ist für diese Messungen nicht zwingend notwendig, kann aber die Zeitspanne für Messungen deutlich verlängern.

Emissionsmessungen unter Berücksichtigung von Abbränden, in denen Holz nachgelegt wird, erweitern bei allen handbeschickten Backöfen die Prüfung auf zusätzliche Betriebsphasen und ermöglichen zudem eine längere Messdauer. Die in Kapitel 3 beschriebenen Praxismessungen haben gezeigt, dass die Emissionen von handbeschickten Pizzabacköfen und Brotbacköfen mit separater Brennkammer während des Nachlegens von Holz und während des Schürens mindestens so hoch wie während des Aufheizens sein können. Eine Messung unter Berücksichtigung von Nachlegen, wie dies die EN 12815 für die Typenprüfung beschreibt, bilden bei handbeschickten Backöfen deshalb die Emissionen des Betriebs in der Praxis eher ab, als eine Messung gemäss Messempfehlung für Holzheizungen. Die in Kapitel 5.2 beschriebene Anhebung des O₂-Schwellenwerts ist dafür nicht zwingend notwendig, kann aber die Zeitspanne für Messungen deutlich verlängern.

Emissionsmessungen von Betriebszyklen ist bei automatisierten Backöfen mit mehreren autonom betriebenen Backräumen die beste Möglichkeit für eine Beurteilung nach LRV, da die einzelnen Betriebsphasen, wie in Kapitel 3.6 beschrieben, nicht unterschieden werden können. Die Messung von Betriebszyklen ist auch im Einklang mit den Erläuterungen der Messempfehlung des BAFU für Anlagen mit zyklischem Betriebsverhalten. Eine entsprechende Messung setzt jedoch die in Kapitel 5.2 beschriebene Anhebung des O₂-Schwellenwerts voraus. Bei handbeschickten Holzbacköfen ist dagegen die Messung von Betriebszyklen nicht zu empfehlen, da sowohl die Emissionen als auch der Volumenstrom diskontinuierlich sind. Durch die anteilmässig langen Ausbrandphasen mit hohen CO-Konzentrationen und geringem Volumenstrom ist eine aussagekräftige Mittelwertbildung von Schadstoffkonzentrationen mit den für Praxismessungen verfügbaren Messvorrichtungen nicht möglich.

Durch die Normierung auf eine Bezugs O₂-Konzentration und trockenes Abgas wird der Einfluss der Abluft des Backprozesses auf die CO- und Feststoffmesswerte kompensiert. Deshalb muss der Backprozess bei keinem der beschriebenen Messverfahren unterbrochen oder geändert werden.

Tabelle 4 Anwendung von Messvarianten auf die unterschiedlichen Typen von Holzbacköfen. Die Angaben zu den typischen O₂-Konzentrationen stammen von verfügbaren Praxismessungen [3], [4], [5].
+: geeignet, ++ gut geeignet, – nicht möglich.

	Pizzabackofen	Brotbackofen		
	handbeschickt	ohne separate Brennkammer	mit separater Brennkammer	mehrere autonome Backräume
typische O ₂ -Konzentraion				
Aufheizen	< 16 Vol.-%	< 16 Vol.-%	< 16 Vol.-%	16 – 21 Vol.-%
Nachlegen	16 – 21 Vol.-%	< 18 Vol.-%	< 18 Vol.-%	
Emissionsmessung				
Messempfehlung BAFU	+	+	+	–
Messung mit Nachlegen	++	++	++	–
Messung von Betriebszyklen	–	–	–	++

6 Massnahmen zur Emissionsminderung

6.1 Verbrennungsoptimierung

Werden zu hohe Emissionen festgestellt oder liegen Klagen aufgrund von Geruchs- (VOC) und Grobstaubemissionen vor, sind in einem ersten Schritt Primärmassnahmen zu prüfen, nämlich:

- Brennstoff kontrollieren und geeignete Qualität sicherstellen, insbesondere Wassergehalt und Stückerigkeit (in der Regel ausschliesslich trockenes Stückholz geeigneter Grösse)
- Betrieb kontrollieren und Verbrennungsbedingungen optimieren.

Bei handbeschickten Backöfen hat die Betriebsweise einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Emissionen. Unter anderem sind folgende Massnahmen möglich, die auch in Merkblättern zum Betrieb von handbeschickten Holzbacköfen beschrieben werden [12]:

- Korrektes Anfeuern mit geeigneter Holzmenge und Luftzufuhr, damit das Holz schnell zündet.
- Korrektes Nachlegen einer nicht zu grossen Menge Holz auf ein ausreichend grosses Glutbett, sobald keine Flammen mehr sichtbar sind, damit das neue Holz schnell zündet.
- Luftzufuhr erst nach Beenden der Aufheizphase drosseln. Die Luftzufuhr darf nur zur Verhinderung des Auskühlens vom Backraum während des Backprozesses gedrosselt werden.

Auch bei mit Pellets befeuerten Backöfen ist ein geeigneter Betrieb sicher zu stellen. Die Verbrennungsoptimierung hat meist durch den Lieferanten zu erfolgen.

Sowohl für handbeschickte als auch für mit Pellets befeuerte Backöfen sind daneben folgende kaminseitigen Massnahmen zu prüfen:

- Überprüfung der Kaminauslegung und des Kaminzugs und evtl. Erhöhung des Kamins.
- Einbau eines Kaminventilators für einen erhöhten und geregelten Kaminzug.
- Einbau einer ausreichend gross dimensionierten Zugregelklappe und Sicherstellung einer korrekt funktionierenden Unterdruckregelung bzw. Nachrüsten einer solchen.

Kann bei handbeschickten Backöfen kein emissionsarmer Betrieb eingestellt werden, ist die Umstellung auf ein Gerät mit Pelletfeuerung oder eine Umrüstung auf Pelletbrenner in Betracht zu ziehen. In dicht besiedeltem Gebiet ist einem emissionsarmen Betrieb besonderes Gewicht beizumessen und deshalb bei Neubauten im Zweifelsfall ein mit Pellets befeuerter Backofen vorzuziehen.

6.2 Abgasnachbehandlung

Während der EGW für CO in der Regel eingehalten werden kann, ist die Einhaltung des EGW für Feststoffe von 50 mg/m³ für Backöfen grösser 70 kW teilweise nur mit Sekundärmassnahmen in Form einer Feinstaubabscheidung möglich. VOC-Emissionen in einem Ausmass, die zu störenden Gerüchen führen, können bei Holzbacköfen sowohl durch das Abgas der Verbrennung als auch durch die Abluft des Backprozesses auftreten, sodass ebenfalls Sekundärmassnahmen erwogen werden müssen. Es kommen hauptsächlich folgende Techniken infrage:

- Trocken-Elektroabscheider
- Gewebefilter
- Nasswäscher
- Kombinierte Verfahren, wie z.B. Abgaskondensation mit Nass-Elektroabscheidung.

Erfahrungen zum Einsatz von Elektroabscheidern und Gewebefiltern an automatisch befeuerten Backöfen mit Pelletbrennern sind bisher nicht öffentlich bekannt. Aufgrund der Eigenschaften des Abgases und der Stäube ist davon auszugehen, dass der Einsatz von Trocken-Elektroabscheidern und noch verstärkt von Gewebefiltern anspruchsvoll und störungsanfällig, sowie teilweise nur beschränkt wirksam ist. Gründe dafür sind:

- der hohe Wasserdampfanteil aus der Abluft des Backprozesses
- die hohe O₂-Konzentration
- die teilweise tiefe Abgastemperatur

Bei handbeschickten Backöfen wird der Betrieb von Feinstaubabscheidern zusätzlich erschwert, da während des Anfeuerns keine vollständige Verbrennung erreicht wird und für den Betrieb von Elektroabscheidern und Gewebefiltern ungeeignete Teer- und Russ-Emissionen auftreten können. Störende Grobstaub-Emissionen sind nachträglich schwer zu reduzieren, da Russ aufgrund der physikalischen Eigenschaften dazu neigt, in einem Elektroabscheider entweder gar nicht abgeschieden zu werden oder Flocken zu bilden, was störende Emissionen und Ablagerungen in der Umgebung noch verstärken kann. Da verschiedene Arten von Grobstaub eine sehr geringe Dichte aufweisen können, ist eine zuverlässige Abscheidung auch mit einem Zyklon nicht immer möglich. Teer hingegen kann unter anderem zu Verklebungen von Elektroabscheidern oder Gewebefiltern führen. Für Gewebefilter wären zudem in gewissen Betriebsphasen mögliche Funken hinderlich.

Für den Einsatz von Nasswäschern sind die Erwartungen widersprüchlich. Da Staub aus der Holzverbrennung in der Regel hydrophob ist (Asche und Kohlenstoff), ist nur eine begrenzte Abscheidewirkung durch eine reine Nasswäsche zu erwarten. Bei einer Pizzeria wurden dennoch störende Grobstaubemissionen mit einem Nasswäscher zur Zufriedenheit von Behörden und Betreiber reduziert [4]. Es ist denkbar, dass im Nasswäscher verschiedene Effekte wirken und unter anderem auch eine Schwerkraftabscheidung wie in einer Absetzkammer oder einem Zyklon stattfindet. Beim Einsatz von Nasswäschern ist allerdings die Forderung des Fachverbands für Wasser in der Schweiz (VSA) zu beachten, dass Filterstaub von Holzfeuerungen nicht in die Kanalisation eingeleitet werden darf [13]. Aus diesen Gründen ist der Einsatz von Nasswäschern im Einzelfall zu prüfen und eine korrekte Entsorgung des aus dem Wäscher anfallenden Abwassers und Schlamms sicher zu stellen.

Die Abscheidung von VOC ist insbesondere durch Abgaskondensation und Nass-Elektroabscheidung möglich. Diese Verfahren sind jedoch aufwändig und kommen daher nur für grosse Leistungen zum Einsatz. Nasswäscher können Geruchsstoffe nur teilweise reduzieren, da nicht alle VOC wasserlöslich sind. Für eine oxidative Umwandlung der VOC ist das Abgas von Holzbacköfen ebenfalls schlecht geeignet, da die thermische Nachverbrennung einen hohen Energieverbrauch hat und der VOC-Gehalt für eine regenerative Nachverbrennung zu gering ist. Die katalytische Nachverbrennung und Aktivkohlefilter werden durch Feststoff im Abgas der Holzverbrennung beeinträchtigt, so dass auch dies Verfahren aus technischer und wirtschaftlicher Sicht bei Holzbacköfen ungeeignet sind.

7 Literatur

- [1] BAFU 2013: Emissionsmessung bei stationären Anlagen. Emissions-Messempfehlungen. 1. Aktualisierte Fassung vom Dezember 2018. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1320: 155 S.
- [2] BAFU 2018: Emissionsmessung bei Feuerungen für Öl, Gas und Holz. Messempfehlungen Feuerungen. Bundesamt für Umwelt, Bern. 2. Aktualisierte Ausgabe, Dezember 2018; Erstausgabe 2013. Umwelt-Vollzug Nr. 1319: 35 S.
- [3] Nicht öffentlich zugängliche Langzeitmessung von QS-Support Holzfeuerungen in einem Klagefall
- [4] Nicht öffentlich zugängliche Emissionsmessungen von kantonalen Vollzugsbehörden in Klagefällen
- [5] Nicht öffentlich zugängliche orientierende Emissionsmessung einer kantonalen Vollzugsbehörde
- [6] <https://energie.ch/baeckerei/>, Stand Mai 2020
- [7] Pauli, Philip, and Schudel, Walter. Lehrbuch Der Küche: Für Theorie Und Praxis Der Modernen Koch- Und Küchentechnik. 13. Aufl., Nachdr. ed. 2010.
- [8] BAFU 2015: Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [9] NPI, 2003, www.npi.gov.au/system/files/resources/db657a28-570a-41f4-49cc-a387af89bf3d/files/bakery.pdf, Stand Mai 2020
- [10] EPA, 1992, VOC Emissions from Bakeries, www3.epa.gov/ttn/chief/old/efdocs/bakeries_apr1992.pdf, Stand Mai 2020
- [11] EPA, 2003, Alternative Control Technology Document for Bakery Oven Emissions, www3.epa.gov/airquality/ctg_act/199212_voc_epa453_r-92-017_bakery_ovens.pdf, Stand Mai 2020
- [12] Lufthygieneamt beider Basel, 2018, Merkblätter zu Holzbacköfen und Pizzaöfen, www.baselland.ch/politik-und-behorden/direktionen/bau-und-umweltschutzdirektion/lufthygiene/lufthygiene/feuerungskontrolle-gemeinden-bl/holzfeuerungen, Stand Mai 2020
- [13] VSA-Empfehlung, 2015, Selbstreinigende Feinstaubfilter für Holzfeuerungen, <https://vsashop.ch/img/~490/15/03.pdf?xet=1444913208000>, Stand Mai 2020