

**„Steuerung und Auslegung von
Verbrennungsprozessen in
Einäscherungsanlagen“**

AZ: 19512-02





INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	3
1.1	Ergebnisse der 1. Projektphase	3
1.2	Untersuchungsziele 2. Projektphase	5
2	Durchführung der Untersuchungen	6
2.1	Einbezogene Einäscherungsanlagen	6
2.2	Vergleich der Einäscherungsöfen	6
2.2.1	Technische Ausstattung	6
2.2.2	Matrixsteuerung und -regulierung	8
2.2.3	Luftzuführung	10
2.3	Messtechnische Durchführung	12
2.3.1	Messaufbau	12
3	Untersuchungsergebnisse	16
3.1	Auswirkung des geänderten Luftmanagementsystems auf den Einäscherungsprozess	16
3.1.1	Einfluss der Zusatzgebläse auf die Einäscherung	17
3.1.2	Einfluss der Steuerung auf den Einäscherungsverlauf	19
3.2	Auswirkung des geänderten Luftmanagementsystems auf die ausgewiesenen CO-Konzentrationen	20
3.2.1	Eingesetzte Messgeräte	20
3.2.2	CO-Grenzwertüberschreitungen	22
3.3	Auswirkung des geänderten Luftmanagementsystems auf den Gasverbrauch	23
4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Öffentlichkeitsarbeit	25
4.1	Zusammenfassung	25
4.2	Öffentlichkeitsarbeit	26

1 Einleitung

1.1 Ergebnisse der 1. Projektphase

Im Zeitraum von 2005 - 2006 wurde ein Projekt zum Thema: „Verfahrenstechnische Untersuchung zur Optimierung von Verbrennungsprozessen in Anlagen zur Feuerbestattung“ (DBU-AZ: 19512) durchgeführt.

Folgende wesentlichen Erkenntnisse wurden gewonnen:

1. An den untersuchten Einäscherungsanlagen wurde festgestellt, dass der überwiegende Anteil an massiven CO-Grenzwertüberschreitungen auf eine unzureichende Steuerung der Luftzuführung zurückgeführt werden kann. Im Normalbetrieb sind ein Einfluss von Gewicht, Alter, Geschlecht, Sargbeigaben und Sarglackierung sowie die Dauer der Einäscherung auf erhöhte Kohlenmonoxid-Emissionen nicht gegeben. Ausnahmen wurden bei Einäscherungen mit adipösen Verstorbenen beobachtet, die nicht in die allgemeine Bewertung eingehen.
2. Entscheidend für die Entstehung der Kohlenmonoxid-Emission ist die Luftzufuhr in der Haupt- und Nachbrennkammer bis zum Abschluss der Hauptverbrennungsphase nach ca. 45 Minuten. Durch Änderung bestehender Steuerungssysteme ist eine Minimierung der CO-Emission möglich. Wichtig dabei ist der erkannte Zusammenhang zwischen der Sauerstoffkonzentration im Rohgas und der notwendigen Luftzufuhr in die Haupt- und Nachbrennkammer.
3. Die Minimierung der CO-Emissionen ist dabei grundsätzlich an allen gasbetriebenen Ofentypen möglich. Dabei ist es unerheblich, welches Verbrennungskonzept vom Hersteller vorgesehen ist.

4. Bei Elektroöfen ist aufgrund der realisierten Energiezuführung nur eine Verbrennung in der Hauptbrennkammer zu beobachten. Ein gezielter Einfluss auf die Nachverbrennung ist somit nicht gegeben. Weiterhin trägt die geringere zulässige Nachbrenntemperatur (z. T. nur 700 °C) nicht zu einer effektiven CO-Minimierung bei.
5. Bestehende gasbetriebene Anlagen können durch eine Veränderung der Steuerung optimiert werden. Dazu zählen wir:
 - Eine komplexe Verknüpfung von Lüftungsklappen in der Haupt- und Nachbrennkammer in Abhängigkeit von der O₂-Konzentration im Rohgas sowie
 - die Einführung einer Plausibilitätskontrolle der O₂-Rohgasmessung durch einen Vergleich mit der O₂-Reingasmessung
6. Eine Optimierung bestehender gasbetriebener Anlagen ist nicht durch die Übernahme pauschaler Vorgaben zur Klappensteuerung und O₂-Regelung möglich. Die Umsetzung ist jeweils dem Ofentyp und Verbrennungskonzept anzupassen. Die festgestellten Einflussgrößen sind unabhängig vom Ofentyp.
7. Eine Einführung einer Plausibilitätsprüfung der O₂-Rohgasmessung führt zu einer zuverlässigeren Steuerung der Luftzuführung und trägt somit zu einer stabileren Fahrweise der Öfen bei.

1.2 Untersuchungsziele 2. Projektphase

Da einerseits in der 27. BImSchV die strenge Einhaltung des Grenzwertes für Kohlenmonoxid gefordert wird (gem. § 8 (3) darf kein CO-Mittelwert den Grenzwert von 50 mg/m³ übersteigen), im Gegensatz dazu aber u. E. nach viele Krematorien diese Forderung nicht erfüllen, ergab sich die Notwendigkeit, eine verfahrenstechnische Veränderung des Verbrennungsprozesses an Feuerbestattungsanlagen durchzuführen um die prozessbedingten Ursachen der erkannten CO-Entstehung zu vermeiden.

Gegenstand des Projektes war die technologische und verfahrenstechnische Verbesserung von Einäscherungsprozessen an einer bestehenden Einäscherungsanlage mit dem Ziel, die Steuerung der Verbrennung so zu realisieren, dass eine Minimierung der Kohlenmonoxidemissionen resultiert und die Grenzwertvorgabe der 27. BImSchV für CO sicher eingehalten wird.

In dem durchgeführten Projekt stand die Umsetzung folgender Schwerpunkte im Mittelpunkt:

1. Die Zuführung der Verbrennungsluft in die einzelnen Verbrennungszonen (Haupt- und Nachbrennkammer) werden unabhängig vom Haupt-Verbrennungsluftgebläse durch separate Gebläse realisiert. Jedes Gebläse wird separat angesteuert und liefert die benötigte Luftmenge unabhängig von anderen Bereichen.
2. Die Luftzuführung wird weiterhin über Klappen dosiert, die aber durch sog. „schnelle und dichtschießende Klappen“ ausgetauscht wurden. Es ist somit eine direkte und schnellere Luftzuführung als bisher möglich.
3. Als Steuergröße wird die O₂-Konzentration im Rohgas und die Temperatur in verschiedenen Brennzonen verwendet. Es wird wie bisher eine Zeitmatrix zur Steuerung herangezogen.
4. Die verwendeten Brenner werden durch Brenner ausgetauscht, die einen deutlich reduzierten Spülluftanteil (Falschluff) haben und eine geringere Zündzeit aufweisen.

2 Durchführung der Untersuchungen

2.1 Einbezogene Einäscherungsanlagen

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte im Zeitraum November 2007 bis November 2008 im Krematorium Hof. Dabei wurden nach der Realisierung des technischen Umbaus 1.977 Einäscherungen begleitet und in die Bewertung einbezogen. Dieser Zeitraum entspricht ca. 100 % der Jahreskapazität und kann somit als repräsentativ angesehen werden.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der 1. Projektphase wurde im Zuge der Neuausmauerung im Oktober 2007 die Ofentechnik des Krematoriums Hof verändert. Eine Gegenüberstellung der Ofentechnik zeigt, wie und in welchem Umfang Änderungen realisiert wurden, um das Ziel zur Bearbeitung der Problemstellung zu erreichen.

2.2 Vergleich der Einäscherungsöfen

2.2.1 Technische Ausstattung

Die technische Ausstattung ist in verschiedenen Bereichen des EinäscherungsOfens geändert worden. Dabei wurden die drei installierten Brenner der Fa. Weishaupt ausgetauscht, da diese bauartbedingt eine notwendig hohe Vorspülzeit aufweisen. Dadurch kam es zu einem relativ hohen Eintrag an unnötiger Verbrennungsluft (Falschluff). Die Vorspülzeit der alten Brenner betrug ausgehend von Stufe 0 (Brenner aus) auf Stufe 2 (Brenner Maximallast) etwa 90 Sekunden. Die neuen Brenner benötigen für die äquivalente Phase nur 10 Sekunden, das bedeutet, die maximale Leistung wird schneller erreicht und folglich sinkt auch der Anteil an Kühlluft, die in den Ofen eindringt. Weiterhin ist dadurch eine Optimierung der Schaltgrenzen - hauptsächlich im Bereich der Nachverbrennung - möglich geworden.

Vergleich der verwendeten Brenner vor und nach dem Umbau

Vergleichsmerkmal		Ofen alt	Ofen neu
Brenner HBK*:	Firma	Fa. Weishaupt	
	Modell	WG30N/1-A Ausführung Z	WG30N/1-C Ausführung ZM-LN
	Seriennummer	5326398	572099407
	Leistung	60-300 kW	40-350 (Hi) kW
	elektrische Leistung	0,69/0,58 kW	0,67/0,60 kW
	Vorspülzeit (Stufe 0 auf Stufe 2)	90 Sekunden	10 Sekunden
Brenner NBK**:	Firma	Fa. Weishaupt	
	Modell	G1/1-E Ausführung Z-LN	WM-G10/1-A Ausführung monarch®
	Seriennummer	5326478	5729444
	Leistung	60-335 kW	40-400 kW
	elektrische Leistung	0,84 kW	1,10 kW
	Vorspülzeit (Stufe 0 auf Stufe 2)	90 Sekunden	10 Sekunden
Brenner MK***:	Firma	Fa. Weishaupt	
	Modell	WG20N/0-A Ausführung Z-LN	WG10N/1-D Ausführung ZM-LN
	Seriennummer	5326212	572687107
	Leistung	25-90 kW	25-110 (Hi) kW
	elektrische Leistung	0,29/0,18 kW	0,33/0,17 kW
	Vorspülzeit (Stufe 0 auf Stufe 2)	90 Sekunden	10 Sekunden

*) Hauptbrennkammer

**) Nachbrennkammer

****) Mineralisierungskammer

Weiterhin erfolgte der Austausch der Verbrennungsluftklappen. Diese Klappen sind dafür zuständig, dass dem Ofen in verschiedenen Bereichen nach einer vorgegeben Matrix Verbrennungsluft zur Verfügung gestellt wird. Dabei werden die Luftklappen mit Hilfe der Systemmatrix gesteuert; sie sind jedoch auch manuell per Handsteuerung bedienbar. Die wichtigsten Klappen sind die der Haupt- und Nachbrennkammer. Die alten Luftklappen wurden ersetzt, da die Öffnungs- und Schließzeiten der Verbrennungsluftklappen für eine schnelle, dynamische und flexible Arbeitsweise des EinäscherungsOfens zu langsam waren. Um den maximalen Öffnungswinkel von 90° zu erreichen, war eine Zeit von 60 Sekunden notwendig. Die neuen, dicht schließenden Klappen benötigen zur Öffnung nur ein Zehntel der Zeit im Vergleich zu den alten Luftklappen, d. h. die Steuerung des Ofens kann somit einer Unterversorgung mit Verbrennungsluft fast in Echtzeit entgegen wirken.

2.2.2 Matrixsteuerung und -regulierung

Die vorhandene Steuerung (speicherprogrammierbare Steuerung) wurde so verändert, dass komplexe Einstellungen und Ablaufvorgänge, den Einäscherungsprozess betreffend, erstellt werden können.

Dabei wird der Prozessablauf dynamisch gesteuert und nicht wie in der alten Version, statisch. Statisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die alte Matrix hauptsächlich zeitbezogen in den Einäscherungsprozess eingegriffen hat.

Die dynamisch arbeitende Matrix basiert im Wesentlichen auf der alten, jedoch ist ihr Steuermechanismus an mehrere den Ofen betreffende Zustände gekoppelt.

Der Ablauf einer Einäscherung wird nun nicht mehr nur zeitabhängig gesteuert, sondern auch bestimmte Messsignale von Sauerstoffsensoren und Temperaturmessgeräten fließen in den Ablaufplan als Steuergröße mit ein.

Vergleich der Regelgrundlage der einzelnen Verbrennungsluftklappen beider Öfen

Art der Klappe	Matrix „alt“	Matrix „neu“
Oberluft	Zeitgeregelt	Sauerstoff-, Zeit- und Temperaturgeregelt
Seitenluft	Zeitgeregelt	Sauerstoff-, Zeit- und Temperaturgeregelt
Unterluft	Zeitgeregelt	Sauerstoff-, Zeit- und Temperaturgeregelt
NV1	Zeit- und Sauerstoffgeregelt	Sauerstoff-, Zeit- und Temperaturgeregelt
NV2	Zeit- und Sauerstoffgeregelt	Sauerstoff-, Zeit- und Temperaturgeregelt
NV3	Nicht vorhanden	Sauerstoff-, Zeit- und Temperaturgeregelt
Schutzluft	Sauerstoffgeregelt	Sauerstoff- und Temperaturgeregelt
Bemerkung	Regelung jeweils per Hand möglich	

Eine weitere Besonderheit der weiterentwickelten Software ist die Möglichkeit zur Einstellung von speziellen Betriebszuständen, wie z.B. kalter Ofen, 2-Schichtbetrieb, Sargtyp II (Leichnam schwerer als 100 kg), Aufheizen vom kalten Zustand sowie von weiteren Betriebsarten. Dadurch ist es gelungen, den Einäscherungssofen für jede Situation genau anzupassen, was dazu führt, dass der Einäscherungsverlauf optimiert wird und gleichzeitig die Ressourcen (z.B. Ausmauerung des Ofens, notwendiges Erdgas) geschont werden.

2.2.3 Luftzuführung

Die Nachverbrennungsklappen 1 und 2 sind nicht wie zuvor an die zentrale Verbrennungsluftleitung angeschlossen, sondern werden über ein separates Verbrennungsluftgebläse (Zusatzgebläse 1) mit Umgebungsluft gespeist. Dies gilt auch für die Schutzluft und die neu hinzugekommene Nachverbrennungsluftklappe 3 (Zusatzgebläse 2). Grund hierfür ist die Reduzierung der zur Verfügung stehenden Verbrennungsluft bzgl. der einzelnen Klappen in der zentralen Verbrennungsluftleitung bei gleichzeitig geöffneten Klappen der Hauptverbrennkammer und der Nachverbrennkammer. Die neue Aufteilung bietet also eine gleich bleibende Versorgung der einzelnen Zonen durch diese Klappen mit Verbrennungsluft und somit auch eine bessere Kontrolle über die Einäscherung.

Die folgende Abbildung stellt die betreffenden Komponenten für das Luftversorgungsmanagement des Etagenofens detailliert dar.

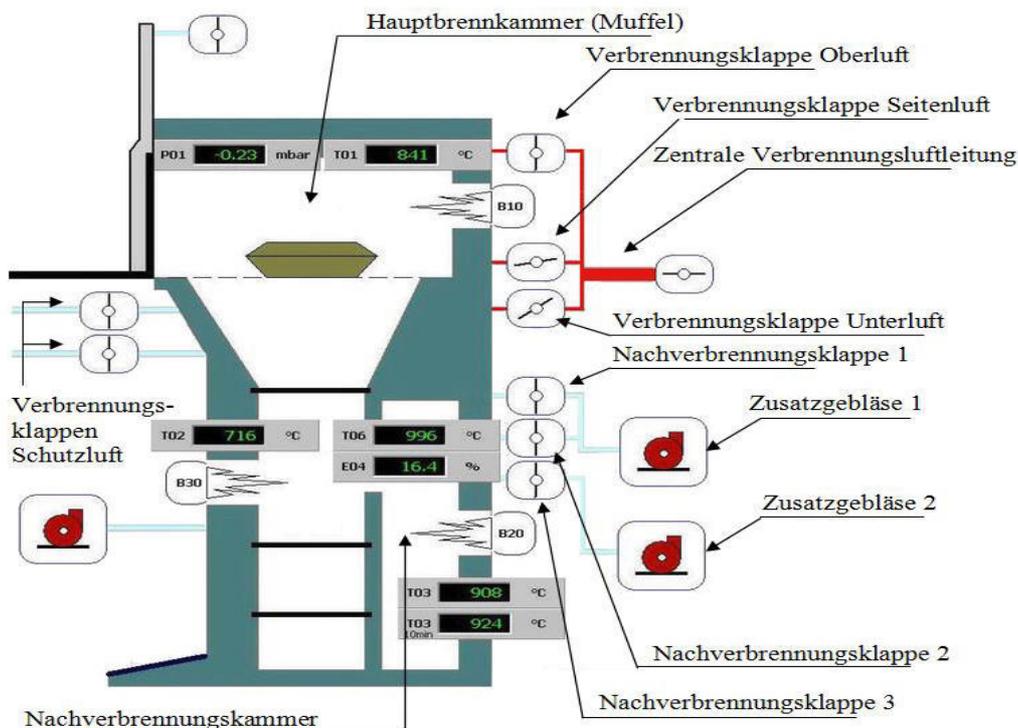


Abbildung: Übersicht über das Luftversorgungsmanagement in Anlehnung an die GUI (Graphical User Interface) Ray-Vis der Fa. Rayen Intec.

Direkter Vergleich der Verbrennungsluftzuführung in die einzelnen Verbrennungsluftklappen beider Öfen

Vergleichsmerkmal	Ofen alt	Ofen neu
Verbrennungsluftzuführung über		
Oberluft	Verbrennungsluftgebläse	Verbrennungsluftgebläse
Seitenluft	Verbrennungsluftgebläse	Verbrennungsluftgebläse
Unterluft	Verbrennungsluftgebläse	Verbrennungsluftgebläse
NV1	Verbrennungsluftgebläse	Gebläse NV2/NV1
NV2	Verbrennungsluftgebläse	Leistungsanpassung Sauerstoff, Temperatur
NV3	Nicht vorhanden	Gebläse NV3/Schutzluft
Schutzluft	Umgebungsluft selbstsaugend	Leistungsanpassung Sauerstoff, Temperatur

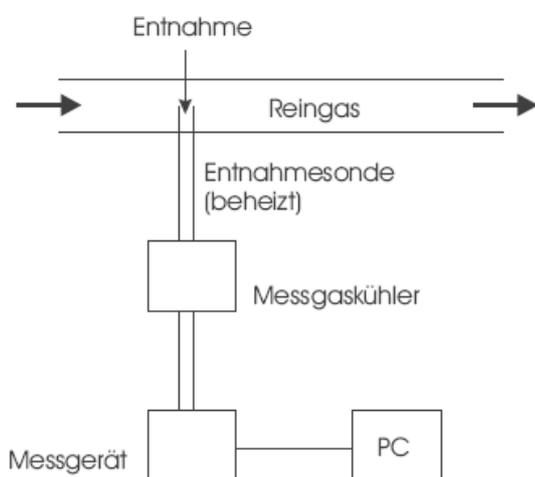
Wie aus dieser Tabelle zu entnehmen ist, wird die Leistung der Zusatzgebläse 1 und 2 hauptsächlich von dem im Ofen herrschenden Temperatur- und dem Sauerstoffniveau gesteuert. Weiterhin findet aber auch eine zeitliche Steuerung statt. Dies bringt den Vorteil einer unabhängigen Verbrennungsluftversorgung von nur einer Stellkomponente, wie z.B. der Zeit. Die Zusatzgebläse werden während der Hauptverbrennungsphase (bis ca. 20ste Minute) bei Nichtbedarf in einer Grundlast von 15% gefahren, um auf eventuelle Sauerstoffmangel-Ereignisse schnell reagieren zu können.

2.3 Messtechnische Durchführung

2.3.1 Messaufbau

Die Messungen der Abgaskonzentration erfolgten mit folgenden Systemen bzw. Messgeräten entsprechend den aktuellen Vorschriften.

Im folgenden Bild wird der Messplatzaufbau schematisch dargestellt:



Messplatzaufbau Emissionsmessung (schematisch)

Die Abgasentnahme erfolgt über eine Edelstahlsonde und eine ca. 4,0 m lange, beheizte Probegasleitung. Das Probenahmegas wird mit einem Messgaskühler PSS-5 der Fa. M&C Products Analysetechnik GmbH unmittelbar nach der Probenahme direkt an der Messstelle getrocknet (Temperatur 2 - 3 °C) und mittels Pumpe zu den Messgeräten gefördert (Überdruck).

Messlanze	unbeheizt	Temperierung im Abgas
Staubfilter	unbeheizt	Temperierung im Abgas
Probegasleitung	beheizt	150 - 160 °C
- vor Gasaufbereitung	Länge	4,0 m
- nach Gasaufbereitung (CO, O ₂)	Länge	0,5 m
Werkstoffe der gasführenden Teile		Edelstahl/ Glas/ PTFE
Messgaskühler	PSS-5	Temperatur < 3 °C

Analysator

Messkomponente:	Kohlenmonoxid	Sauerstoff
Analysator:	SIDOR	SIDOR-OXOR (P)
Hersteller:	SICK MAIHAK	
Gerätenummer:	00761086	
Baujahr:	2008	
1. Messbereich:	0 - 150 mg/m ³	0 - 25 %
2. Messbereich:	0 - 3.000 mg/m ³	

Messverfahren

Kohlenmonoxid

Messen der gasförmigen Komponenten Kohlenmonoxid, Verfahren der nichtdispersiven Infrarot-Absorption (NDIR) nach DIN EN 15058.

Das Verfahren beruht auf der Resonanz-Absorption bei charakteristischen Schwingungsrotationsbanden nichtelementarer Gase im mittleren Infrarot zwischen 2 µm und 12 µm. Die Gasmoleküle treten aufgrund ihres Dipolmomentes mit der Infrarotstrahlung in Wechselwirkung. Zur Selektierung wird der Empfänger mit der jeweiligen Messkomponente gefüllt und damit auf diese sensibilisiert.

Das Photometer besteht aus einem thermischen Strahler, dessen Strahlung durch ein Chopperrad in eine Messküvette fällt.

Der im Empfänger entstehende Messeffekt ist ein mit der Chopperfrequenz einhergehender Druckeffekt, der von einem Membrankondensator aufgenommen und in einem angeschlossenen Vorverstärker in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Sauerstoff

Messung von Sauerstoff nach dem paramagnetischen Messprinzip nach DIN EN 14789.

Die Sauerstoffmoleküle werden in die Magnetfelder der Permanentmagneten gezogen. Das dadurch entstehende Partialdruckgefälle übt eine Kraft auf die Hantel aus und erzeugt ein Drehmoment, da die Hantel aus ihrer ursprünglichen Lage bewegt wird. Die Größe dieses Drehmomentes ist der Sauerstoffkonzentration proportional und kann in ein elektrisches Signal umgesetzt werden.

Registrierung der Messwerte

Die Auslesung der Messwerte erfolgt mittels Datenlogger der Firma Ahlborn. Die Messwerte werden über den gesamten Messzeitraum kontinuierlich und registrierend aufgezeichnet mit dem dazugehörigen Datum und Uhrzeit.

Hersteller:	Ahlborn
Typ:	ALMEMO MA 8590-9/
Serie:	T07040074
Datenübertragung:	RS 282
Messeingänge:	9 ALMEMO®-Eingangsbuchsen
Kanäle:	9 Primärkanäle
AD-Wandler:	Delta-Sigma 24bit, 50 Messungen/s,
Speicherung:	als Textdatei
Speicherintervall:	frei konfigurierbar (2 Sekunden eingestellt)

Strömungsgeschwindigkeit

Prandtl'sches Staurohr in Verbindung mit elektronischem Mikromanometer

Typ:	Multifunktionsmessgerät Testo 521
Hersteller:	Testo GmbH, Lenzkirch
Messbereiche:	interne Drucksonde 0 – 100 hPa externe Drucksonde 0 – 10 Pa
Fühlertyp:	piezoresistiver Drucksensor
Überlast:	300 hPa
Statischer Druck:	2.000 hPa
Genauigkeit:	0,1% v Ew. - 1 Digit
Auflösung:	0,001 hPa
kont. Erfassung:	Mittelwertbildung über 2 Sekunden – Auslesung über RS 232

Abgastemperatur

Typ:	Multifunktionsmessgerät Testo 521
Hersteller:	Testo GmbH, Lenzkirch
Fühlertyp/MB:	NTC -40 – 150 °C NiCr-Ni Typ K -200 – 1.370 °C
Genauigkeit:	0,4 °C - 1 Digit
Auflösung:	0,1 °C
kont. Erfassung:	Mittelwertbildung über 2 Sekunden – Auslesung über RS 232

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 *Auswirkung des geänderten Luftmanagementsystems auf den Einäscherungsprozess*

Das geänderte Luftmanagementsystem führt dazu, dass die Zuführung der Verbrennungsluft der Nachbrennkammer von der zentralen Verbrennungsluftleitung abgetrennt und separat über Verbrennungsluftgebläse gespeist wird.

Der Vorteil dieser Dezentralisierung ist die Reduzierung des Druckabfalls über die zentrale Verbrennungsluftleitung bei zeitgleicher Öffnung verschiedener Klappen. Dadurch wird erreicht, dass mehr notwendige Verbrennungsluft in den Ofen gelangt und somit Verbrennungsluftmangelerscheinungen reduziert werden können. Weiterhin ist durch Vergrößerung der Eintrittsquerschnitte über die Verbrennungsluftklappen in den Ofen eine Erhöhung des Verbrennungsluftdurchflusses erreicht worden.

Die Menge der Verbrennungsluft wurde dem theoretischen Luftbedarf angepasst.

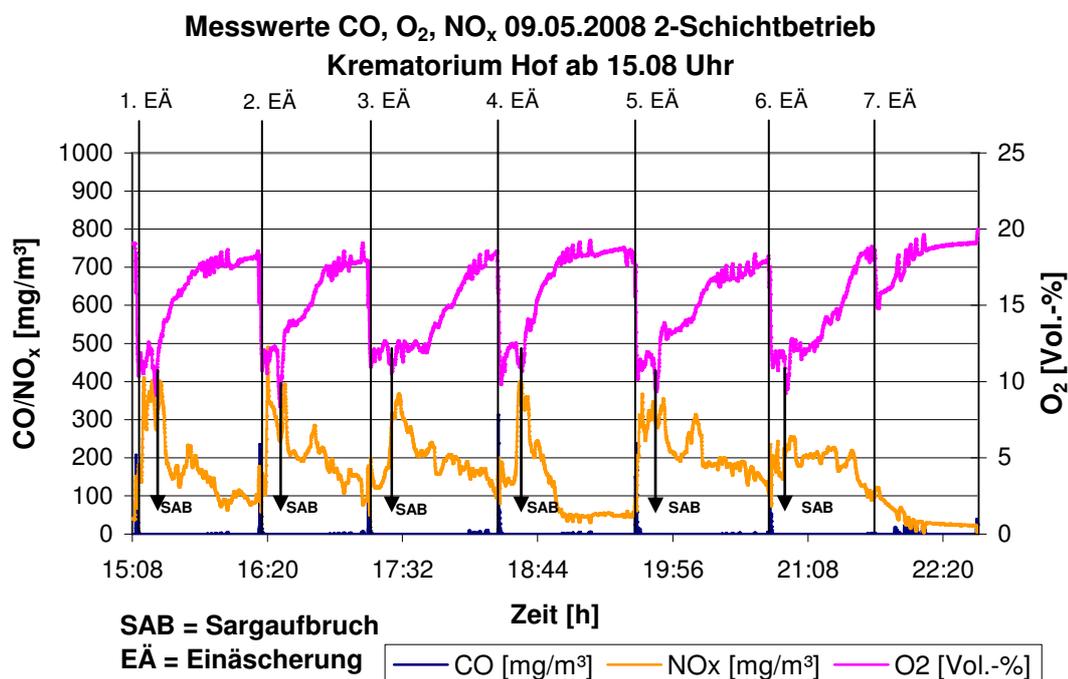
Die Klappensteuerung über die Software des neuen Systems ist viel differenzierter als die des nicht umgebauten Ofens. Die Luftverteilung im Einäscherungssofen erfolgt dadurch bedarfsbezogener und somit optimierter und kontrollierter über den gesamten Einäscherungszeitraum, wodurch auch der Verbrauch an Primärenergie reduziert werden konnte. Die theoretischen Volumenströme können auch bei einer Einäscherung eines schwereren Leichnams erreicht werden. Die geringe Unterversorgung an Verbrennungsluft, die während der Sargaufbruchphase auftreten kann, fällt wenig ins Gewicht, da entstehende Schadgase, in der Nachbrennkammer reduziert werden.

3.1.1 Einfluss der Zusatzgebläse auf die Einäscherung

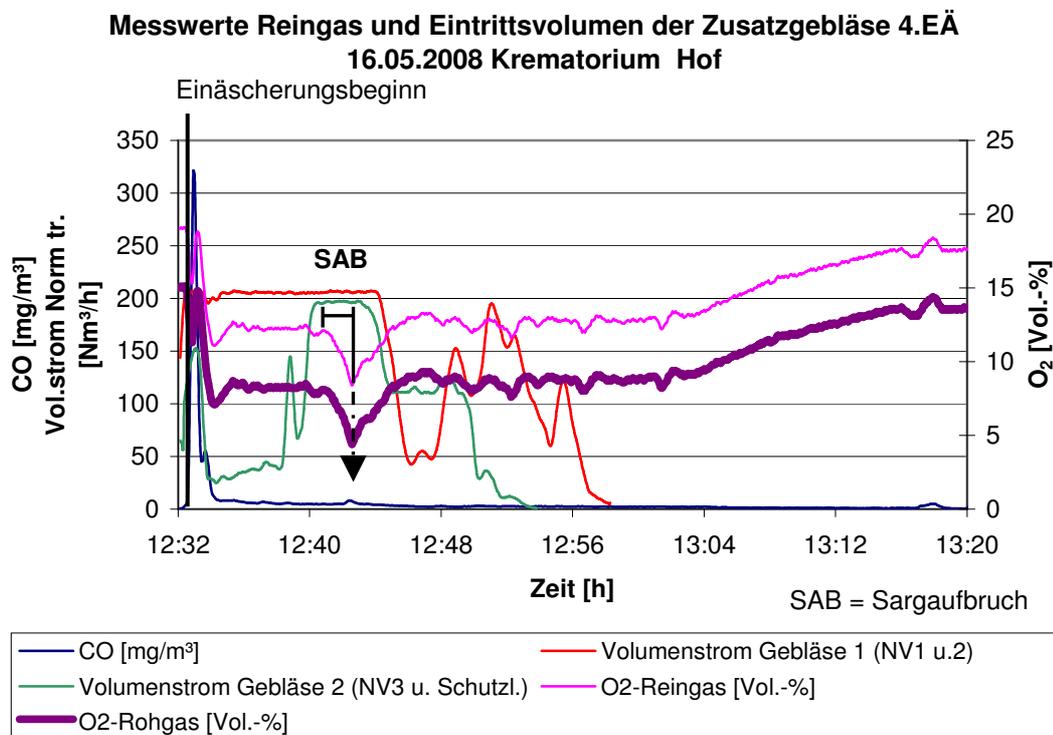
Aufgabe der Zusatzgebläse ist es die Nachbrennzone mit Verbrennungsluft zu versorgen, um eine Reduzierung der Emissionen von Kohlenmonoxid bei einer Einäscherung zu ermöglichen. Weiterhin erfolgt eine Energieeinsparung bei Nichtgebrauch der Zusatzgebläse.

Die Auswertung der Messungen hat gezeigt, dass insbesondere Kohlenmonoxid während des Sargaufbruches (SAB) entstanden ist. Ein Grund hierfür ist, dass während dieser kritischen Phase der Einäscherung zu wenig Verbrennungsluft dem Ofen zur Verfügung stand und auch die Zuführung von Luft in die Nachbrennkammer über die zentrale Verbrennungsluftleitung nicht ausreichend war.

Die folgende Abbildung zeigt, dass sich die Emissionen bzgl. des Kohlenmonoxids verringert haben. Es ist ersichtlich, dass in 6 von 7 Einäscherungen die CO-Peaks während der SAB-Phase auf nahezu 0 reduziert worden sind. Auch wird deutlich, dass die Einfahr-Peaks in allen 7 Einäscherungen (CO-Konzentration $< 400 \text{ mg/m}^3$) gesunken sind. Das wird dadurch erreicht, dass kurz nach einer Neubeschickung des EinäscherungsOfens die Zusatzgebläse hochgefahren (100% Leistung) und die Nachverbrennungsklappen geöffnet werden (insbesondere die Nachverbrennungsklappen 1 und 2). Somit ist sofort eine ausreichende Menge an Verbrennungsluft in der Nachbrennkammer vorhanden.



An dem folgenden Beispiel eines Sargaufbruches soll die Leistungsfähigkeit der beiden Zusatzlüfter zur Reduzierung von CO-Emissionen demonstriert werden.



Vergleicht man beide Volumenstromkennlinien der Zusatzgebläse wird ersichtlich, dass die Regelung beider Verbrennungsluftgebläse zum Zeitpunkt des SAB auf 100% der maximalen Leistungsfähigkeit ansteigt. Die gemessene Sauerstoffkonzentration im Moment des SAB betrug 4,6 Vol.-% im Rohgas. Das in der Muffel entstandene "heiße" CO ist durch genügend vorhandene Verbrennungsluft in der Nachverbrennzzone im Reingaskanal der Anlage oxidiert worden und nur in einer unbedeutenden Konzentration messbar. Die Regulierung der Gebläse durch die Steuerung erfolgt über die Prozesszeit, die Temperatur in der NBZ und über die Sauerstoffkonzentration im Rohgas. Zur Regelung des Prozesses mittels Sauerstoffkonzentration werden prozesszeitabhängige Sauerstoffgrenzwerte und eine zeitliche Änderung des Sauerstoffgehaltes zu Grunde gelegt.

3.1.2 Einfluss der Steuerung auf den Einäscherungsverlauf

Ein wichtiges Element einer jeden technischen Anlage ist die Steuerung. Sie empfängt Messsignale von der Anlage, verarbeitet sie und reagiert, falls notwendig, auf geänderte Situationen in der Anlage. Je höher der Informationsgehalt der Mess- und Statussignale für die Steuerung ist, desto schneller kann sie reagieren und Abweichungen korrigieren. Unter Verwendung dieses Prinzips ist im Krematorium Hof eine dynamisch und komplex arbeitende Matrix entstanden. Es handelt sich hierbei um eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Fa. Siemens. Weiterhin ist das GUI (Graphical User Interface) überarbeitet worden, so dass verschiedene Betriebszustände (Sargtyp II, Aufheizen eines kalten Ofen, 2-Schichtbetrieb) ausgewählt werden können. Unter Verwendung eines Passwortes lassen sich auch die zugehörigen Regelwerte (Winkel und Zeit der Klappenöffnung, Sauerstoff- und Temperaturregelwerte) ändern. Durch die neue Steuerung werden die Häufigkeit der Schaltimpulse durch die Sauerstoff-, Zeit- und Temperaturregelung deutlich erhöht. Das bedeutet, dass die Verbrennungsluftklappen häufiger reagieren. Durch die höhere Geschwindigkeit (6 Sekunden $0^\circ \rightarrow 90^\circ$) der Öffnungsphase wird schneller Luft zugeführt und somit die Entstehung von Kohlenmonoxid verhindert. Ein weiteres Ergebnis der neuen Steuerung ist, dass die Sauerstoffkonzentration von durchschnittlich 15 Vol.-% auf durchschnittlich 10 Vol.-% gesenkt worden ist. Die erwähnte Verbesserung der Reak-

tionsgeschwindigkeit der Anlagensteuerung macht es somit möglich die Regelgrenzwerte für Sauerstoff zu verringern.

3.2 Auswirkung des geänderten Luftmanagementsystems auf die ausgewiesenen CO-Konzentrationen

3.2.1 Eingesetzte Messgeräte

Im Krematorium Hof werden die Sauerstoff- und Kohlenmonoxidkonzentrationen kontinuierlich durch ein Messgerät GME 64 der Fa. Sick messtechnisch erfasst.

Im GME 64 kommen zwei voneinander unabhängige und selektiv arbeitende Messprinzipien zur Anwendung.

Kohlenmonoxid

Dieses spektroskopische Verfahren basiert auf der Absorption von nichtdispersiver IR-Strahlung (NDIR-Prinzip). Als Empfänger dient ein Einstrahl-Mehrschicht-Detektor, der mit einer definierten Konzentration der zu messenden Gaskomponente gefüllt ist. In der ersten Detektorschicht wird bevorzugt die Absorptionsbandenmitte absorbiert, während die Bandenflanken in beiden Schichten in etwa gleichem Maße absorbiert werden. Durch die selektive Strahlenabsorption kommt es zu einer unterschiedlichen Erwärmung der Gasmassen und damit zu einer Druckdifferenz in den Detektorschichten. Der Druckausgleich führt zu einer Gasströmung, die von einem Mikroströmungsfühler erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Die gemessene Gasströmung ist ein Maß für die stoffspezifische Konzentration.

Bei dem eingebauten Gerät handelt es sich um ein Messgerät mit zwei Messbereichen:

1. MB: 0-150 mg/m³
2. MB: 0-750 mg/m³.

Sauerstoff

Der Sauerstoffsensor arbeitet nach dem Prinzip einer Brennstoffzelle. Der aus dem Messgas eindiffundierende Sauerstoff wird an der Goldkathode elektrochemisch aufgenommen, wobei Elektronen aufgebraucht werden. Das Blei der Anode wird unter Elektronenabgabe zu Bleidioxid oxidiert. Dieses löst sich in der als Elektrolyt dienenden Säure auf, wodurch die Elektrode regeneriert wird. Der aus diesen Messungen resultierende Stromfluss ist proportional zur Konzentration des eindiffundierenden Sauerstoffs. Der Sauerstoffsensor wird während der täglichen Kalibrierung automatisch justiert (Messbereich: 0 – 25%).

Analysator

- Typ/Hersteller: Sick, Typ: GME 64
- Baujahr: 1999
- Geräte-Nr.: N1-L0-0868; 6012207
- Aufstellungsort: im Keller hinter den Öfen
- Umgebungstemperatur: 25 °C
- Art der Referenzpunktkontrolle: Autokalibrierung, alle 3 Stunden

Gerätetyp eignungsgeprüft

GME 64 (entspricht Ultramat 23-7)

- Hersteller: Fa. Siemens AG, 76187 Karlsruhe
- Eignung: Anlagen der 13. BImSchV bzw. TA-Luft
- Messbereiche der Eignungsprüfung: CO: 0 - 150 mg/m³
NO: 0 - 250 mg/m³
SO₂: 0 - 400 mg/m³
O₂: 0 – 10; 0 - 25 Vol.-%
- Die baugleiche Messeinrichtung wird auch von der Fa. Sick (Bezeichnung GME 64) und der Fa. Bühler (Bezeichnung BA 5000) vertrieben.
- Prüfbericht: TÜV Ecoplan Umwelt GmbH, TÜV Süd-deutschland AG, Nr.: 240 128 33 vom 08.08.1997

Das Erfassungs- und Auswertesystem besteht aus einem Auswerterechner TALAS.

- Typ/Hersteller: TALAS
- Gerätenummer: 997
- Gerät eignungsgeprüft: ja, Prüfbericht: TÜV Rheinland,
Nr. 936/807003 vom 2. 8. 1988
- Schutz gegen unbefugte
Parameteränderungen: Schlüsselschalter, Speichern des
Datums der letzten Parameteränderung
- letzte Parameteränderung: 08/2000; Temperatur NV: 09/2002
- Aufstellungsort: Keller Krematorium Hof
- Registrierung der Rohwerte: ja, Speicher
- Dauer der Aufbewahrung: 1 Tag, 1 Woche, 1Jahr
- Emissionsfernüberwachung: nein

3.2.2 CO-Grenzwertüberschreitungen

Im zu betrachtenden Zeitraum (November 2007 – November 2008) sind insgesamt 23 Grenzwertverletzungen (CO-Stundenmittelwert, bez. auf 11% O₂ > 50 mg/m³) bei 1.977 durchgeführte Einäscherungen aufgetreten.

Diese Grenzwertüberschreitungen können folgenden Zeiträumen zugeordnet werden:

Zeitraum	Anzahl der GW-Überschreitungen	Begründung
November 2007 - Januar 2008	14	Anpassung der Steuerung und Einarbeitung der Mitarbeiter
Februar 2008	1 3	O ₂ -Sonde verschmutzt Thermoelement gebrochen
März 2008	1	Thermoelement gezogen
Mai 2008	1	Wartungsarbeiten
Juni 2008	3	Drehplatte defekt

Es wird deutlich, dass seit Februar 2008 im Krematorium Hof keine Grenzwertüberschreitungen für Kohlenmonoxid zu verzeichnen sind, die auf die Inbetriebnahme der neuen Ofensteuerung und der Einarbeitung der Mitarbeiter zurückzuführen sind.

60,9 % der Grenzwertverletzungen sind in der Übergangsphase der Umsetzung der neuen Steuerung aufgetreten und somit auf die Inbetriebnahme zurückzuführen. Den anderen ausgewiesenen Grenzwertüberschreitungen liegen technische Fehler bzw. Anlagenstörungen zugrunde.

Im Jahr 2007 gab es im Krematorium Hof 51 Grenzwertüberschreitungen für Kohlenmonoxid. Bezogen auf die Einäscherungsquote ergibt sich ein Wert von einer Grenzwertverletzung pro 38 EÄ. Im Vergleich zum Untersuchungszeitraum ist der Wert auf eine Grenzwertverletzung pro 86 EÄ gesunken. Bleiben die Grenzwertüberschreitungen bis Februar (Einarbeitungsphase) unberücksichtigt, beträgt das Verhältnis 1: 163 (Grenzwertüberschreitung : Einäscherungen).

3.3 Auswirkung des geänderten Luftmanagementsystems auf den Gasverbrauch

In den Jahren 2005 bis 2007 wurden nachfolgend aufgeführte Gasverbräuche registriert:

Jahr	Gasverbrauch pro Jahr [m³]	Anzahl EÄ pro Jahr	Durchschnittlicher Gas- verbrauch pro EÄ [m³/EÄ]
2005	68.522	1.876	36,5
2006	80.368	1.912	42,0
2007	87.547*	1.960	44,7
Mittelwert	78.812	1.916	41,1

^{*)} Gasverbrauch ohne Trockenheizen des umgebauten Ofens

Im Untersuchungszeitraum wurden 46.793 m³ Gas verbraucht. Davon entfielen 39.703 m³ Gas auf den Betrieb des Ofens und 7.090 m³ Gas auf den Betrieb eines separaten Heizkessels.

Zeitraum	Gasverbrauch [m³]	Anzahl EÄ	Durchschnittlicher Gas- verbrauch pro EÄ [m³/EÄ]
März 2008	3.262	137	23,8
April 2008	3.912	189	20,7
Mai 2008	2.690	113	23,8
Juni 2008	3.750	199	18,8
Juli 2008	3.783	179	21,1
August 2008	3.702	147	25,2
Untersuchungszeitraum (11/07 – 11/08)	39.703*	1.977	20,1
Untersuchungszeitraum (11/07 – 11/08)	46.793**	1.977	23,7

^{*)} Gesamtgasverbrauch ohne Heizung - nur Ofenbetrieb; Einschichtbetrieb incl. Aufheizphase und Stillstandzeiten

^{**)} Gesamtgasverbrauch mit Heizung und Ofenbetrieb; Einschichtbetrieb incl. Aufheizphase und Stillstandzeiten

Im Vergleich zu den 3 Vorjahren konnte der Gasverbrauch um 41 %, im Vergleich zu 2007 um 47 % reduziert werden. Damit wird im Untersuchungszeitraum ein mittlerer Gasverbrauch von 20,1 m³/EÄ erzielt.

Wird ein 2-Schichtbetrieb, wie am 19. und 20.03.2008 durchgeführt, kann der mittlere Gasverbrauch nochmals deutlich auf ca. 7 m³/EÄ gesenkt werden. Wir gehen davon aus, dass bei einem durchgehenden Zweischichtbetrieb ein mittlerer Gasverbrauch von < 5 m³/EÄ erreicht werden kann.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Öffentlichkeitsarbeit

4.1 Zusammenfassung

Durch die Einführung des neuen Luftmanagementsystems im 2. Teil des Projektes wurde die Verbrennung im Einäscherungssofen optimiert. Es kann gezielt auf den Verbrennungsprozess Einfluss genommen werden; Luftmangelerscheinungen, die ggfls. zu erhöhten CO-Gehalten im Abgas führen, werden so vermieden.

Bestandteil der technischen Realisierung sind folgende wesentlichen Punkte:

1. Die Luftzuführung wurde aufgeteilt. Zusätzlich zu der zentralen Luftzuführung werden Gebläse installiert, die unabhängig voneinander Verbrennungsluft in verschiedene Ofenzonen leiten.
2. Der Einsatz sog. „schnell schließender Klappen“ (6 Sekunden $0^\circ \rightarrow 90^\circ$) führt zu einer deutlich höheren Geschwindigkeit der Öffnungsphase. Es wird nach der Ansteuerung der Klappen schneller Luft in den Verbrennungsraum geführt.
3. Die Einführung einer erweiterten Steuerung, d. h. eine komplexe Verknüpfung von Lüftungsclappen in der Haupt- und Nachbrennkammer in Abhängigkeit von der O_2 -Konzentration im Rohgas, der Temperatur, der Zeit sowie des spezifischen Betriebssystems (z. B. kalter Ofen, Sargtyp II, 2-Schichtbetrieb).
4. Der Einbau von neuen Brennertypen, die deutlich weniger Spülluft (Falschluff) dem Ofen zuführen.

Diese Maßnahmen haben dazu geführt, dass

1. die Einhaltung des Grenzwertes für Kohlenmonoxid im Regelbetrieb einer Anlage möglich ist und
2. der Primärenergieeintrag deutlich um ca. 40 % reduziert wird. Durch einen Mehrschicht-Betrieb des Ofens sind Gasverbräuche $< 7 \text{ m}^3/\text{E}\ddot{\text{A}}$ erreichbar.

Durch die o. g. Maßnahmen wird weiterhin eine Verlängerung der Standzeiten der Öfen erreicht. Auch konnte nachgewiesen werden, dass durch diese Umbaumaßnahmen ältere, gasbetriebene Mehretagenöfen mit Neuanlagen vergleichbare Emissionswerte liefern.

4.2 Öffentlichkeitsarbeit

Die o. g. Ergebnisse werden im Juni 2009 im Rahmen eines Kolloquiums in Münster vorgestellt.

Die Übertragung der Ergebnisse an anderen Ofenanlagen ist geplant.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Verbesserung des Verfahrensablaufes in Einäscherungsanlagen, bei einer gleichzeitigen und jederzeit gewährleisteten würdevollen Behandlung der Verstorbenen möglich ist.

Es kann eingeschätzt werden, dass die Projektziele vollständig erreicht worden sind.

Wir danken der DBU, der Stadt Hof und der Fa. IFZW für die Unterstützung bei der Durchführung des Projektes.

Leutenberg, d. 12.01.2009

Dr. J. Bachmann