

Technische Universität Dresden
Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Lehrstuhl Umwelttechnik und Umweltverfahrenstechnik
Dipl.-Ing. Stephan List

**Bericht zum Forschungsvorhaben
"Emissionsminderung an Einäscherungsöfen"**

**Untersuchungen zur Verbrennungsluftverteilung
Erprobung eines optischen Temperaturmeßgerätes**

Auftraggeber:

Paul A.F. Schulze GmbH Industrieofenbau

Dresden, März 1997

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Gesetzliche Anforderungen	3
3	Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen	5
4	Einäscherungsofen und Verbrennungsluftverteilung	7
4.1	Einäscherungsvorgang	7
4.2	Realisierte Verbrennungsluftverteilung	9
4.3	Beeinflussung des Verbrennungsprozesses	9
4.4	Verbrennungsluftbedarf	12
4.5	Bewertung der zusätzlichen Verbrennungsluftzuführung - Meßergebnisse und Betriebserfahrungen	14
4.6	Vorschlag zur Umgestaltung der Verbrennungsluftzu- fuhr	16
5	Temperaturmessung	16
5.1	Problemstellung	16
5.2	Prinzip der optischen Temperaturmessung	18
5.3	Strahlungspyrometer KT 15.69 D	18
5.4	Installation	19
5.5	Ergebnisse der Erprobung	20
5.6	Wirtschaftlichkeit	22
6	Nutzung der Ergebnisse	23
7	Zusammenfassung	24

Literatur

Anhang

1 Einleitung

In den letzten Jahren sind mögliche Beeinträchtigungen der Umwelt durch Einäscherungsanlagen stärker in das öffentliche Bewußtsein gerückt. Die Anforderungen an die Reinheit der Abgase wurden so erhöht, daß neben der Abscheidung von Staub auch die wirkungsvolle Minderung der Emissionen von Schadgasen, insbesondere der Dioxine/Furane, notwendig ist.

Zusätzlich zum Einsatz nachgeschalteter Rauchgasreinigungsanlagen werden bereits in der VDI-Richtlinie 3891 [VDI3891] Möglichkeiten der Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen (z.B. Prozeßführung) geschildert. Eine maßgebliche Rolle bei der Verminderung der Emission gasförmiger Schadstoffe spielt der möglichst gute Ausbrand der Rauchgase und Flugstäube. Wesentlichen Einfluß darauf haben die Zuführung der Verbrennungsluft in den Einäscherungsöfen und die Zuverlässigkeit der Temperaturmessung in der Nachverbrennungskammer.

Im Rahmen des Förderprogramms "Forschungskooperation in der mittelständigen Wirtschaft - Programmteil Forschungspersonalaustausch" des BM BWFT (Projektträger AiF, Förderkennzeichen FKP 0028201B6B) wurden

- Untersuchungen zur Verbrennungsluftverteilung im Krematorium Potsdam durchgeführt und Vorschläge zur Verbesserung des Betriebsregimes gemacht
- ein optisches Temperaturmeßgerät unter den Bedingungen von Einäscherungsöfen im Krematorium Meißen erprobt und in das Steuerungskonzept integriert.

2 Gesetzliche Anforderungen

Als umweltrelevante Emissionen aus Krematorien werden neben Staub Kohlenmonoxid, Stickstoff- und Schwefeloxide, Kohlenwasserstoffe, anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, Schwermetalle und Dioxine angesehen. Besonders die Gefährdung durch die Substanzgruppe der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF) wird letzter Zeit häufig diskutiert.

Seit 1992 sind daher die Anforderungen an die Rauchgasreinigung stark gestiegen. 1993 wurden Krematorien in die Liste der genehmigungsbedürftigen Anlagen nach [BImSchG] (Nr. 10.24 des Anhangs 4 der [4. BImSchV], vereinfachtes Genehmigungsverfahren) aufgenommen. Seither orientieren sich die Genehmigungsbehörden an den Maßstäben der großen, vielstufigen Rauchgasreinigungsanlagen der Industrie.

Im Genehmigungsbescheid für das Krematorium Meißen (August 1994, [RPD94]) wird die Einhaltung folgender Emissionskonzentrationen gefordert (Stundenmittelwerte, bezogen auf Normzustand, trocken, 11 % Sauerstoff):

staubförmige Stoffe (Gesamtstaub)	10	mg/m ³
Quecksilber	0,2	mg/m ³
Kohlenmonoxid		
Stundenmittelwert	100	mg/m ³
Tagesmittelwert	50	mg/m ³
organische Stoffe, als Gesamt-C	10	mg/m ³
Stickstoffoxide, als NO ₂	200	mg/m ³
Schwefeloxide, als SO ₂	100	mg/m ³
anorg. Chlorverbindungen, als HCl	30	mg/m ³
anorg. Fluorverbindungen, als HF	2	mg/m ³ .

Außerdem wird das geltende allgemeine Minderungsgebot der TA Luft für Dioxine/Furane ([TA Luft] Nr. 3.1.7) durch die Festlegung eines Grenzwertes konkretisiert:

Grenzwert für Dioxine/Furane	1,0	ng I-TE/m ³
Zielwert für Dioxine/Furane	0,1	ng I-TE/m ³ .

Im Februar 1995 wurden vom Amt für Immissionsschutz Brandenburg für das Krematorium Potsdam weitergehend gefordert [AIB95]:

Quecksilber	0,05	mg/m ³
Kohlenmonoxid	50	mg/m ³
Dioxine/Furane	0,1	ng I-TE/m ³ .

Im Juli 1996 wurde im Bundeskabinett der Entwurf einer Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung nach §23 [BImSchG] beschlossen. Gleichzeitig soll die Genehmigungspflicht aufgehoben werden. Der Entwurf dieser Verordnung enthält einheitliche

Anforderungen an Errichtung, Beschaffenheit und Betrieb dieser Anlagen [E§23V096]. Voraussichtlich werden folgende Emissionsgrenzwerte festgelegt:

staubförmige Stoffe (Gesamtstaub)	10	mg/m ³
Kohlenmonoxid	50	mg/m ³
organische Stoffe, als Gesamt-C	20	mg/m ³
Dioxine/Furane	0,1	ng I-TE/m ³ .

Nach Ablauf des Bestandsschutzes müssen dann auch bestehende Altanlagen die neuen Grenzwerte einhalten. Sehr viele der 120 Krematorien in Deutschland genügen heute diesen Anforderungen nicht und müssen ertüchtigt oder stillgelegt werden.

3 Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen

Der Stand der Technik bei Einäscherungsanlagen wird in der VDI-Richtlinie 3891 (1992) charakterisiert. Zur Einhaltung der festgelegten Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe wurden im wesentlichen Primärmaßnahmen vorgeschlagen:

- Einäscherungsöfen, bestehend aus Hauptbrennraum, Ausbrandbereich zur Mineralisierung der Asche und separat beheizter Nachbrennkammer
- Einsatz NO_x-armer Brenner
- Einhaltung der Parameter:

Temperatur im Hauptbrennraum > 650 °C

Temperatur im Nachbrennraum > 800 °C

Verweilzeit der Rauchgase im Nachbrennraum > 0,3 s

Sauerstoffmindestgehalt 6 %.

Außerdem wurden umfangreiche Anforderungen an Särge und Sargmaterial formuliert, die darauf gerichtet sind, halogenorganische und schwermetallhaltige Stoffe auszuschließen. Zur Minderung gasförmiger Emissionen muß ein optimaler Ausbrand der Rauchgase angestrebt werden. Zur Vermeidung von Dioxin-Neubildungsreaktionen sind Flugascheablagerungen durch geeignete Abgasführung und häufiges Reinigen der Abgaswege möglichst gering zu halten.

Eine Anzahl weiterer, bei Feuerungsanlagen üblicher Primärmaßnahmen (z.B. NO_x : Senkung der Flammentemperatur, Verringerung der Verweilzeit bei hohen Temperaturen, Verminderung des Luftüberschusses) sind für Einäscherungsöfen nicht anwendbar.

Die Bildungsmechanismen, die bei thermischen Prozessen zum Auftreten polychlorierter Dioxine/Furane führen, sind durch zahlreiche Untersuchungen, vor allem an Abfallverbrennungsanlagen, im wesentlichen bekannt [VOGG95]:

- Emission unzerstörter, mit dem Einsatzgut eingetragener PCDD/F
- Entstehung von PCDD/F aus verwandten chlorierten Vorläuferverbindungen (Chlorbenzole, -phenole) durch homogene Gasphasenreaktion im Temperaturbereich von 800 bis 300 °C
- Bildung von PCDD/F aus nichtchloriertem organischem Material in Gegenwart einer Chlorquelle, Sauerstoff und geeigneter Katalysatoren (z.B. Kupfer) in den Stäuben im Temperaturbereich von 500 bis 200 °C (De-novo-Synthese).

Diese Möglichkeiten lassen sich direkt auf unvollständige Verbrennung der Rauchgase und des Flugstaubes zurückführen. Während bei großen Verbrennungsanlagen mit kontinuierlicher bzw. quasi-kontinuierlicher Beschickung die Verbrennungsverhältnisse leichter einstellbar sind, ergeben sich bei kleinen Verbrennungsöfen im Chargenbetrieb durch die stark schwankenden Betriebsbedingungen (Volumenstrom, Temperatur) Schwierigkeiten. Neben Krematorien betrifft dies z.B. auch Gekrätzveraschungsanlagen der Edelmetallindustrie [BERGER96].

Da die Betriebsbedingungen in der Nachbrennkammer für eine niedrige Emission von Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen sowie einen möglichst geringen Kohlenstoffanteil in den Flugstäuben und damit niedrige PCDD/F-Emission wichtig sind, wird in letzter Zeit von den Genehmigungsbehörden auch für Krematorien eine Mindesttemperatur im Nachbrennraum von 850 °C gefordert. In aktuellen Ausschreibungen für neu zu errichtende Einäscherungsöfen geht man von einer Verweilzeit der Rauchgase im Nachbrennraum von mindestens 2 s aus.

4 Einäscherungsöfen und Verbrennungsluftverteilung

4.1 Einäscherungsvorgang

Der Aufbau der Einäscherungsöfen im Krematorium Potsdam mit Luftzuführungssteinen ist im Bild 1 schematisch dargestellt. Es handelt sich um Etagenöfen mit oberem Rauchgasabzug, d.h. die Rauchgasführung aus der Muffel in den Ausbrandbereich erfolgt durch Überströmkanäle, die im oberen Teil der Muffel beginnen.

Dargestellt sind die Möglichkeiten der Luftzuführung bei bisherigen Ofenkonstruktionen (blau):

- in der Muffel parallel zu Sargaufgabe
- an der Drehplatte
- am Eintritt in den Ausbrandbereich

sowie die zusätzlich eingebrachte Verbrennungsluftzufuhr am Ende der Überströmkanäle (rot).

Der Einäscherungsvorgang ist ein Chargenprozeß. In den zwei übereinander angeordneten Kammern (Muffel und Ausbrandbereich), die durch eine drehbare Platte getrennt sind, findet die Verbrennung zweier Leichname zeitversetzt statt.

Nach dem Einfahren des Sarges in den Hauptverbrennungsraum, die Muffel, verbrennen zuerst Sarg und Sargausstattung. Mit dem Zusammenbrechen des Sarges beginnt die Hauptverbrennung des Leichnams. Dabei fallen Teile des Leichnams auf die Drehplatte. Nachdem auch das Rumpfskelett durch das Tragrost gefallen ist, werden die Ascheteile durch Drehen der Drehplatte in den Ausbrandbereich gebracht. Dort erfolgt die vollständige Mineralisierung auf dem Ascherost. Die Rauchgase der nächsten Einäscherung aus der Muffel werden durch die Überströmkanäle in den Ausbrandbereich geführt und verbessern die Mineralisierung der Ascheteile auf dem Ascherost.

Bezogen auf die Muffel, in der die Hauptverbrennung abläuft, sind zwei Phasen des Verbrennungsvorganges zu unterscheiden:

1. Einfahren, Entflammen des Sarges, intensive Verbrennung des Sarges, Hauptverbrennung des Leichnams

2. Rumpfskelett auf Tragrost, Ascheteile auf der Drehplatte
Entsprechend ergibt sich ein unterschiedlicher Bedarf an Verbrennungsluft.

4.2 Realisierte Verbrennungsluftverteilung

Abbildung 2 zeigt die realisierte Verbrennungsluftverteilung der Einäscherungsöfen im Krematorium Potsdam schematisch als Ansicht der Ofenrückseite. Die Frischluft wird aus dem Raum angesaugt und über den Frischlüfter (drehzahlgesteuert) in das Verteilungssystem gedrückt. Die Frischluft wird zwischen Sammler und Überströmkanälen mittels Stellklappe aufgeteilt. Die Abgänge des Sammlers sind ebenfalls mit Stellklappen versehen. Zum Ascherost wird ein konstanter Anteil der Frischluft gefördert, die Stellklappen Muffel und Drehplatte können entsprechend des Bedarfs gesteuert werden. Liegt die Temperatur im Nachbrandbereich oberhalb der Mindesttemperatur von 850 °C, arbeitet der Nachbrenner als Lüfter.

Als Stellgrößen ergeben sich:

- Drehzahl Frischlüfter
- Stellung Klappe Muffel
- Stellung Klappe Drehplatte
- Stellung Klappe Überströmkanäle
- Drehzahl Lüfter Nachbrenner.

4.3 Beeinflussung des Verbrennungsprozesses

Der Betrieb von Einäscherungsöfen mit Rauchgasreinigungsanlage erfordert die bedarfsgerechte Verbrennungsluftzufuhr und damit Beeinflussung des Verbrennungsprozesses aus verschiedenen Gründen:

- Sicherung optimaler Ausbrandverhältnisse zur Verminderung von Emissionen
- zügige Durchführung der Einäscherung

- Vermeidung zu heftiger Verbrennung und thermischer Überlastung des Feuerfestmauerwerks des Ofens und der nachfolgenden Einrichtungen zur Rauchgasreinigung
- energiesparende Fahrweise durch Vermeidung unnötiger Auskühlung des Ofens.

Die Beurteilung des Bedarfs an Verbrennungsluft erfolgt mit einem kontinuierlichen Sauerstoffmeßgerät im Reingas jeder Rauchgasreinigungsanlage (URAS, Fa. Hartmann und Braun). Als Mindestsauerstoffgehalt sind durch die VDI-Richtlinie 3891 in der Nachbrennkammer 6 % gefordert. Erfahrungsgemäß verläuft die Verbrennung bei 11 % Sauerstoffgehalt am günstigsten. Dies ist auch der festgelegte Bezugssauerstoffgehalt bei Emissionsmessungen an Verbrennungsanlagen mit festen Brennstoffen. Zielwert für die Regelung der Verbrennungsluftzufuhr ist daher dieser Wert.

Die Verbrennungsluftzuführung wird durch die Steuerung in zwei Phasen realisiert:

1. Phase:

In der Phase der Verbrennung des Sarges und großer Teile des Leichnams wird die Luftzufuhr in die Muffel gedrosselt, um eine unkontrollierte Verbrennung zu vermeiden. Die Klappe Drehplatte ist geöffnet. Die nicht vollständig ausgebrannten Rauchgase werden im Unterofen mit Verbrennungsluft angereichert und erreichen dann sehr hohe Temperaturen. Der Frischlüfter wird mit einem Zielwert 11 % Sauerstoffgehalt geregelt. Der Nachbrenner läuft bei ausreichend hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer mit voller Leistung als Lüfter. Bei Absinken des Sauerstoffgehaltes werden die Klappen an den Überströmkanälen geöffnet und zusätzlich Verbrennungsluft eingeblasen.

2. Phase:

Nach 25 Minuten ist der Sarg verbrannt und die Hauptverbrennung des Leichnam in den meisten Fällen beendet. Auf dem Tragrost befindet sich nur noch das Rumpfskelett, Teile des Leichnams sind bereits auf die Drehplatte gefallen. Die Verbrennungsluftzufuhr wird von der Drehplatte in die Muf-

fel verlagert (Klappe Muffel geöffnet, Klappe Drehplatte gedrosselt) und die Luftmenge des Frischlüfters erhöht, um den Leichnam zügig weiter zu verbrennen, bis er auf die Drehplatte fällt. Erst oberhalb eines Sauerstoffgehalts von 14 % wird die Leistung des Frischlüfters reduziert, um ein Auskühlen des Einäscherungsofens zu vermeiden. Der Lüfter Nachbrenner arbeitet zusätzlich unterhalb 11 % O₂ als Lüfter. In dieser Phase werden die Temperaturen in der Nachbrennkammer geringer, unterhalb 850 °C zündet der Nachbrenner.

4.4 Verbrennungsluftbedarf

Aus einer Verbrennungsrechnung ergibt sich der spezifische Luftbedarf (mit ausreichendem Luftüberschuß $\lambda = 2$) wie folgt [GON-SCHIOR86]:

für die Leiche 8,05 kg Luft/kg Brenngut

für den Sarg 12,2 kg Luft/kg Brenngut.

Nimmt man als durchschnittliches Gewicht des Sarges 35 kg und für den Leichnam eine Spanne von 50 bis 100 kg an, ergibt sich der Luftbedarf zu

640...950 m³ (Normzustand, trocken) bzw.

690...1030 m³ (20 °C, 80 % rel. Feuchte).

Die durchschnittliche Dauer einer Einäscherung wird in der VDI-Richtlinie 3891 mit 60 Minuten angegeben. Aus Gesprächen mit Betreibern von Einäscherungsanlagen neuerer Bauart deutscher und niederländischer Hersteller ergeben sich Einäscherungsdauern von 70...90 Minuten. Bei den Einäscherungöfen der Fa. Paul A.F. Schulze in den Krematorien Meißen und Potsdam dauert eine Einäscherung zwischen 45 und 65 Minuten. Da die Intensität der Verbrennung zum Ende des Einäscherungsvorgangs stark abnimmt, soll der Bedarf an Verbrennungsluft auf 50 Minuten bezogen werden. Es werden Verbrennungsluftmengen von

770...1150 m³/h erforderlich.

An der Verbrennungsluftverteilung eines Einäscherungsofens im Krematorium Potsdam wurden Messungen der Luftmengen in Abhängigkeit von den Stellgrößen (Leistung der Lüfter und Klappenstellungen) durchgeführt. Die ermittelten Abhängigkeiten sind im Anhang graphisch dargestellt. Folgende maximal durchsetzbare Luftvolumenströme wurden bestimmt (Lüfterleistungen 100 %, Angaben in m³/h i.N.):

Phase 1, Klappe Muffel geschlossen, Klappe Drehplatte geöffnet

Klappe Überströmkanäle	geschlossen	geöffnet
Muffel	0	0
Drehplatte	462	207
Ascherost	303	196
Überströmkanäle	0	833
Summe	765	1236
zuzügl. Nachbrenner 172	937	1308

Phase 2, Klappe Muffel geöffnet, Klappe Drehplatte geschlossen

Klappe Überströmkanäle	geschlossen	geöffnet
Muffel	506	333
Drehplatte	0	0
Ascherost	167	122
Überströmkanäle	0	767
	673	1222
zuzügl. Nachbrenner 172	845	1394.

Wie zu sehen ist, können die erforderlichen Verbrennungsluftmengen mit der realisierten Verbrennungsluftverteilung bei ausreichenden Reserven bereitgestellt werden.

Zur Optimierung der Parameter für die Steuerung der Verbrennungsluftzufuhr war großer Zeitaufwand notwendig. Ursache ist die gegenseitige Beeinflussung der Stellgrößen der realisierten Verbrennungsluftverteilung. Die eingeblasenen Luftmengen (Muffel, Drehplatte, Ascherost) hängen sowohl von der Leistung des Frischlüfters als auch von der Stellung der Klappe Überströmkanal ab. Eine Veränderung der Luftmengen zu den Überströmkanälen führt daher zu Änderungen auch in anderen Ofenbereichen und zu einer Umstellung des gesamten Verbrennungsprozesses.

Im Abschnitt 4.6 wird ein Vorschlag zur Umgestaltung der Verbrennungsluftzuführung gemacht.

4.5 Bewertung der zusätzlichen Verbrennungsluftzuführung - Meßergebnisse und Betriebserfahrungen

Ziel der zusätzlich installierten Möglichkeit zur Einbringung von Verbrennungsluft am Ende der Überströmkanäle war die Verbesserung des Ausbrandes. Da den Rauchgasen bereits vor dem Ascherost und der Nachbrennkammer Verbrennungsluft zugeführt wird, erhöht sich ihre Verweilzeit in Zonen mit ausreichendem Sauerstoffangebot. Höhere Temperaturen im Ausbrandbereich sollen außerdem die Mineralisierung der Asche verbessern und beschleunigen.

Zur Beurteilung der Verbesserung des Ausbrandes sollen Meßwerte von Emissionsmessungen herangezogen werden. Dabei können die Meßwerte der Abnahmemessung (5 Monate nach Inbetriebnahme, [ILK653]) für die Anlagen im Krematorium Potsdam mit den Ergebnissen der weitgehend baugleichen Einäscherungsöfen im Krematorium Meißen verglichen werden (Inbetriebnahme 1993/94, Messungen 06-12/96, [ILK625]), deren wichtigste Unterschiede in der veränderten Verbrennungsluftzuführung und der bedarfsgerechten Regelung besteht. Die durch Minderungstechnik für Dioxine/Furane und Quecksilber ergänzte Abgasreinigungsanlagen haben auf die Meßwerte für O₂ und CO keinen Einfluß, für Kohlenwasserstoffe kann dies nicht ausgeschlossen werden (Anlagenschemata im Anhang). Die Meßwerte sind nachfolgend als Stundenmittelwerte bzw. maximale Minutenmittelwerte angegeben (Normzustand, trocken, 11 % Sauerstoff):

Meßwert		Meißen	Potsdam 1	Potsdam 2
O ₂	Mittelwert	15,22	12,21	13,18
	Maximum	16,40	13,97	14,68
CO	Mittelwert	49,06	6,32	11,05
	Maximum	113,57	14,46	18,18
ges.-C	Mittelwert	1,84	1,27	2,96
	Maximum	3,80	7,01	4,52

Tab. 1: Ergebnisse von Emissionsmessungen

Wie man sieht, sind die CO-Emissionen der Anlagen in Potsdam deutlich niedriger, obwohl im Mittel weniger Sauerstoff zur Verfügung steht. Die Unterschiede zwischen den beiden Anlagen in Potsdam erklären sich durch den wesentlich längeren Rauchgaskanal der Anlage 1 zwischen Ofen und Rauchgaskühler, in dem noch hohe Temperaturen herrschen und ein weiterer Ausbrand erfolgen kann. Ein vollständiger Überblick über die Emissionen dieser Anlagen wird in den Tabellen 1 bis 3 im Anhang gegeben. Anhand der Abbildungen 11 bis 13 (Anhang) ist zu sehen, daß auch die Höhe der Konzentrationsspitzen deutlich verringert wurde.

Es zeigt sich, daß die Einäscherungsanlagen im Krematorium Potsdam die Grenzwerte des Genehmigungsbescheides und der zukünftigen Verordnung einhalten bzw. deutlich unterschreiten. Überschreitungen wurden nur bei NO_x festgestellt (max. 50 %), zukünftig ist dieser Schadstoff jedoch nicht mehr begrenzt. Die Anlagen im Krematorium Meißen müssen weiter ertüchtigt werden.

Bei Inspektionen der Einäscherungsöfen im Krematorium Potsdam wurde nach 6 Monaten Betrieb erhöhter Verschleiß an den Drehplatten, den Ascherosten und der Feuerfestausmauerung des Ausbrandbereiches festgestellt. Verglasungserscheinungen deuten auf zu hohe Temperaturen hin. Zur Sicherung der garantierten Standzeiten muß die Luftzufuhr an den Überströmkanälen so reduziert werden, daß die Emissionsgrenzwerte eingehalten, aber die ther-

mische Belastung der Materialien verringert wird. Die Reduzierung der Verbrennungsluftzufuhr kann z.B. durch Erhöhung der Luftleistung des Nachbrenners ausgeglichen werden.

4.6 Vorschlag zur Umgestaltung der Verbrennungsluftzufuhr

Bereits beschrieben wurden die Schwierigkeiten bei der Optimierung der Steuerung der Verbrennungsluftzufuhr. Die vorgeschlagene Umstellung soll dazu führen, daß die Verbrennungsluftmengen in den einzelnen Ofenbereichen unabhängig voneinander verändert werden können. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich ist, werden alle Luftabgänge am Sammler angeschlossen. Der Frischlüfter wird über einen Drucksensor so gesteuert, daß ein konstanter Druck im Sammler eingestellt wird. Als Stellgrößen wirken dann nur noch die Klappenstellungen. Eine Vergrößerung des Sammler wird das Regelungsverhalten stabilisieren. Es ist zu erwarten, daß die Optimierung der Regelung der Verbrennungsluftzufuhr deutlich vereinfacht wird.

5 Temperaturmessung

5.1 Problemstellung

Wesentliche Auswirkungen auf die Gewährleistung eines optimalen Rauchgasausbrandes hat die Zuverlässigkeit der Temperaturmessung in der Nachbrennkammer, deren Meßwerte zur Steuerung des Nachbrenners genutzt werden. Fällt die Temperaturmessung aus, muß mit erhöhten Schadstoffemissionen gerechnet werden.

Bisher erfolgt die Temperaturmessung mit NiCrNi-Thermoelementen, die ca. 2 cm in den Feuerraum hineinragen. Durch die notwendige Stahl- und Keramik-Schutzhülle ergeben sich Verzögerungen der Anzeige bei schnellen Änderungen des Betriebszustandes (z.B. Zünden eines Brenners). Trotz der Schutzhüllen haben die Thermoelemente bei Temperaturen zwischen 800 und 1300 °C nur eine Lebensdauer von ca. 3 Monaten. Der Einsatz eines deutlich teure-

ren PtRh-Thermoelements ergab eine nur geringfügig erhöhte Standzeit. Die Ursachen liegen vermutlich im ständigen Temperaturwechsel und der Rauchgaszusammensetzung.

Außerdem ist die punktuelle Temperaturmessung in Wandnähe für den Rauchgasstrom nicht repräsentativ.

5.2 Prinzip der optischen Temperaturmessung

Das Prinzip der pyrometrischen Temperaturmessung beruht auf einer optischen Strahldichtemessung. Alle Stoffe senden oberhalb des absoluten Nullpunkts eine elektromagnetische Strahlung aus, deren Intensität und Wellenlängenverteilung in erster Linie von der Temperatur abhängig ist. Eine ausschließliche Abhängigkeit der Strahldichte von der Temperatur liegt nur bei einem idealen Strahler (Schwarzer Strahler) vor. Bei einem realen Meßobjekt existieren weitere Einflußgrößen, von denen der Emissionsgrad die größte Bedeutung hat. Er beschreibt die thermophysikalischen Eigenschaften und wird zur Korrektur des Meßergebnisses herangezogen.

Im Gegensatz zu festen Körpern strahlen gasförmige Medien nur in bestimmten, schmalen Spektralbereichen, sie haben charakteristische Emissionsbanden. Bei der Gastemperaturmessung ist praktisch keine Emissionsgradkorrektur notwendig. Außerdem sind Gase Volumenstrahler, d.h. die Temperatur wird über eine gewisse Meßstrecke innerhalb des Gasvolumens gemittelt gemessen.

5.3 Strahlungspyrometer KT 15.69 D

Das Strahlungspyrometer KT 15.69 D ist speziell für die Temperaturmessung heißer Verbrennungsgase konzipiert und arbeitet in einem Wellenlängenbereich, in dem CO und CO₂ bei hohen Temperaturen eine hohe Strahlungsintensität aufweisen. Dadurch kann durch kühle Gasanteile (z.B. Spülluft) hindurch gemessen werden, ohne die Meßgenauigkeit zu beeinflussen. Die Gaszusammensetzung hat ebenfalls keinen Einfluß auf das Meßergebnis, solange CO oder CO₂ vorhanden sind [HEITRONICS96a].

Technische Daten des Strahlungspyrometers KT 15.69 D [HEITRONICS96b]:

Meßbereich	200...2500 °C
Einstellzeit	1 s
Objektiv	K7 (Fernobjektiv, Material CaF ₂)
Genauigkeit	± 0,5 °C + 0,7 % der Differenz zwischen Meßobjekt und Gehäusetemperatur; zwischen ± 3 K (400 °C) und ± 10,5 °C (1500 °C)
Temperaturauflösung	bei Einstellzeit 1 s und Detektortyp C in Abhängigkeit von der Strahlertemperatur zwischen 1,6 K (400 °C) und 0,7 K (1500 °C)
Langzeitstabilität	besser als 0,1 % der absoluten Meßtemperatur in Kelvin/Monat < 1,5 K/Monat
Meßfelddurchmesser	für Fernobjektive typisch ø 20...30 mm bei 1 m Meßabstand
Analogausgang	4...20 mA
Umgebungstemperatur	0...60 °C, mit Kühlmantel bis 400 °C
Schutzart	IP 65 (DIN 4005)
Gewicht	ca. 0,55 kg

5.4 Installation und Anbindung an die Steuerung

Das Meßprinzip erfordert freie Sicht auf die brennenden Rauchgase in der Nachbrennkammer. In die Rückwand des Einäscherungs-ofens wurde eine entsprechende Öffnung eingebracht (s. Anhang). Nach außen führt ein Luvo-Rohr (Keramik, ø 80/40 mm), an dem die Befestigung des Pyrometers problemlos möglich ist. Die Justierung der optischen Meßachse erfolgt anhand der Vor-Ort-Anzeige der Temperatur durch Suchen des Maximums. Hilfsmittel (z.B. Pointergeräte) sind nicht erforderlich. Zum Schutz des Gerätes vor Überhitzung und Verschmutzung wurde ein Spülluftaufsatz installiert.

Die realisierte Meßanordnung bietet gegenüber der bisherigen Temperaturmessung mit Thermoelementen verschiedene Vorteile:

- praktisch kein Verschleiß, geringer Wartungsaufwand, geringe Betriebskosten
- langzeitstabil
- schnelle Ansprechzeit.

Die Anbindung an die Steuerung erfolgt über ein Standardsignal 4...20 mA. Die Signalauflösung der Übertragungstrecke erfordert mit ca. 0,007 mA/°C (entsprechend 140 °C/mA) eine hohe Meßgenauigkeit der Analog-Eingabebaugruppen der Steuerung (hier Siemens SPS). Durch Herabsetzen des Meßbereichs z.B. auf 200...1600 °C könnten diese Anforderungen verringert werden (0,01 mA/°C). Im Rahmen der in diesem Einsatzfall erforderliche Genauigkeiten kann jedoch die installierte Lösung als ausreichend angesehen werden. Die vom Hersteller optional angebotene digitale Signalübertragung hätte eine teure Aufrüstung des vorhandenen Steuerungssystem bedingt, ist aber bei Neuaufbau einer Steuerung eventuell einsetzbar.

5.5 Ergebnisse der Erprobung

In den Abbildungen 3 und 4 sind gemessene Temperaturverläufe vergleichend dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die Temperaturen der Rauchgase in der Phase der heftigsten Verbrennung (10..15 min nach Einfahren) deutlich höher als bisher gemessen. Im weiteren Verlauf der Einäscherung gelangen weitgehend ausgebrannte Rauchgase in die Nachbrennkammer, die Gastemperatur wird geringer. Wegen der Wärmespeicherung der Wand, in deren Nähe mit dem Thermoelement gemessen wird, ergeben sich dort zu hohe Meßwerte.

Nach ca. 6monatigem Einsatz des Pyrometers kann festgestellt werden:

- Die Temperatur der Rauchgase wird als Mittelwert entlang der optischen Meßachse bestimmt und weicht teilweise erheblich von den Ergebnisse des Thermoelements ab. Es ist davon auszugehen, daß dadurch genauere Messungen realisiert werden.

- Die Beeinflussung des Meßwertes durch die Temperatur der Feuerraumwand ist durch die selektive Messung auf den Emissionsbanden von CO und CO₂ ausgeschlossen. Es wird eine tatsächliche Rauchgastemperatur ermittelt.
- Bei kurzzeitigen Überdruck im Einäscherungssofen kam es durch Verschmutzung der Linse zum Ausfall des Pyrometers. Die Reinigung ist leicht möglich.
- Die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Temperaturmessung wirkt sich positiv auf die Betriebssicherheit der Einäscherungsanlage aus.
- Im Erprobungszeitraum mußten bereits zwei Thermoelemente ersetzt werden. Ein Defekt am Pyrometer trat nicht auf.

5.6 Wirtschaftlichkeit

Die optische Temperaturmeßtechnik hat im Verhältnis zur Messung mit Thermoelementen einen hohen Preis. Vom Hersteller wurde das Pyrometer mit Zubehör wie unten folgt angeboten. Es wurde ein Rabatt von 5 % auf den Listenpreis gewährt. Der Mehraufwand zur Herstellung der Öffnung in der Nachbrennkammer und der Befestigung für das Pyrometer ist bei der Errichtung eines Einäscherungssofens relativ gering. Der Anschluß der Spülluftversorgung kann an der direkt benachbarten Spülluftleitung des Nachbrenners erfolgen. Der Anschluß an das Steuerungssystem verursacht gegenüber einem Thermoelement keine erhöhten Aufwendungen. Kosten durch Wartung entstehen nicht. Eine u.U nötige Reinigung kann durch das Bedienpersonal erfolgen. Die zusätzlich entstehenden Kosten werden wie folgt kalkuliert (Preisangaben ohne Mehrwertsteuer):

Strahlungs-pyrometer KT 15.69 D	5535,-
Transformator T19	260,-
Freiblasaufsatz für Objektiv	330,-
Preis Pyrometer	6125,-
abzüglich 5 % Rabatt	5818,75
Einbau	500,-
zusätzliche Kosten	6318,75.

Dem gegenüber stehen Kosten für den Austausch defekter Thermoelemente von jeweils 300,-, wenn der Austausch im Rahmen anderer Wartungsarbeiten erfolgt und die Anreise nicht verrechnet wird. Erfahrungsgemäß muß ein Austausch des Thermoelementes aller 3 Monate erfolgen und es ergibt sich für den

Austausch defekter Thermoelemente 1200,-/a.

Berücksichtigt man, daß das Pyrometer theoretisch keinem Verschleiß unterliegt und unterstellt störungsfreien Betrieb, gleichen sich die erhöhten Aufwendungen gegenüber der Messung mit Thermoelementen nach 5,25 Jahren aus. Zusätzlich werden Störungen, die auf defekte Thermoelemente zurückzuführen sind, sicher vermieden.

6 Nutzung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden von der Fa. Paul A.F. Schulze GmbH bei der Errichtung von neuen Einäscherungsöfen umgesetzt.

Die zusätzliche Verbrennungsluftzufuhr im Unterofen muß so verlagert werden, daß die thermische Belastung der Feuerfestmaterialien im Ausbrandbereich vermindert wird. Geeignet erscheint der Eintritt in die Nachbrennkammer. Außerdem sollte die Nachbrennkammer vergrößert werden.

Um Einäscherungsanlagen zu möglichst günstigen Preisen liefern zu können, wird die Messung der Temperatur der Nachbrennkammer auch weiterhin mit Thermoelementen angeboten. Optional wird die Fa. Schulze ihren Kunden die Installation eines Pyrometers unter Hinweis auf die Vorteile dieser Messung empfehlen.

Die Gesetzeslage zwingt jedoch auch Betreiber bestehender Einäscherungsanlagen, Maßnahmen zur Emissionsminderung zu ergreifen. Die Feuerfestausmauerung der Einäscherungsöfen unterliegt in Abhängigkeit von den Einäscherungszahlen einem Verschleiß. Im Rahmen einer notwendigen Sanierung der Nachbrennkammer können die Öffnung für das Pyrometer und Möglichkeiten zur Luftzuführung ohne wesentliche Erhöhung der Kosten eingebracht werden.

Damit kann ein Beitrag zur Emissionsminderung auch bestehender Anlagen erbracht werden.

7 Zusammenfassung

- Die zusätzlich eingebrachte Möglichkeit der Verbrennungsluftzufuhr in den Überströmkanälen führt zu einer deutlichen Verbesserung des Ausbrandes der Rauchgase und Verminderung der Emissionen.
- Die aufgetretenen zu hohen Temperaturen im Ausbrandbereich, verbunden mit thermischer Überbeanspruchung von Drehplatte, Ascherost und Feuerfestausmauerung, erfordern eine Nachoptimierung. Die in den Überströmkanälen zugeführte Luftmenge muß reduziert werden. Ein Ausgleich kann durch Erhöhung der Luftleistung des Nachbrenners erfolgen.
- Eine Umgestaltung der Verbrennungsluftzufuhr zur Vereinfachung der regelungstechnischen Optimierung wird vorgeschlagen.
- Das erprobte optische Verfahren zur Temperaturmessung in der Nachbrennkammer mittels Strahlungs-pyrometer ist unter den Bedingungen eines Einäscherungs-ofens einsetzbar.
- Die wahren Rauchgastemperaturen werden aufgrund der Spezifik des Meßverfahrens besser erfaßt. Einflüsse durch die Temperatur der Feuerraumwände ausgeschlossen. Anstelle der punktuellen Messung mit dem Thermo-element wird ein Mittelwert der Temperatur über den optischen Meßweg bestimmt.
- Den hohen Anschaffungskosten stehen Verschleißfreiheit und Wartungsarmut gegenüber. Die erhöhten Kosten im Vergleich zum Einsatz der kurzlebigen Thermo-elemente gleichen sich innerhalb von 5,25 Jahren aus. Neben der Kostenbetrachtung muß auch die erhöhte Betriebssicherheit berücksichtigt werden.
- Die Ergebnisse werden von der Fa. Schulze bei der Errichtung neuer Anlagen genutzt. Eine Umrüstung bestehender Anlagen ist im Rahmen von Reparaturarbeiten möglich.

Literatur

[4. BImSchV]

Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungspflichtige Anlagen - 4. BImSchV) vom 24.07.1985 (BGBl. I S. 1586), zuletzt geändert am 26.10.1993 (BGBl. I S. 1782, ber. 2049) 4

[AIB95]

Amt für Immissionsschutz Brandenburg, Genehmigungsbescheid Krematorium Potsdam, G - 6 - 012/94 vom 21.02.95 4

[BImSchG]

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG) vom 14.05.1990 (BGBl. I . 80), zuletzt geändert am 27.06.1994 (BGBl. I S. 1440) 4

[E§23VO96]

Entwurf einer Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung und zur Änderung der Verordnung über genehmigungspflichtige Anlagen, 07/96 5

[GONSCHIOR86]

Gonschior, K.: Wärmetechnische Berechnung und Wärmebilanz der Einäscherungsanlage in Berlin-Baumschulenweg, Berlin 1986 12

[HEITRONICS96a]

Fa. Heitronics; "Abgastemperaturen bestimmen ?!"; Firmenschrift 1996 18

[HEITRONICS96b]

Fa. Heitronics, Datenblatt KT 15 D Serie 19

[ILK625]

Emissionsmessungen an Einäscherungsanlagen im Krematorium Meissen, Meßbericht Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, ILK-B-7/96-625 14

[ILK653]

Emissionsmessungen an Einäscherungsanlagen im Krematorium Potsdam. Meßbericht Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, ILK-B-7/97-653 14

[RPD94]

Regierungspräsidium Dresden; Genehmigungsbescheid Krematorium
Meißen 64-8823.22-11 vom 26.08.94 4

[TA Luft]

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissions-
schutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft -
TA Luft) vom 27.02.86 (GMBI. S. 95) 4

[VDI3891]

VDI-Richtlinie 3891; Emissionsminderung Einäscherungsanlagen
(08/92) 3

[VOGG95]

Vogg, H.; PCDD/PCDF und Abfallverbrennung; Organohalogen Com-
pounds 22(1995) 6

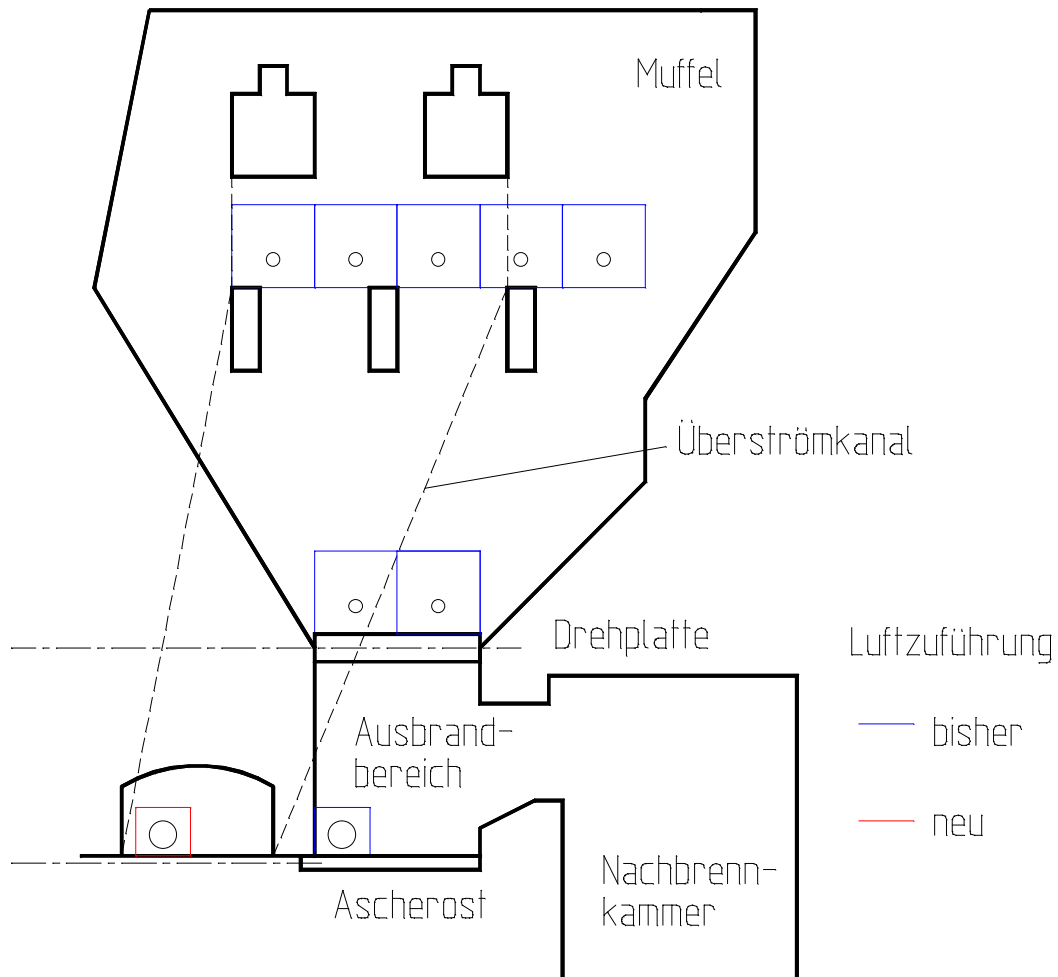


Abb. 1: Einäscherungs-ofen mit Luftzuführung, schematisch

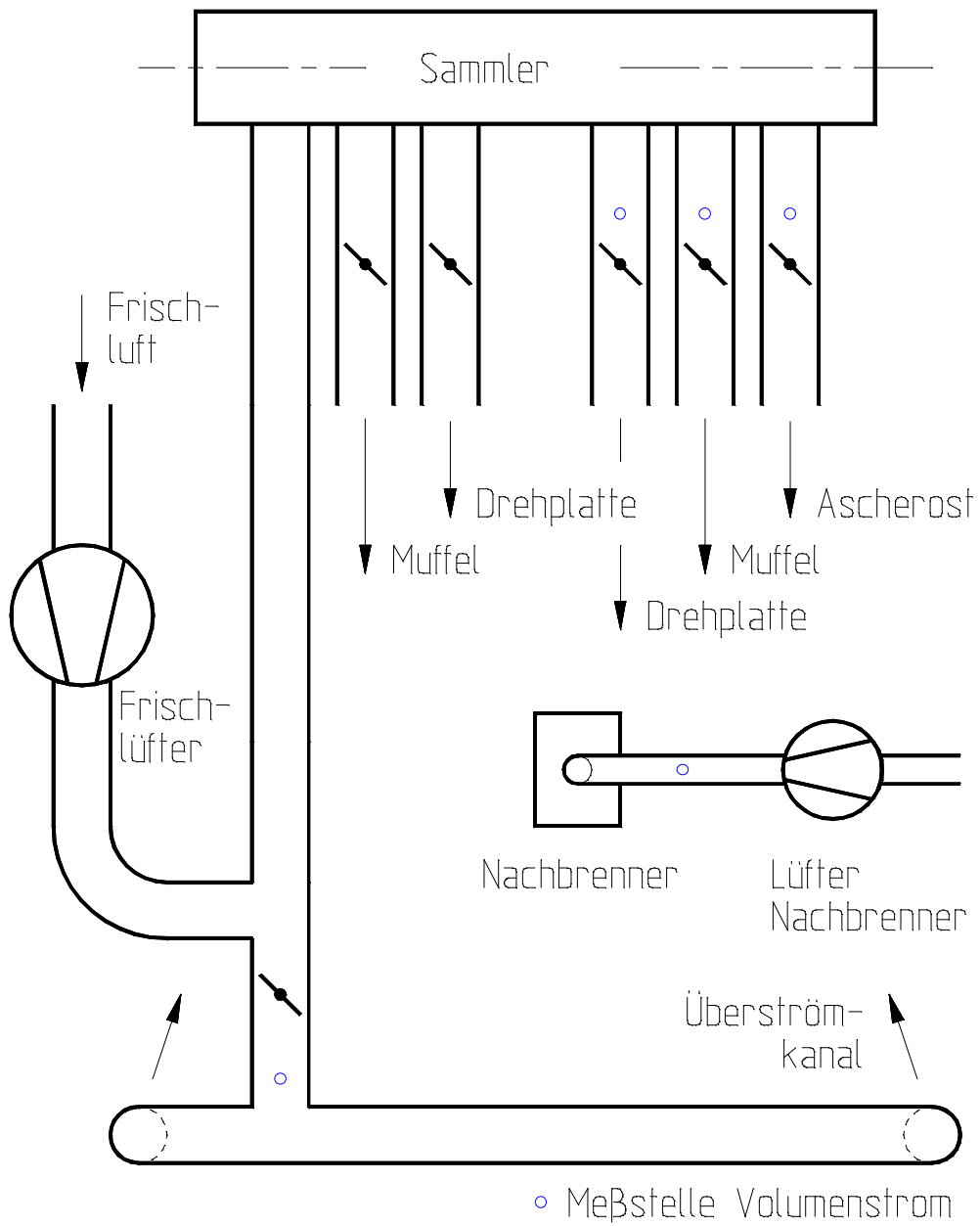


Abb. 2: Realisierte Verbrennungsluftverteilung

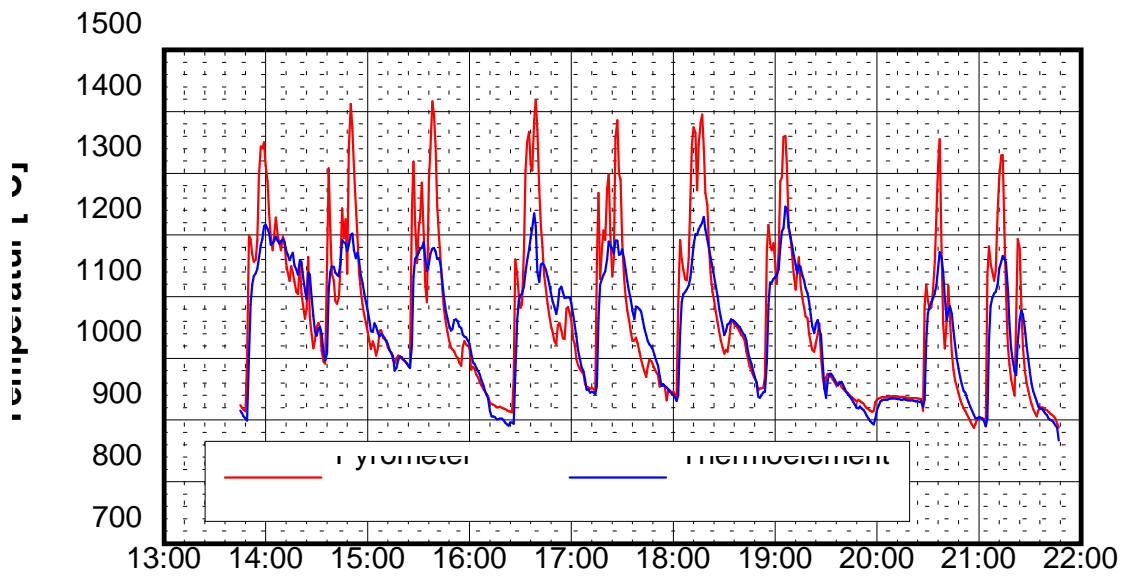


Abb. 3: Temperaturverlauf in der Nachbrennkammer

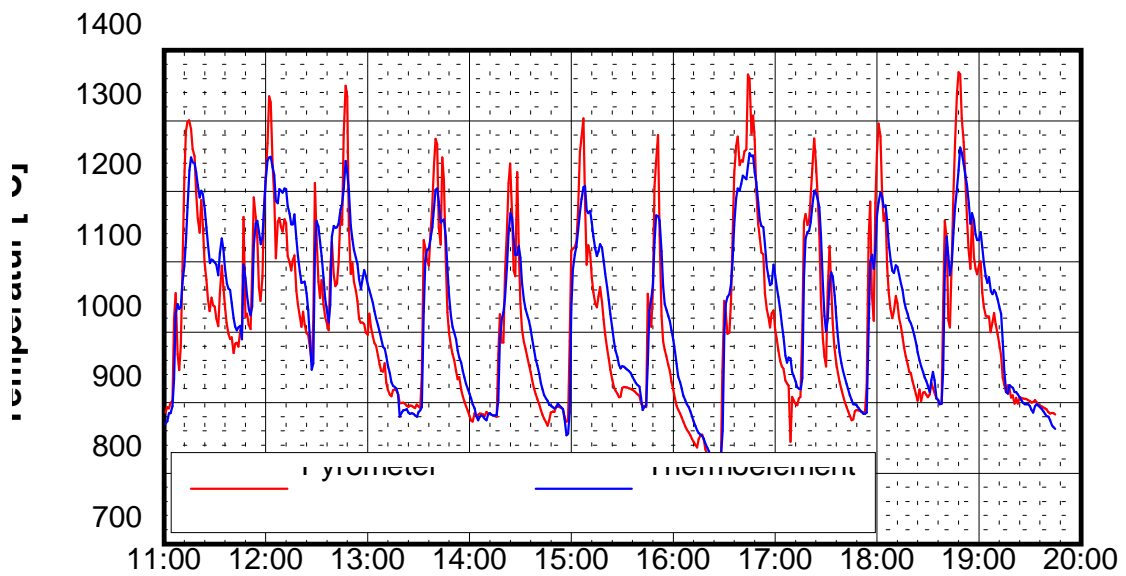


Abb. 4: Temperaturverlauf in der Nachbrennkammer

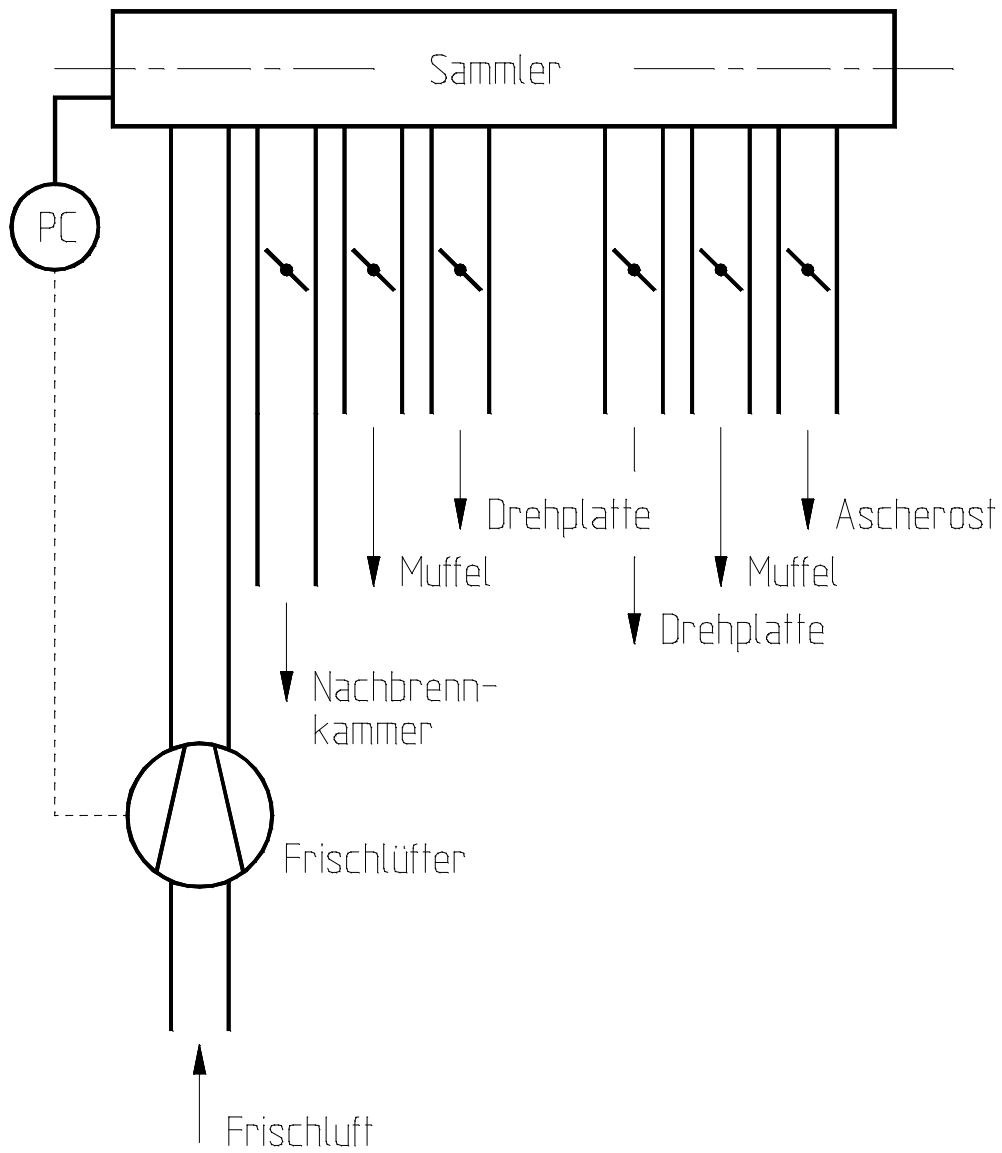


Abb. 5: Vorschlag für die Umgestaltung der Verbrennungsluftzufuhr

Anhang

Verbrennungsluftmengen	A2
Einbau des Pyrometers	A5
Schemata der Einäscherungsanlagen in den Krematorien Potsdam und Meißen	A8
Ergebnisse von Emissionsmessungen	A10

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Verbrennungsluft Muffel	A2
Abb. 2: Verbrennungsluft Drehplatte	A3
Abb. 3: Verbrennungsluft Überströmkanal	A3
Abb. 4: Verbrennungsluft Ascherost	A4
Abb. 5: Luftmengen der Brenner	A4
Abb. 6: Wanddurchbruch	A5
Abb. 7: Einbaulage des Pyrometer	A6
Abb. 8: Einbaulage des Pyrometers	A7
Abb. 9: Schema der beiden Einäscherungsanlagen im Krema- torium Potsdam	A8
Abb. 10: Schema der Einäscherungsanlagen im Krematorium Meißen	A9
Abb. 11: Konzentrationsverläufe O ₂ , CO, ges.-C, Potsdam	A13
Abb. 12: Konzentrationsverläufe O ₂ , CO, ges.-C, Potsdam	A14
Abb. 13: Konzentrationsverläufe O ₂ , CO, ges.-C, Meißen	A15
Abb. 14: Konzentrationsverläufe O ₂ , CO, ges.-C, Meißen	A16

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Meß- und Berechnungsergebnisse, Krematorium Potsdam, Anlage 2	A10
Tab. 2: Meß- und Berechnungsergebnisse, Krematorium Potsdam, Anlage 1	A11
Tab. 3: Meß- und Berechnungsergebnisse, Krematorium Meißen	A12

Verbrennungsluftmengen

Im Ruhezustand des Ofens wurden Messungen der durchsetzbaren Verbrennungsluftmengen in Abhängigkeit von den Leistungen der Lüfter und den Klappenstellungen durchgeführt (Prandtl'sches Staurohr, Schrägrohrmanometer).

Die Klappenstellung sind wie folgt bezeichnet:

- P1 Erste Verbrennungsphase
 Klappe Muffel geschlossen
 Klappe Drehplatte geöffnet
- P2 Zweite Verbrennungsphase
 Klappe Muffel geöffnet
 Klappe Drehplatte geschlossen
- 0°/90° Stellung der Klappe Überströmkanäle

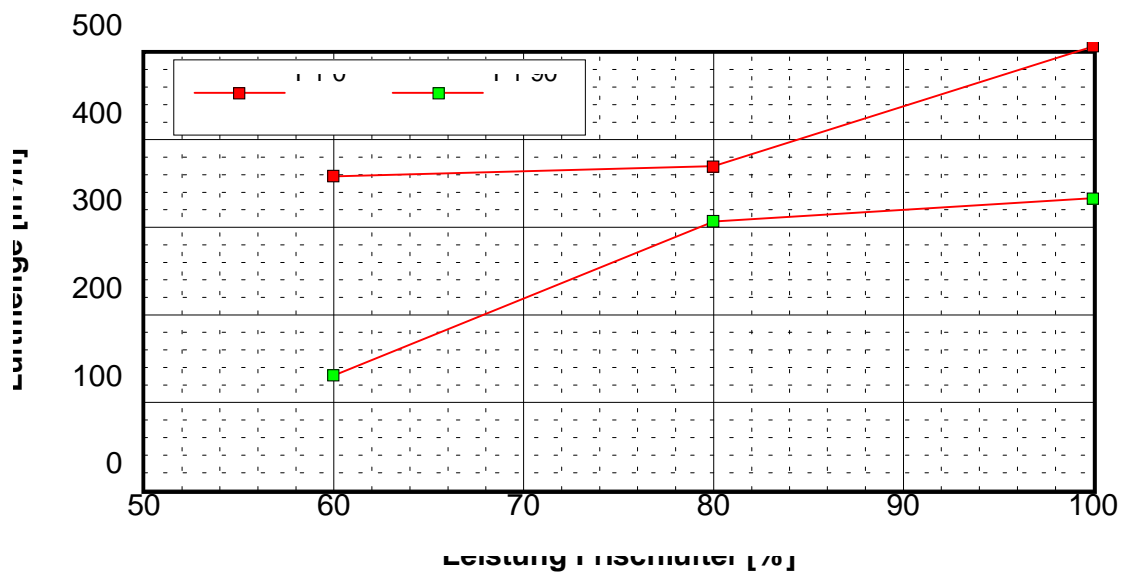


Abb. 1: Verbrennungsluft Muffel

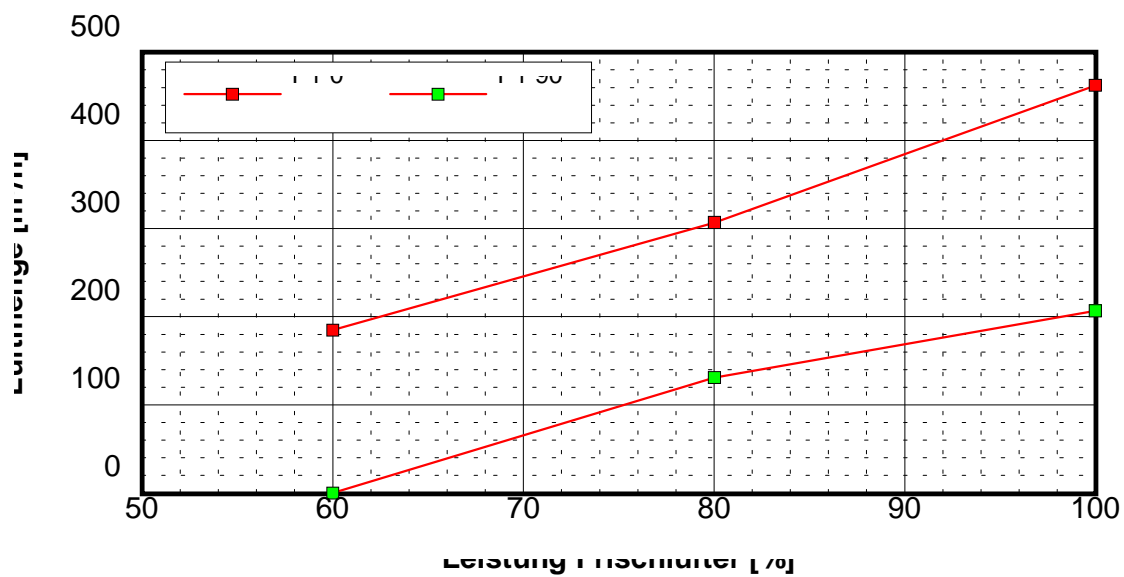


Abb. 2: Verbrennungsluft Drehplatte

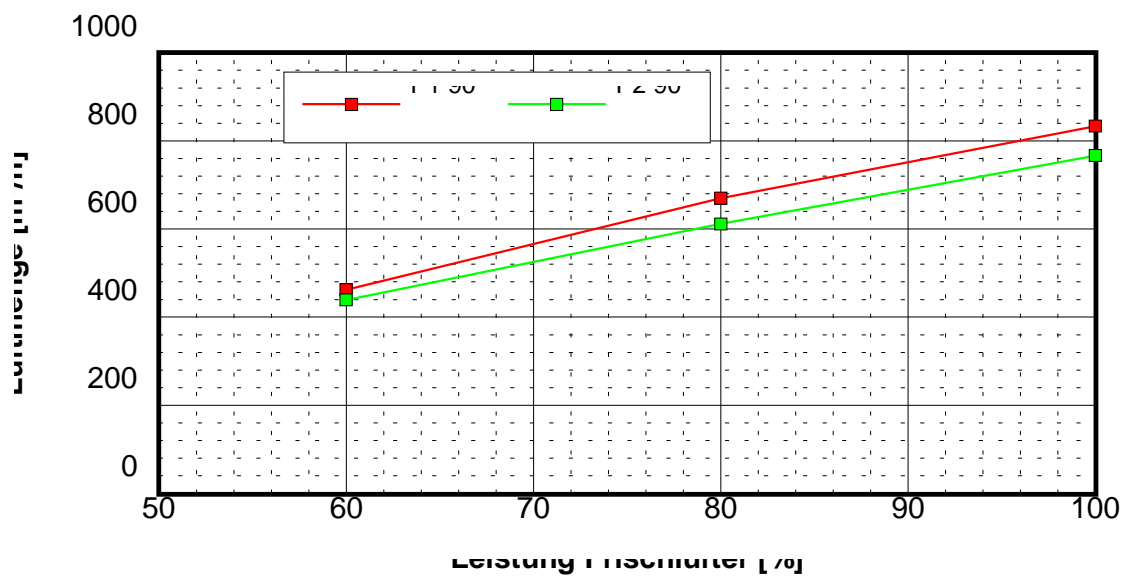


Abb. 3: Verbrennungsluft Überströmkanal

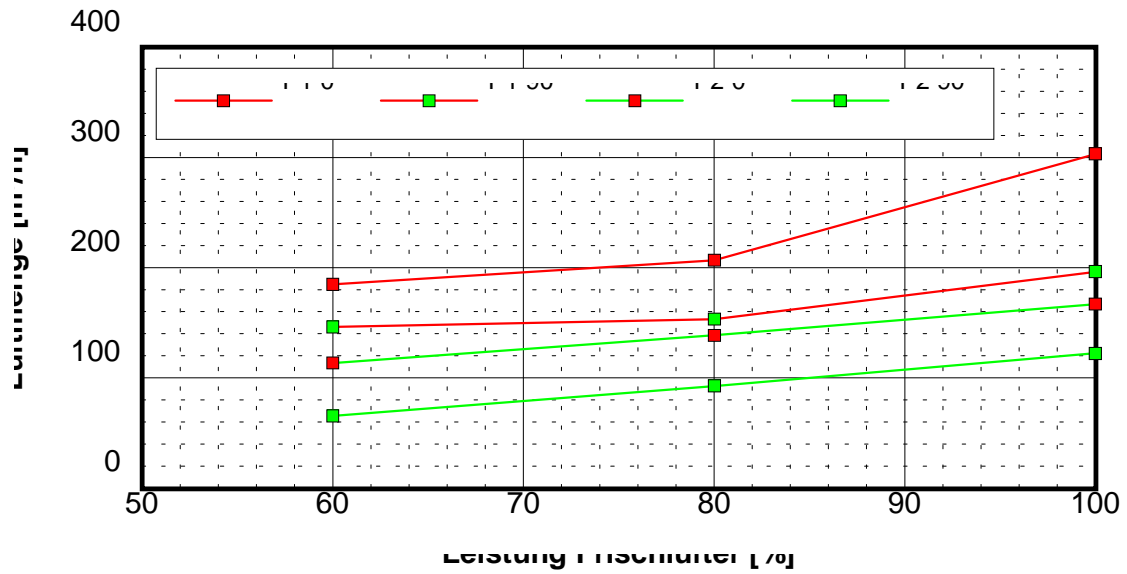


Abb. 4: Verbrennungsluft Ascherost

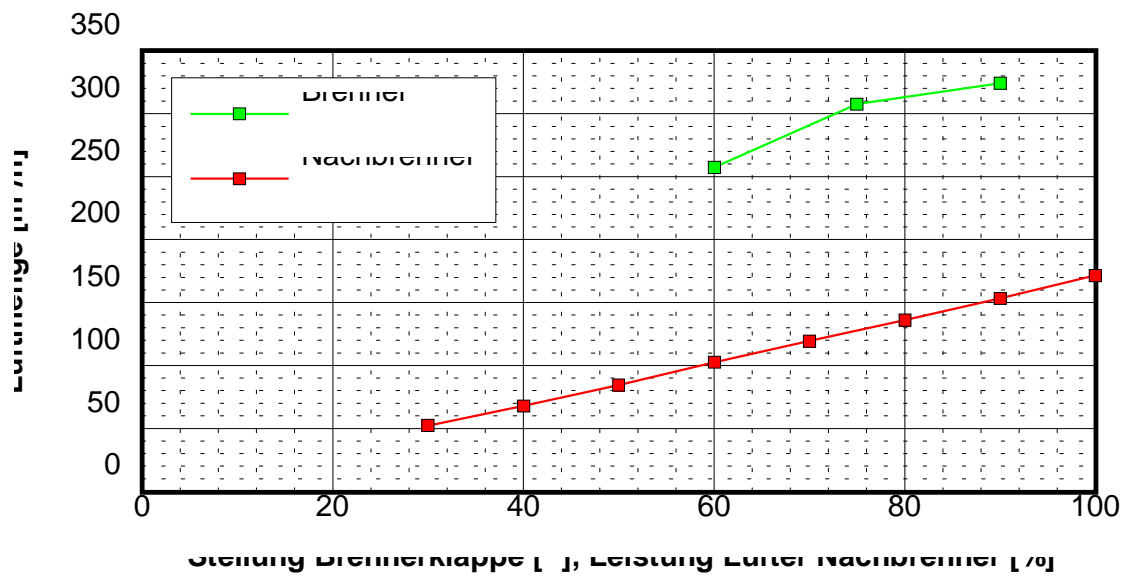


Abb. 5: Luftmengen der Brenner

Einbau des Pyrometers

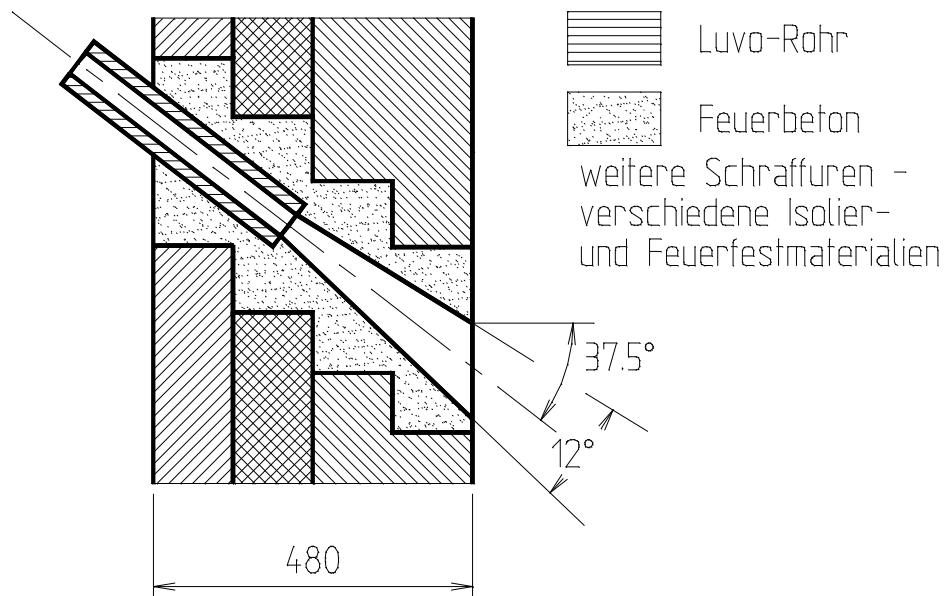
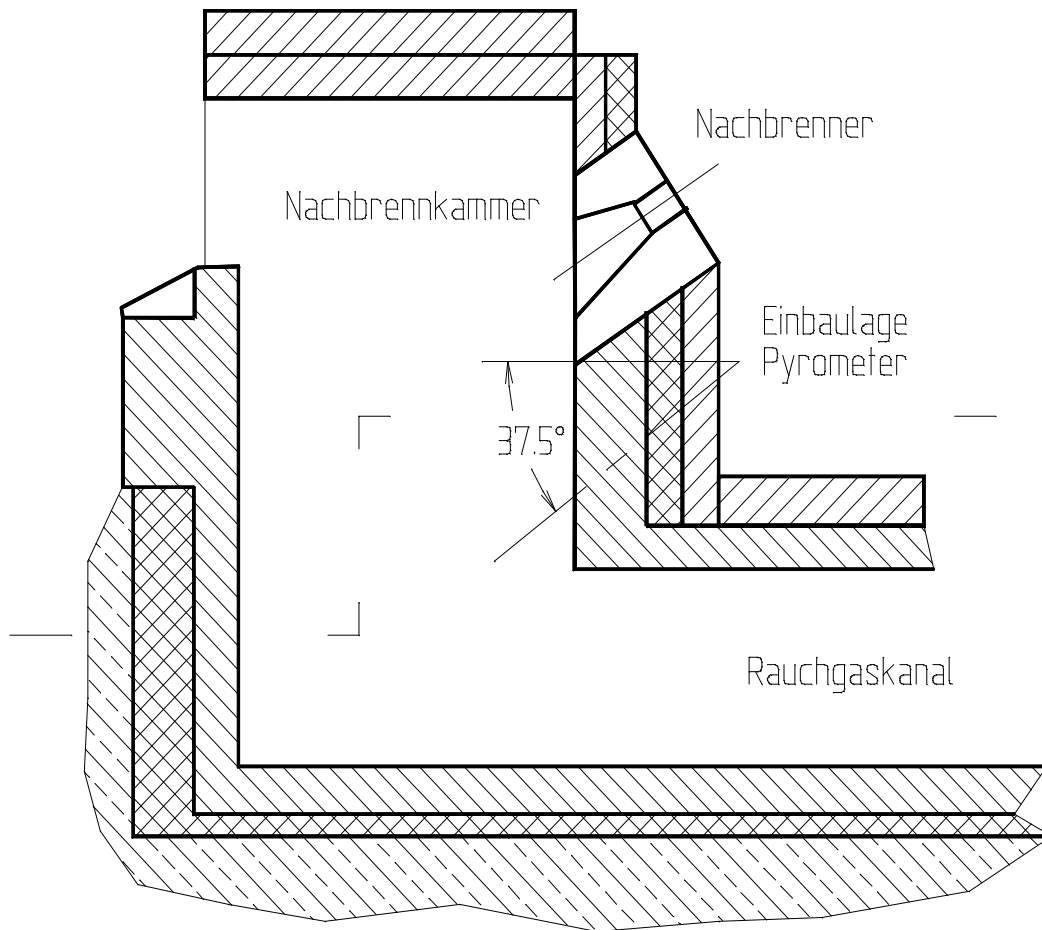


Abb. 6: Wanddurchbruch



Schraffuren - verschiedene Feuerfest- und Isoliermaterialien

Abb. 7: Einbaulage des Pyrometers

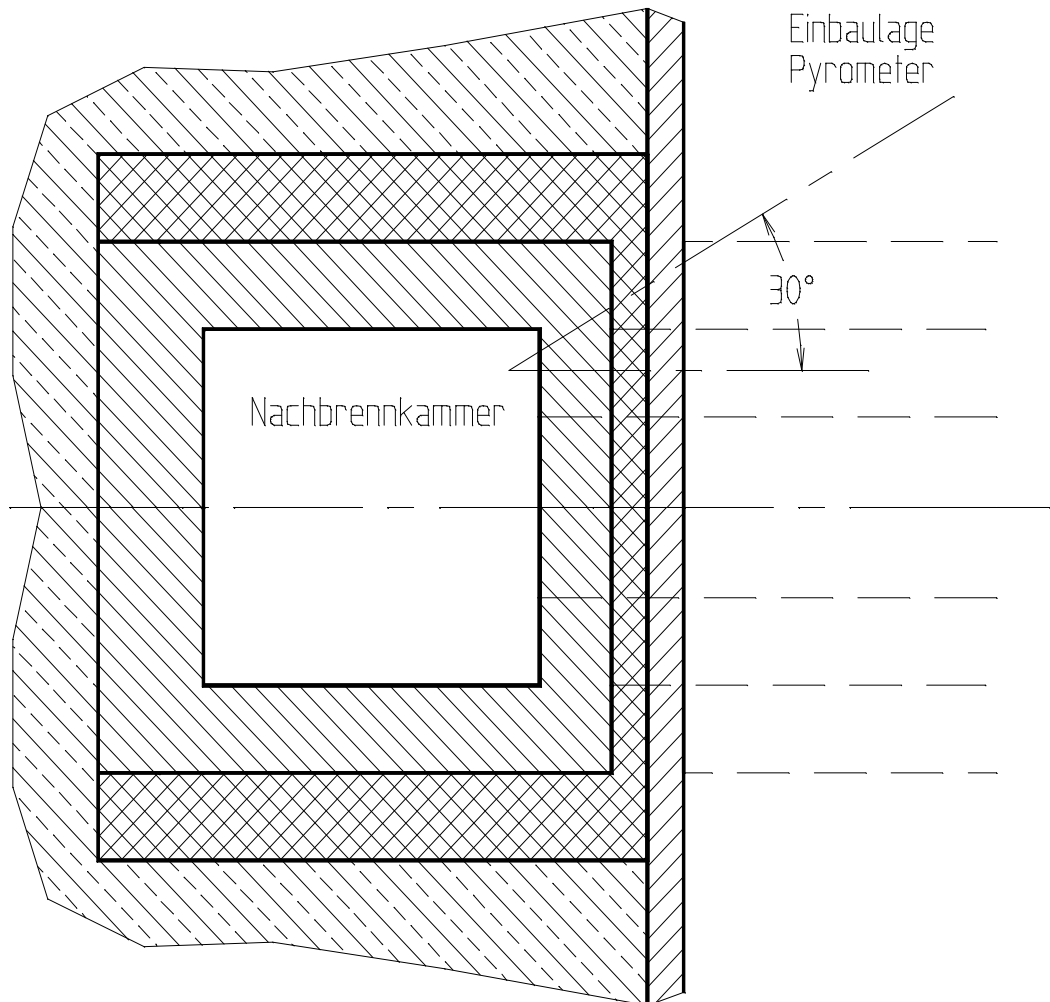


Abb. 8: Einbaulage des Pyrometers

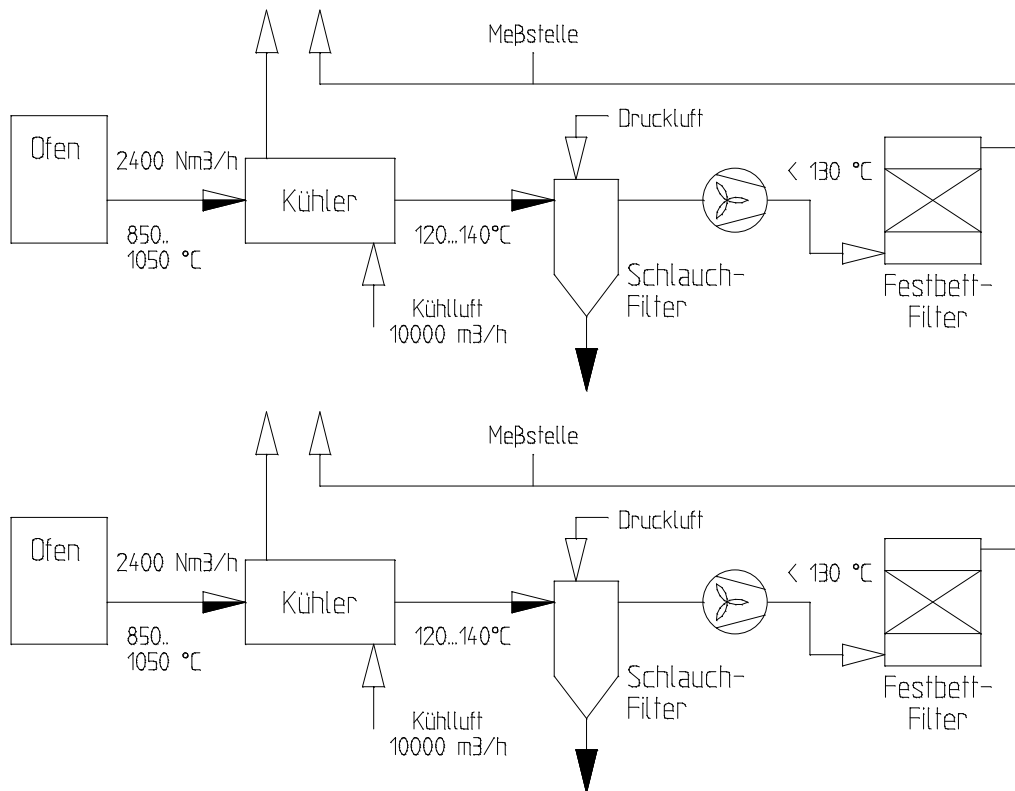


Abb. 9: Schema der beiden Einäscherungsanlagen im Krematorium Potsdam

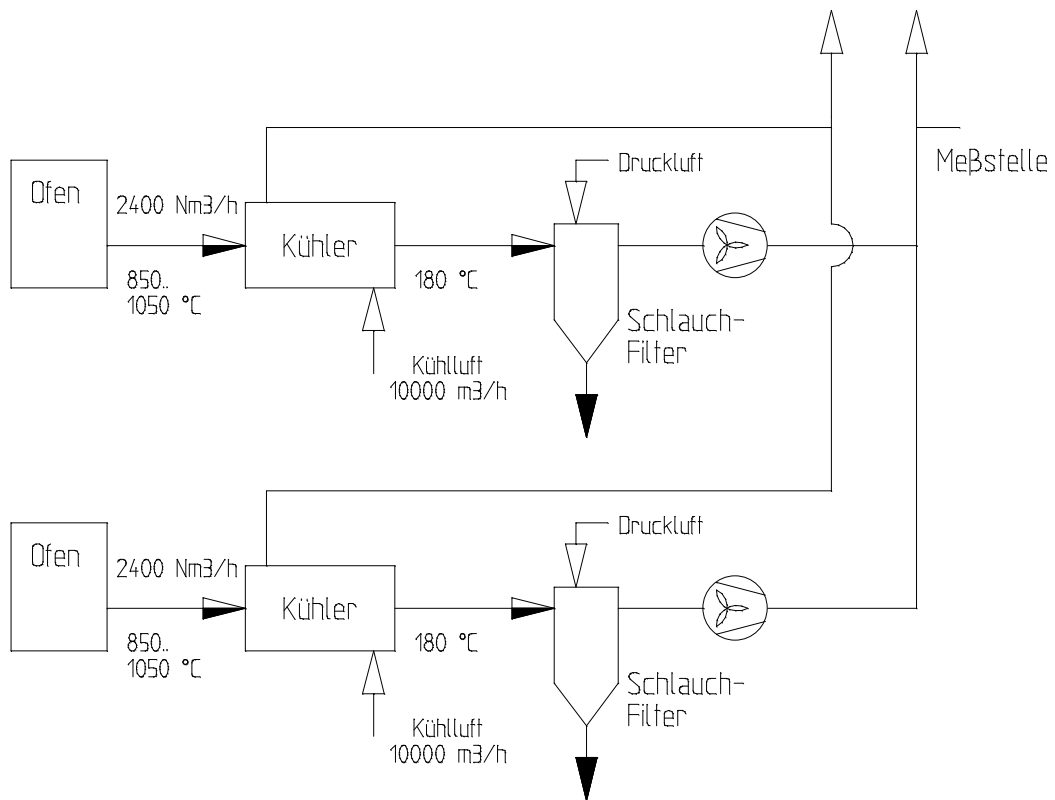


Abb. 10: Schema der Einäscherungsanlagen im Krematorium Meißen