

Verfahrenstechnische Betrachtungen zu modernen Kremationsanlagen

Für alle...

... die den Kopf schütteln werden...

Nehmen Sie in diesem Fall die aus Ihrer Sicht zweifelhaften Aussagen des Artikels nicht ganz so ernst und vor allem nicht persönlich. Wenn Sie genau wissen, dass Sie Recht haben, dann ist es so.

... die den höchsten wissenschaftlichen Anspruch ergründen wollen....

Es sollen den abschweifenden Gedanken Freiräume geschaffen werden. Ein wissenschaftlich perfektes Werk würde moderne Ansichten voraussetzen, die einer erkonservativen Grundstimmung widersprechen würden. Der Streber ist der erste Mörder.

... die alles glauben oder bezweifeln...

Jeder Mensch äußert alles Mögliche. Ist man im Unrecht, soll man zweifeln. Hat man Recht, wäre es schade, nicht zu glauben. Suchen Sie den eigenen Mittelweg, auf dem Sie sich sicher und bequem bewegen können.

... die auf jeden Fall diskutieren möchten...

Entwickeln Sie für uns alle die Thematik weiter. Doch wenn Sie keine Gegenposition beziehen, existiert kein Anlass für stundenlange Ausschweifungen.

... die den Zeitgeist vermissen...

Der Zeitgeist bewegt sich wellenweise und wird nach einiger Zeit verschwinden. Seine Besonderheiten im kollektiven Empfinden und Denken prägen die Ideale und Moralvorstellungen der einzelnen Epochen. Man wird von ihm geblendet aber nicht erleuchtet.

... die nach Quellenangaben suchen...

Lernen und Leben brennen viele Fakten und Erfahrungen ins Gehirn, die man mit seinen Vorurteilen vergleicht und anschließend soweit verbiegt, bis sie ins eigene Weltbild passen. Nur so erlangt man die Möglichkeit, dieses Wissen auch abzurufen.

Die wenigen Zahlen, die das übliche Allgemein- bzw. angeeignete Fachwissen übersteigen, wurden in der freien Enzyklopädie des Internets gesucht und gefunden. Ansonsten bot sich bezüglich abschweifender Gedanken die Skandalpresse als Quelle regelrecht an.

Sollte trotzdem jemand seine Schutzrechte verletzt sehen, wird er gebeten, dies friedlich mitzuteilen, ohne gleich einen Rechtsbeistand mit der Klärung zu beauftragen. Es wird versprochen, dass in diesen Fällen Abhilfe geschaffen wird. Auf das Impressum des Internetauftritts wird in diesem Zusammenhang ausdrücklich verwiesen.

... die zitieren möchten...

Denen sei es gestattet, ohne Rücksprachen und Genehmigungen die gewünschten Abschnitte zu kopieren, weiter zu bearbeiten und dort einzufügen, wo es von Nutzen erscheint. Haftungsansprüche, die sich durch Verwendung dieses Materials ergeben, werden allerdings ausgeschlossen.

Jörg Schaldach

1 Erdbestattung oder Feuerbestattung	5
1.1 Das Vergehen im Erdreich und in der Flamme	5
1.2 Umweltdiskussionen zu Friedhöfen	5
2. Grundaufbau und Funktion klassischer Einäscherungsanlagen.....	6
2.1 Der Ofen.....	6
2.1.1 Der Flachbettofen.....	6
2.1.2 Der Etagenofen	7
2.1.3 Der Elektroofen.....	7
2.1.4 Die Einäscherungszeiten	7
2.1.5 Die Nachbrennkammer	8
2.1.6 Der Schornstein.....	8
2.1.7 Der Emissionsmassenstrom	8
2.2 Die Prozesse im Ofen.....	8
2.2.1 Die Einfuhr in den Ofen	8
2.2.1.1 Quantitative Grundlagen	9
2.2.1.2 Umweltlobbyismus.....	9
2.2.2 Die Verbrennung.....	9
2.2.2.1 Verbrennungsprozess am Teilchen.....	10
2.2.2.1.1 Modell des gerichteten Stoffumsatzes	10
2.2.2.1.2 Modell des Restkerns	10
2.2.2.1.3 Modell der Partikelschrumpfung	10
2.2.2.2 Grenzen der Einäscherungsgeschwindigkeit.....	10
2.2.3 Temperaturverlauf und Energiebilanz.....	11
2.2.3.1 Die Aktivierungsenergie.....	11
2.2.3.2 Mindesttemperaturen in der Technik.....	11
2.2.3.3 Das chemische Gleichgewicht.....	12
2.2.3.4 Energetischer Verlauf der Einäscherung	12
2.2.3.4.1 Energetischer Verlauf in der ersten Verbrennungsphase.....	12
2.2.3.4.2 Energetischer Verlauf zum Beginn der zweiten Verbrennungsphase.....	12
2.2.3.4.3 Energetischer Verlauf zum Ende der zweiten Verbrennungsphase.....	12
2.2.3.4.4 Energetischer Verlauf in der Mineralisierungsphase.....	13
2.3 Emissionen und Einflussfaktoren im klassischen Ofen.....	13
2.3.1 Bildungsmechanismen von Kohlenmonoxid.....	13
2.3.1.1 Kohlenmonoxidbildung bei niedrigen Temperaturen.....	13
2.3.1.2 Kohlenmonoxidbildung bei höheren Temperaturen	13
2.3.2 Der Einfluss des Sauerstoffs auf die Verbrennung.....	13
2.3.2.1 Sauerstoff als Führungsgröße der Verbrennung	13
2.3.2.1.1 Die unterstöchiometrische Verbrennung	14
2.3.2.1.2 Die überstöchiometrische Verbrennung	14
2.3.2.1.3 Alles schon mal gesehen	14
2.3.2.2 Sauerstoffwerte im Ofen	14

2.3.2.3 Sauerstoff als rechnerische Bezugsgröße für Rauchgaswerte	15
2.3.3 Das Auftreten der Kohlenmonoxidspitzen	15
2.3.3.1 Kohlenmonoxidspitzen beim Einfahren und bei der Sargverbrennung	15
2.3.3.1.1 Spitze beim Öffnen des Muffelschiebers.....	15
2.3.3.1.2 Spitze beim Entzünden des Sarges	15
2.3.3.2 Kohlenmonoxidspitzen in der Hauptverbrennungsphase	16
2.3.3.2.1 Emissionen bei der Fettverbrennung	16
2.3.3.2.2. Emissionen bei verstärkter Fettverbrennung	16
2.3.3.2.3 Emissionen nach der Fettverbrennung	16
2.3.3.2.4 Emissionen bei technischen Handlungen	16
2.3.3.2.5 Abbau des Kohlenmonoxids in der Atmosphäre	17
2.3.4 Bildung von Ruß	17
2.3.4.1 Bildung von Ruß bei niedrigen Temperaturen	17
2.3.4.2 Chemisches Gleichgewicht zwischen Ruß und CO bei hohen Temperaturen.....	17
2.3.4.3 Vertiefende Ergänzungen	17
2.4.1 Holzasche	18
2.4.2 Weitere Schadstoffkomponenten	18
2.5 Schornstein und Rauchgaswege	18
3 Grundaufbau und Funktion moderner Einäscherungsanlagen.....	19
3.1. Die Entwicklung von Umweltnormen als Wunsch des Zeitgeistes	19
3.1.1 TA Luft aus dem Jahr 1974.....	19
3.1.2 TA Luft aus dem Jahr 1984.....	19
3.1.2.1 Bedeutung der Aerosole in der Luft	19
3.1.2.1.1 Keine Aerosole	20
3.1.2.1.2 Wenig Aerosole.....	20
3.1.2.1.3 Mittlere Konzentration von Aerosolen.....	20
3.1.2.1.4 Viele Aerosole.....	20
3.1.2.1.5 Sehr hohe Aerosolkonzentrationen.....	20
3.1.2.1.6 Aerosole und das Wetter im Elbtal/ Sachsen.....	20
3.1.3 VDI-Richtlinie 3891 aus dem Jahr 1992.....	21
3.1.4 Genehmigungspflicht 4. BImSchV (Nr. 10, 24 A.4) aus dem Jahr 1993	21
3.1.4.1 Verfolgungswahn und Logik	21
3.1.4.2. Gut für den Menschen - schlecht für die Rüben.....	22
3.1.5 Die 27. BImSchV aus dem Jahr 1997	23
3.1.6 Novellierte VDI 3891 aus dem Jahr 2001	23
3.1.7 Novellierte VDI 3891 (teilweise noch veränderbar) aus dem Jahr 2013.....	23
3.2 Die thermischen Verfahren zur Rauchgasbehandlung	23
3.2.1 Die Nachbrennkammer	23
3.2.2 Der Mineralisierungsbrenner.....	24
3.2.3 Der Einfluss des Rauchgaskanals.....	24
3.2.4 Die Wirkungsweise der thermischen Verfahren.....	24

3.2.4.1 Der Prozess der Umsetzung der Rauchgase	24
3.2.4.2 Bedeutung der Nachbrandtemperatur für die CO-Verbrennung.....	24
3.2.5. Verbrennungsprozesse hinter der Nachbrennkammer.....	26
3.3. Die ersten physikalischen Verfahren zur Rauchgasbehandlung.....	26
3.4. Physikalische Verfahren zur Rauchgasreinigung.....	26
3.5. Die chemischen und physikalisch-chemischen Verfahren	28
4. Der ökologische Rucksack zum Erreichen der Umweltziele	29
4.1. Umweltschutz und der Satz von der Erhaltung der Energie.....	29
4.2. Der ökologische Euro – ein Beitrag zur Umweltverschmutzung	29
4.3. Die Realität der ökologischen Ziele in Krematorien	30

1 Erdbestattung oder Feuerbestattung

Seit ewigen Zeiten trauern die Menschen um ihre Verstorbenen. Je nach Weltanschauung entwickelten sich die verschiedensten Bestattungsarten. Die älteste Bestattungsart ist die Bestattung in der Erde. Seit die technischen Möglichkeiten es zuließen (die Beherrschung des Feuers), wurde auch die Feuerbestattung zu einem festen Bestandteil der Bestattungskultur. Allein in Sachsen reichen die Nachweise von Feuerbestattungen über 5.000 Jahre in die Vergangenheit zurück.

Grundsätzlich ist es jedem selbst überlassen, welche Bestattungsform man für sich und seine Angehörigen wählt. Selbst ökologische Aspekte, wie sie in letzter Zeit regelmäßig in den Fokus gerückt sind, spielen bei der Wahl der Bestattungsart keine Rolle. Bei der Erdbestattung wird der Körper in ca. 20 Jahren biologisch umgesetzt, bei der Feuerbestattung erfolgt die Umsetzung innerhalb weniger Stunden - man greift mit der Feuerbestattung der Erdbestattung 20 Jahre voraus. Die Summe der Abbauprodukte ist aber bei beiden Bestattungsarten gleich.

Die Feuerbestattung hat in den letzten 100 Jahren maßgeblich an Bedeutung zugenommen. In Sachsen ist inzwischen die Einäscherung die Hauptbestattungsform, während Erdbestattungen wesentlich seltener gewählt werden. Im städtischen Bereich liegt die Einäscherungsquote noch höher. Die ländlichen Gebiete folgen dieser Tendenz mit etwa einer Generation Verzögerung. Durch die räumliche Trennung der Familien wird sich diese Tendenz auch nicht umkehren, da Urnengräber aufgrund ihrer Größe weniger aufwendig zu pflegen sind als Sarggräber.

1.1 Das Vergehen im Erdreich und in der Flamme

Das langsame Vergehen des Verstorbenen nach der Erdbestattung ist ein natürlicher Prozess - eine biologische Umsetzung von organischen Materialien - und nicht von unerklärlichen »Geheimnissen im Erdreich« umgeben. Die schrittweise Umsetzung von organischem Material kann man in vielfältiger Art und Weise in der Natur und im eigenen Umfeld beobachten: Die Blumenerde in den Blumentöpfen »verschwindet«, nicht neu belegte Komposthaufen im Garten fallen in sich zusammen. Rein wissenschaftlich betrachtet, kann die Erdbestattung am besten mit der Kompostierung verglichen werden. Der zeitliche Rahmen wird hierbei von der Natur vorgegeben. Im Laufe der Ruhezeit wird das Erdgrab in sich einsinken. Zu Beginn ist es die lockere Erde, die nach Regenfällen oder Frostperioden nachrutscht und sich allmählich verfestigt. Nach zwei bis drei Jahren ist dann das Holz des Sarges vergangen und das Grab sinkt weiter ein. Nach etwa 20 Jahren ist der Prozess abgeschlossen.

Bei der Feuerbestattung ist es ähnlich: Solange der Verstorbene von der eigenen Flamme verzehrt wird, entstehen genauso viele Abbauprodukte wie bei der natürlichen Verwesung im Erdreich. Nur der zeitliche Rahmen der Freisetzung der Abbauprodukte ist im Vergleich zur Erdbestattung geringer. Übrig bleiben bei beiden Bestattungsarten hauptsächlich Kohlendioxid, Wasser und das mineralische Knochengestütze. Zusätzliche Schadstoffe bzw. andere schädliche Umweltauswirkungen entstehen nur dann, wenn der Mensch versucht, gedankenlos in natürliche Prozesse einzugreifen.

1.2 Umweltdiskussionen zu Friedhöfen

In manchen Gegenden werden die Ruhefristen für Erdgräber auf mehr als die üblichen 20 Jahre verlängert. Durch Konservierungsstoffe, die sich im Körper im Laufe des Lebens angereichert haben, wird der Zerfallsprozess gehemmt, nicht jedoch aufgehalten. Letztendlich wird der Körper dennoch biologisch umgesetzt. Das Prinzip der Kompostierung bzw. des »langsamen Vergehens« - für das der Friedhof eine exemplarische Stätte darstellt - ist heutzutage auch Bestandteil einer politischen Debatte, wenn es um die Minimierung von Treibhausgasen geht. Tatsächlich ist es jedoch so, dass der langsame Zerfall organischer Materialien nur einen aufschiebenden Effekt bei der Reduzierung der Treibhausgase besitzt. Aus diesem Grund ist der Trend zur verstärkten Kompostierung von abbaubaren Materialien (statt diese zu verbrennen) positiv zu bewerten, stellt aber lediglich eine Zwischenlösung dar, da die organischen Materialien zeitlich versetzt umgewandelt werden. Durch umweltaktivistische Überreaktion werden inzwischen großflächig Gartenabfälle eingesammelt, zu Sammelplätzen gefahren, umgeladen, von größeren Fahrzeugen abtransportiert und zu den Kompostieranlagen gebracht. Dabei wäre es wesentlich umweltverträglicher, wenn jeder Gartenbesitzer seinen Kompost im eigenen Garten belassen würde, statt wertvolle Energie für den Transport dieser Materialien zu verbrauchen. Technische Lösungen, wie die Beschleunigung der Verwesung durch Chemikalien, klingen modern, doch werden sie die Natur nicht ersetzen können.

2. Grundaufbau und Funktion klassischer Einäscherungsanlagen

Zwar sind die Zeiten vorbei, in denen ein Krematorium lediglich aus der Feierhalle, einer Leichenhalle und den meist unterirdisch eingebauten Öfen bestand (das hierbei zugrunde liegende Konzept: Jede Bestattung findet somit unter der Erde statt). Alle Verbrennungsprozesse am Verstorbenen laufen im Einäscherungs-ofen ab. Alle weiteren nachgeschalteten Zusatzeinrichtungen sind Umwelteinrichtungen, die mit der eigentlichen Kremierung nicht im Zusammenhang stehen.



Die klassisch-ethische Betrachtung der Verbrennungsführung geht davon aus, dass der Körper von der eigenen Flamme verzehrt wird. Technisch gesehen ist es durchaus möglich, dieses Prinzip vollständig umzusetzen. Somit ist es niemals notwendig, den Körper durch den Einsatz von Brennern zu zerstören, indem sie direkt auf den Leichnam oder die Aschereste zielen. Das »Herunterbrennen« Verstorbenen mit auf sie gerichteten Brennern, verstößt gegen die klassische Moralregel. Stützbrenner, die zum Erreichen der Mindestbetriebstemperatur im Muffelbereich (als »Muffel« wird die Hauptbrennkammer bezeichnet) eingesetzt werden, sollten diesem moralischen Prinzip unterworfen sein.

2.1 Der Ofen

Geschichtlich betrachtet ist die Zeit von 1870 bis 1930 die Epoche der Entwicklung verschiedenster Öfen. Danach wurden keine wesentlichen technischen Änderungen mehr vollzogen. Es existieren zwei wesentliche Bauformen von Feuerbestattungsanlagen in Deutschland:

- Beim *Flachbettofen* erfolgt die Einäscherung auf einer Art Herdplatte. Sarg und Leichnam verbleiben während des gesamten Vorgangs im Muffel. Ist der Einäscherungsvorgang abgeschlossen, werden die Reste in die sogenannte Ausbrennkammer transportiert und dort weiter mineralisiert. Die Asche fällt später in die Auskühlzone des Ofens bzw. in die Aschemulde.
- Der *Etagenofen* ist in einen Ober- und Unterofen eingeteilt. Die Verbrennung des Leichnams erfolgt im Oberofen, während die Ausmineralisierung der Knochen (Mineralisierung ist der Abbau von organischen in anorganische Stoffe) im Unterofen stattfindet. Auch hier fällt nach der Verbrennung die Asche in den Aschekasten.

Die Beheizung von Kremationsöfen im 19. bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts erfolgte klassisch mit Kohle. Dabei wurde die Kohle in einer weiteren Kammer vergast. Das dadurch entstehende Brenngas (Kohlegas) wurde in die eigentlichen Einäscherungskammern geleitet. Die klassische Kohlebefeuerung ist heute nicht mehr zu finden. Mit der Möglichkeit der Nutzung von Gas aus dem Ferngasnetz (anfangs Stadtgas, später Erdgas) wurden die Öfen auf diese Energieträger umgestellt. Später erweiterte sich das nutzbare Energiespektrum um die Elektroenergie als Beheizungsmöglichkeit. In Flachbettöfen kann der durchschnittliche Erdgasverbrauch 40m³ bis 120m³ pro Einäscherung betragen. In Etagenöfen ist mit 20m³ bis 90m³ Erdgas zu rechnen. Allerdings existieren Etagenöfen, die aufgrund ihrer Konstruktion sogar nur 2m³ bis 10m³ Erdgas pro Einäscherung benötigen.

2.1.1 Der Flachbettofen

Im Flachbettofen verbleiben Sarg und Verstorbenen während der gesamten Einäscherungszeit im Muffel. Der Sarg liegt auf einer geschlossenen Bodenplatte. Nach Abschluss der Einäscherung werden die mineralischen Knochen und die Reste der wasserhaltigen Organe mechanisch in eine kleinere Kammer (Ausbrennkammer, Mineralisierungskammer) geschoben (Schieber). Später kühlen sie in einem Auskühlbereich ab. Von dort aus kann die Asche in einem Aschekasten (Mulde) aus dem Ofen entnommen werden. Der Abgasstrom beim Flachbettofen ist geringer, was eine kleinere Filteranlage gestattet. Die relativ niedrigen Investitionskosten für den Ofen und die Möglichkeit, diese Öfen in eingeschossigen Gebäuden unterzubringen, sind sehr vorteilhaft. Der wesentlich kleinere Flachbettofen ist im Vergleich zum Etagenofen leichter und kompakter. Gegebenenfalls kann der Ofen aufgrund seines niedrigen Gewichts schon vorkomplettiert geliefert werden. Allerdings ist die Lebensdauer kürzer als bei einem Etagenofen. Da die wesentlichen Prozesse in nur einer Kammer ablaufen, ist die Einäscherungsdauer sehr lang. Dadurch entstehen wiederum hohe Betriebskosten. Der Prozess der Mineralisierung erfolgt brennergestützt. Die Öfen besitzen ein geringes Wärmespeichervermögen, was die Aufheizzeiten des Ofens wesentlich verkürzt. Allerdings führt das niedrigere Wärmespeichervermögen während

der Einäscherung zu einem hohen Gasverbrauch. Die Vorteile des Flachbettofens überwiegen in kleinen, diskontinuierlich arbeitenden Krematorien (mit geringen Einäscherungszahlen) die Nachteile bei weitem.

2.1.2 Der Etagenofen

Der Etagenofen besteht aus mehreren übereinanderliegenden Kammern (Oberofen, Unterofen, Aschezone, Abkühlzone, Entnahmezone), die durch mechanische Einrichtungen aus hochlegiertem Stahl (Drehplatten, Roste) voneinander getrennt sind. Das Grundprinzip stellt hier die Schwerkraft dar: Der Verstorbene durchläuft die einzelnen Kammern des Ofens von oben nach unten. Bei manchen Etagenöfen sind nur drei Etagen zu finden (Oberofen, Unterofen, Ascheentnahme), in anderen Öfen durchlaufen die sterblichen Überreste zusätzliche Zwischenebenen wie Mineralisierungskammern und Abkühlzonen.

Der Sarg wird in den Muffel (Oberofen) eingefahren und auf Brückensteinen abgesetzt. Je nach Etagenofentyp erfolgt die Verbrennung in unterschiedlichen Zeiten. Nach 30 bis 90 Minuten fällt der Verstorbene vom Oberofen auf die sich darunter befindende Drehplatte. Der Feuerbestatter dreht diese Platte entweder manuell oder die Drehung erfolgt motorgetrieben und zeitgesteuert. Die Reste des Verstorbenen fallen nach der Drehung abermals nach unten und befinden sich nun im Unterofen (auch Ausbrennzone genannt), wo die Ausmineralisierung der Gebeine geschieht. Nachdem die Asche im Unterofen ausmineralisiert ist, wird sie in die Ascheentnahme transportiert. Dabei wird vorrangig mit einem System aus mechanischen Platten gearbeitet, in anderen Ofentypen sind für diese Zwecke aber auch Ascheroste eingebaut. Einzelne Öfen besitzen bis zu drei Drehplatten, die untereinander angeordnet sind. Andere dagegen sind mit nur einer Drehplatte und einem Ascherost, das als Ziehrost oder Kipprost ausgeführt sein kann, ausgerüstet. Einzelne Ofentypen benötigen neben dem Hauptbrenner einen Mineralisierungsbrenner, um die Asche vollständig auszuglühen. Der Ofen wird im kontinuierlichen Betrieb von unten nach oben (Asche ziehen → Drehplatte(n) drehen → Sarg einfahren) »freigemacht«, damit die einzelnen Aschen nicht vermischt werden.

Bedingt durch die Größe und die Höhe (über zwei Etagen) ist in einem Etagenofen viel Feuerfestmaterial verbaut. Der Etagenofen ist für Krematorien geeignet, die viele Einäscherungen vollziehen. Der Vorteil des Etagenofens ist seine Energieeffizienz und der geringe Wartungsaufwand. Die Betriebskosten sind verhältnismäßig gering. Die Abwärme, die bei der Verbrennung im Muffel entsteht, kann im Unterofen zur Ausmineralisierung der Asche genutzt werden. Durch die dickeren Schichten von Feuerfestmaterial sind die Reparaturzyklen wesentlich länger. Den niedrigen Betriebskosten stehen hier allerdings hohe Investitionskosten entgegen. Die Öfen besitzen dafür aber auch eine lange Lebensdauer.

2.1.3 Der Elektroofen

Genauer genommen ist der Elektroofen kein Ofentyp für sich, sondern die Variante der Beheizung. Elektroöfen existieren in den Formen von Flachbettöfen und Etagenöfen. Die Nachbrennkammer wird teilweise elektrisch oder bei einzelnen Modellen auch mit Gas beheizt. Für diese Öfen werden 15% als Bezugssauerstoff gegenüber 11% bei den rein gasbeheizten Kremationsöfen zur Erfassung der Umweltwerte genutzt. Der Elektroofen arbeitet sehr leise, da die Brenner fehlen. Hohes Wärmespeichervermögen und eine lange Lebensdauer hängen vom Konstruktionsprinzip des Ofens ab. Allerdings bestehen geringere Möglichkeiten zur Beeinflussung des Einäscherungsvorganges, da ein Ofen mit elektrischer Heizung träger als ein mit Gas betriebener Ofen reagiert. Die Nutzung dieser Öfen wird künftig entscheidend von der Entwicklung der Stromkosten beeinflusst werden.

2.1.4 Die Einäscherungszeiten

Aus dem Vorgenannten zeigt sich, dass bereits beim Einäscherungsprozess verfahrenstechnische Schranken existieren. Eine Einäscherung kann nur innerhalb von 90 bis 120 Minuten vollzogen werden. Selbst bei optimaler Fahrweise bestimmter Ofenausführungen dauert der Einäscherungsprozess mindestens 70 Minuten. Durch die technische Besonderheit des Etagenofens, dass die einzelnen Prozesse in zwei getrennten Kammern ablaufen können, kann zwar (in einzelnen Ofentypen) alle 35 Minuten ein Sarg eingefahren werden, die eigentliche minimale Prozessdauer liegt dennoch bei zweimal 35 Minuten (also 70 Minuten). Ein wesentliches Kriterium für die Einäscherungsgeschwindigkeit ist die technische Auslegung der Filteranlage. In Anlagen mit Filterauslegungen bis zu 10.000 Betriebskubikmetern pro Stunde (4.800 Nm³/h) sind geringe Einäscherungszeiten die Norm. In kleineren Anlagen (1.700 – 2.300 Nm³) muss durch die Reduzierung der Luftmenge die Verbrennungsgeschwindigkeit soweit vermindert werden, dass die Filteranlage einen ordnungsgemäßen Betrieb gewährleisten kann. Die maximal mögliche tägliche Einäscherungsleistung ist bei kleineren Anlagen auf zehn Sterbefälle begrenzt. Bei Hochleistungsöfen ist die Einäscherung 40 Verstorbenen pro Tag möglich. Allerdings setzen diese Anlagen eine leistungsstarke Rauchgasbehandlung voraus (große

Volumenströme). Bei klassischen Anlagen, die nur über einen Schornstein betrieben wurden, konnten diese Einäscherungsleistungen, wie sie heutzutage mit optimierten Filteranlagen erreicht werden, nicht erzielt werden.

2.1.5 Die Nachbrennkammer

Die Nachbrennkammer mit dem dazugehörigen Nachbrenner ist außerhalb des Einäscherungsbereiches angebaut und gehört nicht zum klassischen Ofen. Hier handelt es sich um ein Verfahren, um die Zusammensetzung der Rauchgase zu beeinflussen. Die Nachbrennkammer ist inzwischen ein fester Bestandteil aller Öfen. Da der Nachbrenner und die Vorgänge in der Nachbrennkammer fast keinen Einfluss auf die eigentliche Kremierung haben, soll erst später genauer auf die Bedeutung dieser Komponenten eingegangen werden.

2.1.6 Der Schornstein

Der Schornstein, regional auch Kamin genannt, war durch seine Größe ein formbestimmendes Element beim Bau der klassischen Krematorien. Meist wurde der Schornstein innerhalb der Baukörper so eingepasst, dass er sich mit dem Gebäudekomplex vereinigte. Der klassische Schornstein ist auf Feuerfeststeinen und Klinkern gemauert. Modernere Schornsteine sind aus Edelstahl gefertigt. Allerdings ist die Haltbarkeit der gemauerten Schornsteine wesentlich höher, wenn man die Rauchgastemperaturen am Schornsteinfuß (600-800°C) im klassischen Krematorium zugrunde legt.

Im Kamin treten zwei Effekte auf: Zum einen besitzt heißes Rauchgas eine geringere Dichte als die kalte Umgebungsluft und steigt somit nach oben. Zum anderen reißen diese strömenden Gase durch ihre Eigenbewegung andere Teilchen mit. In Summe ergibt sich im Schornstein ein niedrigerer Luftdruck als in der Umgebung. Die Rauchgase werden von der Feuerstelle in den Schornstein gesaugt und frische Verbrennungsluft wird dem Prozess zugeführt.

Der Auftrieb der Gase wird durch die Höhe, die geometrische Form im Schornstein und die Größe der Austrittsöffnung bestimmt. Ein wesentliches Kriterium ist die Rauchgastemperatur. Je größer die einzelnen Parameter sind, desto mehr Unterdruck entsteht.

Für den Betrieb einer Filteranlage ist dieser natürliche Zug allerdings nicht ausreichend. Hier sind die Abgastemperaturen viel zu niedrig, dass ein ausreichender Auftrieb erfolgt. Schädlich für den Schornstein ist die Kondensation der Rauchgase. Diese Erscheinungen treten unterhalb des Schwefelsäuretaupunktes auf.

2.1.7 Der Emissionsmassenstrom

In Deutschland (auch in Europa) sind Rauchgaskonzentrationen (Schadstoff pro Kubikmeter Abgas) für die Umweltbewertung relevant. Sie werden mithilfe von normierten Stundenmittelwerten statistisch erfasst. Diese Normen gelten für alle Krematorien.

Das bedeutet, dass zeitlich betrachtet die Emissionsmassenströme (Emissionen pro Kilogramm Eintrag) in den Hochleistungskrematorien wesentlich geringer sein müssen, um die Rauchgaskonzentrationen einzuhalten. Das stellt zusätzliche Anforderungen an die Rauchgasbehandlung. Andererseits kann man durch eine bewusste Verlängerung der Einäscherungszeit die Rauchgaswerte verbessern (Konzentrationsverminderung).

2.2 Die Prozesse im Ofen

2.2.1 Die Einfuhr in den Ofen

Bei einer Feuerbestattung werden durchschnittlich ein Sarg (ca. 40 kg) und ein Verstorbener (ca. 80 kg) eingeäschert. Das Sargholz besitzt einen Wasseranteil von 15%, während die Verteilung der Grundbestandteile des Menschen für eine etwa 80 kg schwere Person ca. folgendermaßen aussieht:

Wasser	69,0 %	55,2 kg
Eiweiß (C, O, H, N, S)	15,0 %	12,0 kg
Fett (C, O, H)	10,0 %	8,0 kg
Mineralstoffe (Na, K, Ca, Mg, S, P, Cl, J, Fe)	5,0 %	4,0 kg
organische Reste (Kohlenhydrate (C, O, H etc.))	1,0 %	0,8 kg

Die Masse der brennbaren Stoffe, die in Deutschlands Kremationsöfen eingefahren werden, beträgt also durchschnittlich 55 kg pro Einäscherung. Davon werden 34 kg mit dem Sarg eingebracht und der Verstorbene selbst bringt den kleineren Anteil von ca. 21 kg in den Prozess ein.

Bei der Zersetzung des Körpers in der Erde (mit Sarg) oder bei dessen Verbrennung entsteht immer dieselbe Menge an Abbauprodukten (hauptsächlich jedoch CO_2). Der Verwesungsprozess benötigt im Erdreich 20 Jahre, bei der Feuerbestattung ist die Freisetzung der Restgase unmittelbar nach der Kremierung beendet. Als sterbliche Überreste verbleiben 4 bis 6 kg mineralisches Knochengestüt (Knochenasche), die im Urnengrab die letzte Ruhe finden.

2.2.1.1 Quantitative Grundlagen

Die Sterblichkeit der Bevölkerung liegt bei 1,2% pro Jahr. 2013 betrug der deutschlandweite Einäscherungsanteil der verstorbenen Bevölkerung über 50% - Tendenz steigend. In den Neuen Bundesländern werden in städtischen Ballungsräumen Einäscherungsquoten von bis zu 95% erreicht. Betrachtet man daraufhin die Masse der brennbaren Stoffanteile, so werden in den Krematorien Deutschlands (bezogen auf Arbeitszeit an Werktagen bei etwa zwei Schichten) stündlich etwa 10 Tonnen »brennbare Substanz« (Mensch und Sarg) eingäschert. Führt man sich vor Augen, dass auch bei der Erdbestattung die gleiche Menge organischen Materials stündlich biologisch abgebaut wird, erscheinen die Dimensionen, über die man gerade spricht, relativ groß.

2.2.1.2 Umweltlobbyismus

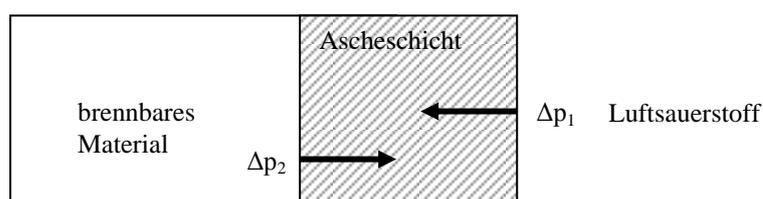
Solange die vom Zeitgeist gesteuerte Umweltideologie darauf hinausläuft, nur niedlich dreinblickende Tiere (am besten mit Puscheln auf den Ohren) als Art zu schützen, während andere Tierarten in der Bedeutungslosigkeit versinken, muss das System hinterfragt werden. So sind auch Zahlen relativ... Ein normales Großraumflugzeug verbraucht (je nach Quellenlage) zwischen 10 und 13 Tonnen Kerosin pro Stunde. Die Umweltbelastung durch ein einziges Großraumflugzeug ist insgesamt höher als die Umweltbelastung aller deutschen Krematorien bei gleichzeitigem Betrieb. Hier zeigt sich, dass psychisch-emotionale Aspekte, die bei der Kremation eines Menschen natürlich eine Rolle spielen, die umweltpolitische Bewertung der technologischen Prozesse beeinflussen können und wesentlich wichtigere Probleme des Umweltschutzes (z.B. der Luftverkehr) durch geringere Wahrnehmung (oder Lobbyistenarbeit) politisch ausgeblendet werden.

Umweltschutz ist ein gesamtgesellschaftliches Problem, bei dem jeder in seinem Bereich ein Optimum anstreben sollte. Dabei ist die anlagentechnische Lösung eine Variante. Sollte der Umweltschaden durch exzessiv ausgelebten Umweltschutz allerdings größer sein als bei Verzicht auf derartige Maßnahmen, sind diese ineffizienten Lösungsvarianten zu verwerfen.

2.2.2 Die Verbrennung

Aus der Kriminalliteratur und dem echten Leben ist bekannt, dass alle Versuche, Verstorbene vollständig unter freiem Himmel zu verbrennen, in der Regel zum Scheitern verurteilt sind. In den alten indischen rituellen Einäscherungsstätten werden zwar durchschnittlich 200 kg Holz verwendet, um die Einäscherung zu vollziehen, doch fast immer werden danach teils unverbrannte Reste dem heiligen Fluss Ganges übergeben. Selbst der Versuch, sich unliebsamer Mitmenschen in einer Erdgrube mithilfe von 200 Litern Benzin zu entledigen funktioniert nicht. Woran liegt das?

Modellieren wir den Verbrennungsprozess aus physikalisch-chemischer Sicht. Grob veranschaulicht passiert folgendes: Der Sauerstoff reagiert mit dem Brenngut, die Rauchgase entweichen und es bildet sich eine erste Schicht Asche. In der nächsten Phase muss erst der Sauerstoff durch die Ascheschicht zum Brenngut vordringen. Dort erfolgt die Reaktion, die entstandenen Rauchgase entweichen durch die Ascheschicht und es hat sich eine weitere Schicht Asche gebildet. Dabei ist schon jetzt erkennbar, dass die ausströmenden Rauchgase den eindringenden Sauerstoff behindern. Das passiert solange, bis sich der so genannte Partialdruck des einströmenden Sauerstoffs (Δp_1) mit dem Partialdruck der entweichenden Rauchgase (Δp_2) im Gleichgewicht befindet. Wenn die Ascheschicht dick genug ist, dass sie durch die Schwerkraft abfällt, geht der Prozess weiter. Ansonsten bleibt der Prozess stehen.



Bereits hier ist zu erkennen, dass eine Einäscherung nicht in wenigen Minuten vollzogen werden kann. Die durchschnittliche Einäscherungsdauer liegt zwischen 70 und 120 Minuten. Dabei ist der Ofentyp vollkommen zweitrangig.

2.2.2.1 Verbrennungsprozess am Teilchen

Seit Jahrzehnten beschäftigten sich viele Wissenschaftler und Praktiker mit der Prozessmodellierung des Abbrands eines Einzelkorns. Diese Problematik ist speziell in der Kraftwerkstechnik von Bedeutung, lässt aber auch Schlussfolgerungen auf Krematorien zu. Dabei kann man sich auf drei grundsätzliche Reaktionsmodelle beziehen: Das Modell des gerichteten Stoffumsatzes, das Modell des Restkerns und das Modell der Partikelschrumpfung. Das Brennprodukt wird dabei idealisiert als Kugel betrachtet.

2.2.2.1.1 Modell des gerichteten Stoffumsatzes

Beim Modell des (aus-)gerichteten Stoffumsatzes wird von porösen Verbrennungsmaterialien ausgegangen, bei denen der Widerstand durch die Porendiffusion gering ist und die Verbrennung im Partikel selbst stattfindet. Hier ist also die geometrische Ausrichtung der Verbrennung (nach innen) entscheidend. Dieses Modell kann aufgrund hoher Dichte und geringer Porengröße im menschlichen Körper nur noch in den Phasen der Ausmineralisierung der (porösen) Knochenasche bei der Modellierung des Prozesses herangezogen werden. Da in diesen Phasen der Stoffumsatz jedoch sehr gering ist, kann man diese Prozesse energetisch und zeitbezogen vernachlässigen.

2.2.2.1.2 Modell des Restkerns

Dieses Modell des Restkerns lässt sich am besten auf den Kremationsprozess anwenden. Die Reaktionen laufen an der Partikeloberfläche ab und bilden eine Ascheschicht. Die weitere Verbrennung wird durch den anwachsenden Diffusionswiderstand verlangsamt. Die Reaktionsrichtung ist von der Oberfläche nach innen gerichtet. Ohne Ascheabfall bleibt der Teilchendurchmesser relativ konstant. Nachdem sich das Diffusionsgleichgewicht eingestellt hat, verbleibt ein Restkern an nicht verbranntem Material. Erschwerend kommt bei der Kremierung der hohe Wasseranteil im Gewebe (> 60%) hinzu. Das Wasser verdampft schrittweise, erhöht den Partialdruck aus dem zu verbrennenden Partikel heraus und behindert den Sauerstoffzutritt nach innen zusätzlich. Aus diesem Grund verbleiben die stark wasserhaltigen Organe sehr lange im Ofen und müssen während des sogenannten Mineralisationsprozesses der Knochenasche zeitgleich verbrannt werden. Das führt zu einer extremen Verlängerung der Einäscherungsdauer (ca. 50% der gesamten Kremationszeit). Bei diesen Prozessen wird kaum noch Energie freigesetzt, sodass Energie in diesen Prozessabschnitt zugeführt werden muss.

2.2.2.1.3 Modell der Partikelschrumpfung

Beim Partikelschrumpfungmodell schrumpft das Brenngut dahingehend, dass es sofort verbrennt (Entstehung von gasförmigen Reaktionsprodukten) oder dass die Ascheschicht sofort abfällt. Wenn man den Vorgang idealerweise als »Abreaktion einer Kugel« betrachtet, stellt man fest, dass die Reaktionsoberflächen scharf begrenzt sind. Der Partikel wird also kleiner. Dieser Reaktionsmechanismus ist im Kremationsofen nur für die Fettverbrennung vorrangig zu betrachten und somit zeitlich und räumlich begrenzt. Erschwerend kommt hinzu, dass die Ascheschicht aus anderen Prozessabschnitten (vgl. Modell des Restkerns) nur begrenzt von allein abfällt (z.B. durch Schwerkraft) und somit die Fettverbrennung teilweise (durch die anderen Reaktionsprodukte) behindert wird. Das Ergebnis ist eine rußende Flamme durch Sauerstoffmangel.

2.2.2.2 Grenzen der Einäscherungsgeschwindigkeit

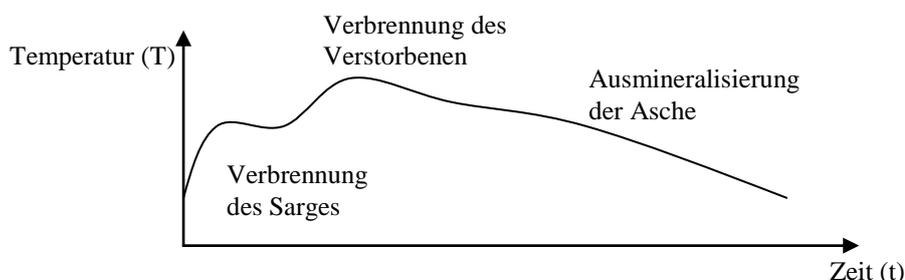
Insgesamt lässt sich feststellen, dass die 3 Reaktionsmechanismen in abgestufter Art und Weise zum Tragen kommen, wobei mit dem Modell des Restkerns der gesamte Prozess im Ofen relativ gut modelliert werden kann. Betrachtet man diese technologischen Grenzen genauer, ist es technisch sehr wichtig (und aus Pietätsgründen notwendig), dass die Verstorbenen einzeln eingeäschert werden. Bei den Etagenöfen fallen die Verstorbenen durch die Schwerkraft nach unten und letztendlich in den Aschekasten. Bei Flachbettöfen müssen die mineralisierten Reste mechanisch von der Herdplatte entfernt und in den Aschekasten gebracht werden. Anders betrachtet zeigt das, dass die gleichzeitige Verbrennung mehrerer Verstorbener im gleichen Brennraum oder die Zugabe weiteren Brennguts den Prozess prinzipiell verlangsamt bzw. zum Stillstand bringt. Eine derartige Technologie führt lediglich zu Schwelbränden, wo große Mengen an nicht (oder unvollständig)

verbrannten Rauchgasen entstehen. Als bekanntestes Beispiel für kompakte Ansammlungen von brennbaren Materialien sind Silobrüände (Silos mit Getreide gefüllt) zu nennen, wo die Feuerwehr bis zu einem halben Jahr im Einsatz ist, bis der Brand vollständig gelöscht wird. Hier stellt die äußere Bauhülle (z.B. Metall oder Beton) die den Sauerstoff zurückhaltende Schicht dar. Geschichten von mittelalterlichen Gräueltaten mit riesigen Scheiterhaufen sind eher der Kunst entlehnt als der Wirklichkeit. Deshalb war es auch unverständlich, dass zum Höhepunkt der BSE-Krise in den 1990-er Jahren die verendeten Rinder in ausgehobenen Gruben mit brennbaren Flüssigkeiten übergossen wurden. Außer einer extremen Rauchentwicklung (ein Schauspiel für die Fotografen) wurde nichts erreicht, die Gruben wurden im Endeffekt mit Erde zugeschüttet, damit letztlich eine natürliche Verwesung stattfinden konnte.

Ähnliche Bedingungen werden bei der klassischen Holzkohleherstellung in Meilern bewusst ausgenutzt. Hier wird die Verbrennung (Sauerstoffeintritt) durch Aufbringen von Schichten (Erde, Moos, Gras) gedrosselt. Die Prozessdauer erstreckt sich so über eine lange Zeit (mehrere Wochen).

2.2.3 Temperaturverlauf und Energiebilanz

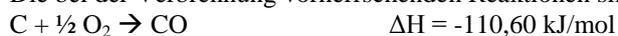
Die Einäscherung des Verstorbenen können wir in zwei Phasen unterteilen: Die eigentliche Verbrennung und die Ausmineralisierung der Knochen. Doch das ist die halbe Wahrheit. Zu einer Einäscherung gehört schließlich auch ein Sarg. Zum einen ist der Sarg das Behältnis, mit dem der Verstorbene in den Ofen eingefahren wird, zum anderen bringen die 40 kg Holz zusätzlich Energie in den Prozess mit ein. Man muss also von einer weiteren Verbrennungsphase ausgehen. Das zeigt sich im Temperaturverlauf.



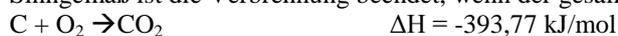
Bei der Verbrennung des Sarges wird Wärme frei. Die Temperatur steigt an. Anschließend findet die eigentliche Kremation statt. Auch dieser Prozessabschnitt ist exotherm. Bei der Ausmineralisierung der Asche sinkt dagegen die Temperatur ab. Wie unschwer zu erkennen ist, stellt insbesondere die Ausmineralisierung der Asche besondere anlagentechnische Anforderungen, sonst bleibt die Verbrennung unvollständig. Die Kremierung des Leichnams kann also nur in einem geeigneten Ofen vollzogen werden.

2.2.3.1 Die Aktivierungsenergie

Die bei der Verbrennung vorherrschenden Reaktionen sind folgende:



Sinngemäß ist die Verbrennung beendet, wenn der gesamte Kohlenstoff in Kohlendioxid umgesetzt ist.



Diese Verbrennung ist in der Summe exotherm.

Um eine Reaktion überhaupt in Gang zu bringen, muss ein Aktivierungsenergieniveau erreicht sein. Dieses liegt bei den genannten Reaktionen niedrig. Man kann theoretisch die Verbrennung, wie sie in Krematorien abläuft, bei Zimmertemperaturen in Gang setzen. Eine Aktivierungsenergie im klassisch-chemischen Sinne ist dazu nicht notwendig.

2.2.3.2 Mindesttemperaturen in der Technik

Bei einer Verbrennung von organischem Material hat sich in der Technik eine Mindesttemperatur (Sicherheitstemperatur) von 650°C durchgesetzt, sonst würde es zu Verpuffungen oder Schwelbränden kommen. Allerdings ist diese Temperatur noch nicht ausreichend, um den Einäscherungsprozess optimal zu führen. Hier sollten Temperaturen von mindestens 800°C erreicht werden. Diese Temperaturen können durch Wärmespeicherung (aus voran gegangenen Prozessen) oder durch eine Hilfsfeuerung (Brenner) erreicht werden.

2.2.3.3 Das chemische Gleichgewicht

Es ist möglich, durch Veränderung von Reaktionsbedingungen das chemische Gleichgewicht zu verschieben. Doch auch hier sind enge Grenzen gezogen. Eine Temperaturerhöhung wird bei exothermen Prozessen (Verbrennung) die Reaktion sogar verlangsamen, ist aber bei den endothermen Prozessabschnitten (Mineralisierung) sinnvoll. So ist es logisch, dass bei Einfahrttemperaturen von über 970°C im Muffel der Prozess langsamer verläuft. Durch eine optimale temperaturgesteuerte Fahrweise kann die Einäscherungsdauer im Oberofen lediglich um 3 Minuten verkürzt werden. Diese hohen Temperaturen setzen außerdem eine entsprechend teure Ofenauskleidung mit hochwertigen Feuerfeststeinen (Al_2O_3 -gehalt > 70%) voraus.

Eine weitere Möglichkeit das chemische Gleichgewicht zu verschieben, wäre zusätzlichen Sauerstoff der Verbrennung zuzuführen. Allerdings ist die Verwendung von reinem Sauerstoff unbezahlbar. Die einzige Möglichkeit ist, mit einem Luftüberschuss zu fahren. Der Nachteil liegt wiederum auf der Hand. Zusätzliche Luft kühlt und führt bei Muffeltemperaturen von weniger als 850°C zur Prozessverlangsamung. Eine optimale Luftzufuhr kann also den Prozess ebenfalls nur um 3 Minuten verkürzen.

2.2.3.4 Energetischer Verlauf der Einäscherung

Die Verbrennung eines Verstorbenen ist ein Prozess, der zeitlich in mehrere Phasen gegliedert werden kann. Je nach Ofentyp wird der Prozess in unterschiedlichen Zeiten durchlaufen. In einzelnen Verbrennungsphasen entsteht Energie (exothermer Prozess). In anderen Verbrennungsphasen muss Energie dem Prozess zugeführt werden.

2.2.3.4.1 Energetischer Verlauf in der ersten Verbrennungsphase

In der ersten Verbrennungsphase erfolgt die Einäscherung des Sarges. Insgesamt werden 40 kg Holz verbrannt. Anfänglich erhitzt sich das Holz im heißen Ofenraum. Je nach Ofentyp liegen die Temperaturen beim Einfahren zwischen 650°C und 950°C im Muffelbereich. Diese Wärme wird an den Sarg schrittweise übertragen und erhöht die Oberflächentemperatur des Sarges. Im Temperaturbereich von 100°C bis 150°C verdampft das Wasser aus dem Holz. Bei den im Ofen herrschenden Umgebungstemperaturen ist dieser Prozess sehr kurz. Wenn der Sarg eine Oberflächentemperatur zwischen 150°C und 550°C erreicht hat, entgast das Holz. Anfänglich wandelt sich die Hemizellulose zwischen 200°C bis 320°C in brennbare Gase um. Bis 350°C folgt dann die Zellulose. Das Grundgerüst Lignin bildet Teer aufgrund seiner Struktur (ringförmige Verbindungen). Übrig bleibt ein Holzkohleanteil von etwa 15%. Holzkohle brennt (glimmt eigentlich ohne Flamme) bei Temperaturen zwischen 600°C und 800°C. Ab 600°C bilden sich brennbare Gase (Hauptbestandteil Kohlenmonoxid), die in Wärmeenergie umgewandelt werden. Je nach Ofentyp und Anfangstemperaturen können bei diesem Prozess die Temperaturen im Muffelbereich sogar 1000°C überschreiten.

Vom Holz bleiben bis 1% Asche übrig, was den Großteil der Staubmenge ausmacht, der mit den Rauchgasen abtransportiert (und später im Filter abgeschieden) wird. Nach etwa 6 bis 9 Minuten fällt der Sarg in sich zusammen. Die Temperatur fällt leicht ab.

2.2.3.4.2 Energetischer Verlauf zum Beginn der zweiten Verbrennungsphase

Wenige Minuten nachdem der Sarg zusammengefallen ist, steigt die Temperatur weiter an. Ursache ist dabei hauptsächlich die Fettverbrennung und die Verbrennung weiterer organischer Körperbestandteile. Bei diesem Prozess wird noch mehr Wärme freigesetzt als bei der vorherigen Holzverbrennung. Nach 20 bis 35 Minuten ist (je nach Ofentyp) die eigentliche Verbrennung (Fett, Muskelgewebe) abgeschlossen. Die Temperatur sinkt ab.

2.2.3.4.3 Energetischer Verlauf zum Ende der zweiten Verbrennungsphase

Nach den erwähnten 20 bis 35 Minuten sinkt dann die Temperatur im Ofen. Konnte man in der ersten Verbrennungsphase nicht in den Ofen reinblicken (nur Ruß und Flammen), so liegt das Skelett mit den dunkel erscheinenden wasserhaltigen Organen (Gehirn, Darm, Leber etc.) auf den Tragroststeinen, bis es bei Etagenöfen durchbricht und auf die Drehplatte fällt. Bei Flachbettöfen bleiben die Reste auf der Herdplatte liegen. Jetzt muss damit begonnen werden, Energie zuzuführen (mit Brennern) oder das Feuerfestmaterial hat so viel Energie gespeichert, dass diese Energie durch Wärmestrahlung aus den Steinen übertragen wird. Ab diesem Zeitpunkt entstehen weniger Verbrennungsgase (10 bis 20% des Volumenstromes im Vergleich). Ruß wird nicht mehr freigesetzt. Der Emissionsmassenstrom beträgt nunmehr nur noch 1/9 der Werte im Vergleich zur Hauptverbrennungsphase. Der Sauerstoffanteil steigt im Ofen stark an. Die Temperatur sinkt weiter ab.

2.2.3.4.4 Energetischer Verlauf in der Mineralisierungsphase

Der Begriff »Mineralisierungsphase« umfasst zwei verschiedene Mechanismen: Zum einen verbrennen in dieser Zeit die wasserhaltigen Organe. Das bedeutet allerdings, dass zuerst das Wasser verdampfen muss, bevor es zu einer Verbrennung des Gewebes kommen kann. Der kühlende Effekt des Wassers (Verdampfungswärme) übersteigt um Dimensionen die Wärmeentwicklung durch Verbrennungsprozesse. Das wirkt auf den zeitlichen Verlauf einer Einäscherung erheblich und kann nur durch Energiezugabe (Brenner oder durch Wärme paralleler Prozesse) beschleunigt werden.

Den zweiten Mechanismus - die Mineralisierung der Knochen - kann man eher als ein Ausglühen der Knochen mit gleichzeitiger Verbrennung der darin enthaltenen organischen Materialien beschreiben. Auch hier ist die Energieausbeute gering, sodass Energie zugeführt werden muss.

2.3 Emissionen und Einflussfaktoren im klassischen Ofen

2.3.1 Bildungsmechanismen von Kohlenmonoxid

Es existieren zwei Temperaturbereiche, die für die Entstehung von Kohlenmonoxid bedeutsam sind. Ist der Feuerraum zu kalt, führt das zum Anstieg der Kohlenmonoxidkonzentration, da die Reaktionsgeschwindigkeit zu niedrig ist. Ist die Feuerraumtemperatur zu heiß, ist das Gleichgewicht ebenfalls in Richtung CO verschoben. Nur in einem engen Temperaturbereich zwischen 800°C und 1000°C (in den einzelnen Brennbereichen) können gute Rauchgaswerte erzielt werden. Grafisch kann man sich die Kohlenmonoxidkonzentration in Abhängigkeit von der Temperatur wie ein U vorstellen. Zusätzlich wird bei Sauerstoffmangel die Verbrennung niemals vollständig sein.

2.3.1.1 Kohlenmonoxidbildung bei niedrigen Temperaturen

Es beginnt die Entgasung. Das aus dem Holz entweichende Gas enthält in der Entgasungsphase N₂. Nach der Sargeinfuhr erwärmt sich zunächst das Holz. Es trocknet. Bei 120°C endet diese Trocknung. CO₂, CO, CH₄ und wenige andere organische Verbindungen beginnen sich zu bilden. Während der Vergasungsphase wächst der Anteil von N₂ und CO, die Konzentration an CO₂ sinkt langsam, die Konzentration an Methan sinkt stark. Das historisch so benannte Holzgas leuchtet schwach bläulich. Bei der Pyrolyse entstehen organische Radikale, die dieses Licht emittieren. Das Holzgas mischt sich mit der Luft und brennt im gleichen Raum zur gleichen Zeit (Diffusionsflamme).

2.3.1.2 Kohlenmonoxidbildung bei höheren Temperaturen

Die Entstehung von Kohlenstoffmonoxid wird auch durch hohe Temperaturen begünstigt. Gemäß dem Gleichgewicht reagiert ebenfalls entstehendes Kohlendioxid mit Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid:



Bei Temperaturen von etwa 1000°C beträgt die Konzentration von Kohlendioxid im Gleichgewicht nur etwa 1%. Durch Erhöhung der Luftzahl wird theoretisch das chemische Gleichgewicht in Richtung CO₂-Bildung verschoben. Das kann schon bei der zusätzlichen Zugabe von Luft geschehen, um den Sauerstoffgehalt für die Verbrennung erhöhen zu wollen. Praktisch wird meist dieses Prinzip bei Verwendung kalter Luft wenig Effekte bringen. Die Senkung der Feuertemperatur ist zu stark. CO wird durch dieses rasche Abkühlen als stabile Verbindung erhalten bleiben. Schließlich bilden kalte Gase Schlieren im heißen Gas, die sich nicht durchmischen. Der Gleichgewichtszustand der Dissoziation wird nicht erreicht.

2.3.2 Der Einfluss des Sauerstoffs auf die Verbrennung

2.3.2.1 Sauerstoff als Führungsgröße der Verbrennung

Eine rein stöchiometrische Verbrennung ist in der realen Technik kaum zu finden. Vielmehr haben sich in der Technik unterstöchiometrische und überstöchiometrische Verbrennungsführungen durchgesetzt. Konzeptionell werden beide Konzepte in Einäscherungsöfen zur Anwendung gebracht. Wenn die Filteranlage klein ausgelegt wurde, um beispielsweise Baukosten zu sparen, wird häufig die Einäscherungsgeschwindigkeit gedrosselt, um die Rauchgasreinigungsanlagen nicht zu überlasten. Wurde dagegen ausreichend in die Kapazität der Filter investiert, kann man mit ausreichend Luft die Verbrennung durchführen.

2.3.2.1.1 Die unterstöchiometrische Verbrennung

Bei der unterstöchiometrischen Verbrennung in einem Kremationsofen wird eine langsame Verbrennung durch eine Drosselung der Luftzufuhr angestrebt. Die Verbrennung wird zeitlich verzögert. Durch den Luftmangel entsteht weniger Energie pro Zeiteinheit, sodass die Temperatur im Muffelbereich langsamer ansteigt. Die Rauchgasgeschwindigkeiten sinken, die Gase bleiben länger im Ofen. Das Kohlenmonoxid muss allerdings in der Nachbrennkammer vollständig umgesetzt werden. Das setzt wiederum eine ausreichend dimensionierte Nachbrennkammer (Volumen und Luftzuführung) voraus. Grenzen sind diesem Verfahren durch teilweise zu hohe CO-Gehalte gesetzt, was gegebenenfalls die Einäscherungsgeschwindigkeit noch weiter absinken lässt.

2.3.2.1.2 Die überstöchiometrische Verbrennung

Bei der überstöchiometrischen Verbrennung finden Verbrennungen unter einem definierten Luftüberschuss statt. In der klassischen Kraftwerkstechnik hat sich ein Wert von 11% Sauerstoff im Rauchgas empirisch ausgebildet, weil dabei Wirkungsgrad und Emissionsverhalten optimal in Einklang stehen. Diese Voraussetzung trifft zu, wenn der Brennstoff homogen ist und dosiert werden kann.

Die Verbrennung im Kremationsofen verläuft schneller. Die Temperatur liegt bei dieser Technologie höher. Das wiederum führt in der Anfangsphase (Sargverbrennung) zu einem schnelleren Vorgang. Der Geschwindigkeitseinfluss für die nachfolgenden Verbrennungsphasen ist geringer.

Ein Luftüberschuss von 11% ist bei der überstöchiometrischen Verbrennung, wenn Wert auf die Einäscherungsgeschwindigkeit im Krematorium gelegt werden soll, nicht ausreichend. Sauerstoffwerte unter 13% im Rauchgas führen dann zu einem extrem schlechten Ausbrand unter den wechselnden Brennstoffbedingungen. Problematisch ist, dass der Sauerstoffbedarf während der Verbrennung stark variiert. Der Sauerstoffanteil im Rauchgas erreicht in den Hauptverbrennungsphasen Werte zwischen 9% und 16%. Später, in der Mineralisierungsphase, steigt der Sauerstoffanteil in Etagenöfen auf teilweise über 19% an. In Etagenöfen sind die durchschnittlichen Sauerstoffwerte höher als in Flachbettöfen.

2.3.2.1.3 Alles schon mal gesehen

Im Leben kann man beobachten, dass sich ähnliche Flammenbilder bei Holzfeuer und Kerzenflamme ergeben. In der Nähe des Dochtes/ Holzes spricht man von einer fetten Flamme (wenig Sauerstoff). Hieran grenzt der Bereich der mageren Flamme (wenig Brennstoff) an. Das Brenngas bewegt sich Richtung Luft und die Luft Richtung Brenngas. Das intensive Gelb entsteht durch Ruß in der Flammenmitte (fette Flamme). Am mageren Flammenrand verbrennt Ruß. Die Flammenfarbe wird transparenter. Diese Flammenfarben sind temperaturabhängig.

Betrachtet man eine Kerzenflamme, kann man dieses Prinzip noch anschaulicher erläutern. Vom Docht ausgehend beträgt die Temperatur der ersten Zone etwa 600°C (rötlich), die bis zur letzten Zone (blauer Rand) auf 1400°C ansteigen kann. Indem man einen kalten Draht in die einzelnen Zonen der Flamme hält und somit das Gleichgewicht stört, kann man das Rußverhalten gut beobachten. Eine stark rußende Flamme entsteht hier im Bereich niedrigerer Temperaturen (durch den kalten Draht). Bei höheren Temperaturen ist dieser Effekt nicht so stark ausgeprägt. Ähnlich verhält es sich mit der Bildung von Ruß und CO bei der Kremation bei den unterschiedlichen Temperaturen im Krematorium. Das wiederum differiert stark je nach Ofenbereich.

2.3.2.2 Sauerstoffwerte im Ofen

Je nach Ofentyp wird mit unterschiedlichen Sauerstoffwerten gefahren. Zwar arbeiten alle Kremationsöfen normalerweise im überstöchiometrischen Bereich, doch der Sauerstoffüberschuss als Zielgröße kann zwischen 8% und 14% variieren. Öfen mit einem größeren Luftüberschuss besitzen eine höhere Einäscherungsgeschwindigkeit. Um die Einhaltung der Rauchgaswerte zu garantieren, werden bei großem Luftüberschuss höhere Anforderungen an das Ofenregime gestellt, da die Umrechnung auf einen Bezugssauerstoffwert von 11% nachträglich erfolgt. Eine zeitabhängige Sauerstoffführung kann die Rauchgaswerte optimieren. Für diese Zwecke wird in den meisten Anlagen der Sauerstoffgehalt für Prozesszwecke gemessen.

Wenn man die Sauerstoffmessung nahe an den Ofen heranbringt, kann man auf Messwerte schnell reagieren, allerdings verschmutzt die Sonde. Wenn man dagegen im Reingasbereich misst, ergeben sich zeitversetzte Werte. Je nach Messmethode und Standort der Messung können zwischen der Entstehung der Emission und der Messung bis zu 40 Sekunden liegen. Beide Varianten besitzen somit ihre Nachteile.

2.3.2.3 Sauerstoff als rechnerische Bezugsgröße für Rauchgaswerte

Der Sauerstoff ist eine wesentliche Bezugsgröße bei der Bestimmung der Schadstoffkonzentration. Die Schadstoffkonzentrationen werden größtenteils in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm³) angegeben. Da diese Einheit druck- und temperaturabhängig ist, bezieht man sich auf das Volumen bei Normalbedingungen, die wie folgt festgelegt sind: Temperatur 0°C und Druck 1013 mbar (hPa).

Je nach Sauerstoffanteil (Verdünnung des Abgases mit Luft) ändern sich Volumenverhältnisse im Abgas. Somit müssen die Messwerte auf ein definiertes Sauerstoffvolumen zurückgerechnet werden (Bezugssauerstoff/Normsauerstoff). Bei Verbrennungsanlagen wird meist auf 11% Normsauerstoff umgerechnet

In Elektroöfen werden in manchen Ländern teilweise Sauerstoffbezugsgrößen von 15% zur normierten Sauerstoffberechnung herangezogen.

Durch Prozessschritte (Öffnen des Muffels, Entfernen der Asche aus dem Ofen) treten kurzzeitig hohe Sauerstoffkonzentrationen auf. Oberhalb von 19% Sauerstoffanteil treten somit durch die Umrechnung auf Normsauerstoff Konzentrationswerte auf, die für Krematorien nicht sinnvoll interpretierbar sind.

2.3.3 Das Auftreten der Kohlenmonoxidspitzen

Die Besonderheit bei Kremationsöfen liegt darin, dass der „Brennstoff nicht dosiert werden kann“ und selbst unterschiedlichen Eigenschaften (Heizwert) besitzt. Dabei spielen Größe, Gewicht (Fettanteil), Alter, Muskelanteil, Krankheitsvorgeschichte als Einflussfaktoren eine große Rolle. Je geringer der Fettanteil (Jugend, fettzehrende Krankheitsgeschichte, Muskelanteil), desto längere Einäscherungszeiten werden nötig.

2.3.3.1 Kohlenmonoxidspitzen beim Einfahren und bei der Sargverbrennung

Je nach Betrachtungsweise treten in den ersten Kremationsminuten mehrere Rauchgasspitzen auf.

2.3.3.1.1 Spitze beim Öffnen des Muffelschiebers

Die erste CO-Spitze entsteht beim Einfahrprozess (beim Entflammen des Sarges). Der Muffel ist weit geöffnet, was auf den Umrechnungsfaktor (Normsauerstoff) wirkt. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Sarg noch vor dem Ofen. Ob diese Emissionsspitze aussagekräftig ist, lässt sich bezweifeln.

2.3.3.1.2 Spitze beim Entzünden des Sarges

Nach der Einfahrt des Sarges beginnt die Verbrennung schlagartig. Hier tritt die zweite Rauchgasspitze auf. Je nach Oberflächenstruktur entzündet zwar der Sarg schneller oder langsamer. Trotzdem laufen in dieser Zeit extrem viele Effekte ab, die die Rauchgaszusammensetzung negativ beeinflussen.

Bessere Rauchgaswerte beim Entflammen ergeben gewachste und gebeizte Säрге im Vergleich zum Rohholzsarg, da die Oberfläche wesentlich glatter ist und die Späne an der Holzoberfläche gebunden sind. Allerdings wird die Anzahl der Rohholzsäрге durch die rückläufige Kaufkraft der Hinterbliebenen weiter ansteigen. Die früher häufig verwendeten lackierten Säрге nehmen in der Bedeutung für die Trauer ab. Durch die wasserlöslichen Lacke ist auch hier ein anderes (langsames) Brennverhalten im Vergleich zur Vergangenheit zu verzeichnen. Indem man den Sarg vor dem Einfahren mit Wasser besprüht oder mit einem Flammtuch belegt, kann der Prozess günstiger beeinflusst werden. Das Emissionsminderungspotential durch die Wasserbesprühung ist allerdings ausgeschöpft.

Nachdem der Sarg sich entzündet hat und der Saugzug vom Leistungsmaximum (maximaler Unterdruck im Ofen) auf Regellast zurückgegangen ist, normalisieren sich die Rauchgaswerte schnell. Bei der normalen Sargverbrennung treten keine weiteren Rauchgasspitzen auf. Je nach Ofentyp zerfällt der Sarg nach etwa 5 bis 15 Minuten. Dabei ändert sich schlagartig die brennbare Oberfläche. Da dieser Zeitpunkt nicht vorhersehbar ist, kann die Regelung darauf nicht schnell genug reagieren. Es entsteht eine kurze Rauchgasspitze, die schnell wieder ausgeglichen ist.

2.3.3.2 Kohlenmonoxidspitzen in der Hauptverbrennungsphase

2.3.3.2.1 Emissionen bei der Fettverbrennung

Die eigentliche Hauptverbrennungsphase tritt während der Fettverbrennung auf. Hier entsteht die meiste Energie, die positiv für den Prozess ausgenutzt werden kann. In dieser Phase steigen die Temperaturen stark an und die CO-Konzentrationen sinken aufgrund der relativ hohen Temperaturen ab. Über längere Prozessabschnitte entstehen bei guter Verbrennungsluftführung keine CO-Emissionen. Voraussetzung ist, dass in diesen Prozessphasen die Kapazität der Filter so hoch bemessen ist, dass die Verbrennung ungehindert und ohne Luftmangel stattfinden kann. Wenn die Verbrennung in dieser Zeit gedrosselt wird, werden dagegen hohe CO-Emissionen verursacht. Der Prozess ist dann schwer steuerbar.

Je nach Ofentyp kann diese Hauptverbrennungsphase 20 Minuten nach dem Einfahren oder später (bis zu 1,5 Stunden) beendet sein.

2.3.3.2.2. Emissionen bei verstärkter Fettverbrennung

Problematisch ist es, wenn stark übergewichtige Menschen (> 130 kg) kremiert werden. Hier reicht mitunter die Verbrennungsluft nicht mehr aus. Wenn die Sauerstoffwerte im Rauchgas 9 bis 11% je nach Ofentyp unterschreiten, steigt der Kohlenmonoxidanteil im Rauchgas stark an. Diese CO-Spitzen wirken sich dann auf den Stundenmittelwert entscheidend aus. Wenn die Filteranlage genügend Kapazitäten hat, kann durch eine zusätzliche Luftzugabe in den heißen Abgasstrom hinter dem Verstorbenen für ausreichende Verbrennungsluft gesorgt werden und die Rauchgaswerte normalisieren sich. Allerdings sind dafür Rauchgasmengen von 10.000 Betriebskubikmetern je Stunde zu bewältigen.

Bei anderen Einäscherungsanlagen mit weniger Filterkapazität kann die Luftmenge im Muffelbereich gedrosselt werden. Die dabei entstehenden Rauchgase müssen letztendlich bis in die Nachbrennkammer umgesetzt werden. Diese dabei zugeführte Luft kühlt mitunter die Rauchgase ab, dass in der Nachbrennkammer die Temperatur weiter abfällt, als notwendig ist.

In den Jahren 1998 bis 2013 stieg die Höhe des Körpergewichts um 20%. Letztendlich ist das Übergewicht der Bevölkerung bei weitem nicht als das primäre Problem bei der Feuerbestattung anzusehen.

2.3.3.2.3 Emissionen nach der Fettverbrennung

Nach der Fettverbrennung sinkt die Temperatur im Ofen. Bei Unterschreitung von bestimmten Temperaturniveaus bildet sich erneut Kohlenmonoxid. Problematisch ist dabei, dass das noch vorhandene Brenngut (innere Organe) einen hohen Wasseranteil aufweist. Hier tritt ein kühlender Einfluss auf, der eine unvollständige Verbrennung zur Folge hat. Besonders problematisch ist dieser Effekt in Öfen, die nur wenig Wärme (durch dünne Isolierschichten) speichern können. Hier kann durch den Einsatz von Brennern das erforderliche Temperaturniveau erhalten und das CO schon in der jeweiligen Hauptbrennkammer primär in Grenzen gehalten werden. Durch den Einsatz von Nachbrennkammern mit vorgegebenen Mindesttemperaturen kann dieses Kohlenmonoxid sekundär vernichtet werden. Durch eine ungünstige Brennersteuerung kann durch das Eindüsen von Brennerluft (Kühlung) während der Spülphase (bis zu 2 Minuten) zusätzlich Kohlenmonoxid erzeugt werden.

2.3.3.2.4 Emissionen bei technischen Handlungen

Weitere CO-Spitzen entstehen, wenn der Verstorbene bei Etagenöfen auf die Drehplatte fällt, die Drehplatte gedreht wird, bzw. das Ascherost (Ascheplatte) gezogen (gedreht) wird. In beiden Fällen ändert sich schlagartig die Oberfläche des Verstorbenen.

Im Flachbettofen werden die Überreste des Verstorbenen mechanisch von der Herdplatte entfernt. Auch dabei treten Kohlenmonoxidspitzen auf. Beim Wechsel des Aschekastens wird der Ofen geöffnet. Diese technischen Handlungen lassen sich nicht vermeiden. Hier ist der CO-Anstieg auf die Abkühlung der Rauchgase durch das Öffnen der Öfen zurückzuführen.

Bei diesen technischen Handlungen wird der Ofen oftmals an verschiedenen Stellen geöffnet. Der Sauerstoffwert steigt an. Hier wirkt der Umrechnungsfaktor auf Normsauerstoff, der keine aussagekräftigen Werte zulässt, zumal diese Vorgänge in Verbrennungsphasen ablaufen, wo relativ nur noch wenig brennbares Material existiert. Durch die vorzeitige Übergabe der Verbrennungsrückstände in die Mineralisierungskammer/ Unterofen werden ebenfalls höhere CO-Emissionen beobachtet.

2.3.3.2.5 Abbau des Kohlenmonoxids in der Atmosphäre

Das nicht umgewandelte Kohlenmonoxid wird in die Atmosphäre emittiert. Durch Reaktion mit OH-Radikalen (Bildung unter Ozon-, Wasser und UV-Einfluss) wird das CO oxidiert und in Kohlenstoffdioxid umgewandelt. Die Halbwertszeit des Kohlenmonoxids in der Atmosphäre beträgt abhängig von der Jahreszeit etwa 40 Tage.

2.3.4 Bildung von Ruß

2.3.4.1 Bildung von Ruß bei niedrigen Temperaturen

Bei unvollständiger Verbrennung im niederen Temperaturbereich entsteht als Zwischenprodukt u.a. Kohlenmonoxid. Die Unvollständigkeit und somit auch die energetische Ineffektivität der Verbrennung werden durch eine hohe CO-Konzentration im Rauchgas gekennzeichnet. Es kann theoretisch zur vollständigen Umsetzung des Kohlenstoffs eine genau definierte Sauerstoffmenge (Mindestsauerstoff) ausreichen, wobei unterstellt werden muss, dass jeder Kohlenstoff mit Sauerstoff reagiert. Das kann bei Verbrennungsprozessen mit heterogenen Einsatzstoffen niemals garantiert werden. Deshalb werden die meisten technischen Anlagen unter Sauerstoffüberschuss (Luftüberschuss) betrieben. Andererseits führt der Verbrennungsluftüberschuss dazu, dass ein zusätzliches Gasvolumen erwärmt werden muss, das nicht unmittelbar am Verbrennungsprozess beteiligt ist. Dabei wird die Verbrennungstemperatur reduziert bzw. steigt nicht so stark an.

Die unvollständige Verbrennung ist bei niedrigen Temperaturen nicht zu verhindern.

2.3.4.2 Chemisches Gleichgewicht zwischen Ruß und CO bei hohen Temperaturen

Die Entstehungsspitzen von CO und Ruß fallen zeitlich zusammen, wobei die Rußbildung speziell auf die ersten 20 bis 25 Einäscherungsminuten konzentriert ist. Hier wiederum entsteht Ruß im Holzverbrennungsprozess (aus der Verbrennung von ringförmigen Verbindungen) und während der Fettverbrennungsphase. Obwohl der Sauerstoffanteil während der Fettverbrennungsphase über 11% (in Kremationsöfen meist 14%) liegt, ist die Verbrennung nicht vollständig. Da im Vergleich zu Ölbrennern eine Durchmischung von Fett und Verbrennungsluft nicht gegeben ist, brennt das Fett an der Oberfläche.

Der meiste Staub im Rohgas entsteht beim Aufheizprozess (Montag früh, wenn der Ofen noch kalt ist - 650 bis 800°C Muffeltemperatur) unmittelbar beim Entzünden des Sarges nach dem Einfahren. Von der Struktur her, ist der Rußanteil dabei sehr hoch.

Ruß bildet sich erfahrungsgemäß bei Temperaturen unter 700°C in einzelnen Ofenbereichen und ist in den einzelnen Prozessstufen und in der Nachbrennkammer schwer zu vernichten.

Auswirkungen auf die Staubemissionen im Reingas hat der Abreinigungsprozess mit Druckluft, weil sich der Filterkuchen nach dem Abreinigen neu bilden muss.

Anhand des Verlaufs der Staubemissionen zu Betriebsbeginn und während der Abreinigung kann auf die Dichtigkeit des Filters, insbesondere auf den Zustand der Patronen, geschlossen werden, sodass durch rechtzeitigen Wechsel der Filterpatronen Filterdurchbrüche vermieden werden können.

2.3.4.3 Vertiefende Ergänzungen

Im Krematorium verlaufen die Prozesse in einer Diffusionsflamme. Das gelbe Leuchten dieser Flamme rührt in erster Linie von der Strahlung her, die von mikroskopisch kleinen Rußpartikeln emittiert wird. Die Rußbildung ist ein komplexer Vorgang, bei dem in weniger als einer Millisekunde aus einfachen Kohlenwasserstoffen Partikel entstehen. Sie werden im fetten Bereich gebildet und danach durch die Fläche stöchiometrischer Mischung in den mageren Bereich der Flamme transportiert, wo sie in der sauerstoffhaltigen Umgebung wieder verbrennen. Das Rußen tritt auf, wenn die Verweilzeit der Rußpartikel im Bereich oxidierender Umgebung und hoher Temperaturen (>1000°C) zu kurz ist, um sie wieder zu verbrennen. Hat sich Ruß einmal gebildet, ist er aufgrund schlechter Wärmeleitfähigkeit schwer verbrennbar. Ruß stellt eine Gefährdung für die Filterelemente dar. Ab 20% Rußanteil im Filterstaub besteht die Gefahr der Selbstentzündung an schlecht durchströmten Stellen.

2.4.1 Holzasche

Die Hauptbestandteile des Staubs sind die leichte weiße Holzasche und Kohlenstoff in Form von Ruß. Diese mineralisierte Holzasche besteht aus 75% CaO, 9% MgO, 11 % K₂O, 3% P₂O₅, 2% Na₂O. Diese Materialien sind sehr leicht und werden aus dem Ofen abgeführt. Sie lagern sich erst in den Rauchgaskanälen und den nachgeschalteten Komponenten ab. Inwieweit diese meist basisch reagierenden natürlichen Mineralien als Schadstoffe zu bezeichnen sind, sollte sich einer Umweltdiskussion entziehen. Diese Stoffe sind ein Neutralisationsmaterial gegen den sauren Regen und könnten als Kondensationskeime in der Luft die aktuellen Regenextreme (Trockenheit oder Starkregen) abmildern.

2.4.2 Weitere Schadstoffkomponenten

Organische Verbindungen und Dioxine

Die Verbrennung in Einäscherungsöfen wird niemals vollständig sein, sodass organische Restverbindungen auftreten. Die Verbrennung ringförmiger organischer Verbindungen erfolgt grundsätzlich langsamer als die Verbrennung von kettenförmigen Molekülen. Speziell die ungesättigten zyklischen organischen Verbindungen sind schwer zu spalten und verbrennen häufig unter Bildung von Ruß. Diese organischen Substanzen sind im Rauchgas enthalten. Sie bleiben im Rauchgas bestehen oder wandeln sich in andere Verbindungen um. Dabei können halogenorganische Verbindungen (Dioxine, Furane) entstehen. Da Dioxinwerte selten gemessen werden, kann nur aus den experimentell häufiger bestimmten Gesamt-C-Werten eine Aussage abgeleitet werden. Es wird eine Korrelation zu den Kohlenmonoxidemissionen vermutet. Wahrscheinlicher für eine vermutete Abhängigkeit der Dioxinkonzentration ist allerdings das Auftreten von Ruß, der bei der unvollständigen Verbrennung von ringförmigen Verbindungen entsteht. Welche Rolle bei dieser Abhängigkeit Rückreaktionen (Rußbildungsprozesse aus CO) spielen, kann nicht gesagt werden. Es ist aber anzunehmen, dass die genannten Verbindungen (bei Dioxinen die Vorläufersubstanzen) in Nebenprozessen (Pyrolyse) zeitgleich zur Existenz der CO-Spitzen gebildet werden.

Grundsätzlich bilden sich Dioxine und Furane in einem chemischen Prozess bei Temperaturen unter 500°C (De-Novo-Synthese) aus den nicht verbrannten, meist ringförmigen organischen Verbindungen und Halogenen. Das eigentliche Bildungsmaximum liegt im Temperaturbereich um 350°C. Bedeutsam ist dabei auch das Vorhandensein metallischer Oberflächen, die eine katalytische Wirkung entfalten.

Beim klassischen und vor allem kontinuierlich arbeitenden Einäscherungsöfen verlassen die Rauchgase den Schornstein üblicherweise mit Temperaturen über 500°C, werden schlagartig abgekühlt und durch die Umgebungsluft verdünnt, sodass die Rückbildung von Dioxinen fast vollständig ausgeschlossen ist. Bei sporadischem Betrieb von Einäscherungsanlagen und bei metallischen Schornsteinen muss mit Dioxinbildungsprozessen gerechnet werden.

2.5 Schornstein und Rauchgaswege

Der Schornstein (Esse, Kamin) führt die Rauchgase ins Freie ab. Die Funktion basiert auf dem Kamineffekt. Es wird ein Auftrieb durch die Gassäule erzeugt. Das warme Rauchgas hat eine geringere Dichte als die kalte Umgebungsluft und steigt damit nach oben. Die Höhe und Weite des Schornsteins müssen auf Rauchgasmenge und Temperatur abgestimmt sein. Durch die Strömung der Abgase entsteht durch den Bernoulli-Effekt ein Unterdruck, der zusätzlich das Rauchgas in den Schornstein saugt. Durch diesen Unterdruck können mehrere Öfen über einen Schornstein betrieben werden, ohne dass die Rauchgase in nicht betriebene Öfen zurückdrücken.

Klassische Schornsteine bestehen aus zwei Schichten. Das Tragwerk ist die äußere Hülle und besteht meist aus Mauerwerk/ Beton. Der innere Teil führt die Rauchgase und ist aus feuerbeständigem Material, das thermisch und chemisch beständig ist. Neben der Hitze spielen dabei auch saure Gasbestandteile eine Rolle. Der Schornstein ist mit dem Kremationsofen durch den Rauchgaskanal (Fuchs) verbunden.

Rauchgaskanäle und Rauchgaskamine müssen vom Schornsteinfeger regelmäßig gereinigt werden. Insbesondere in den waagrecht verlaufenden Kanälen lagert sich Flugasche ab, die entfernt werden muss.

3 Grundaufbau und Funktion moderner Einäscherungsanlagen

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts existierten keine Umweltauflagen für Krematorien. Viele Jahrzehnte war es ausreichend, die Öfen in dieser Art und Weise zu betreiben wie es nun einmal in dieser Zeit üblich war. Allerdings bestand damals schon ein gespaltenes Verhältnis zwischen den Betreibern von Krematorien und der näheren Bevölkerung. Zu verorten ist diese Auseinandersetzung wohl eher im psychisch-emotionalen Bereich, u.a. auch, da es optisch sichtbar war, wenn ein Krematorium in Betrieb war. So gab es bereits im Jahr 1930 Beschwerden, das Meißner Krematorium (Inbetriebnahme 03.10.1931) verneble das ganze Meißner Tal. Bemerkenswert war an diesen Vorwürfen, dass zur damaligen Zeit die Öfen noch nicht einmal gebaut waren... Das letztendlich harmlose Kartoffelfeuer der Grund für die Verneblung waren, spielte in dieser emotional aufgeladenen Diskussion keine Rolle. Auf einigen Grundstücken wurden die Obstbäume nach dem Besitzerwechsel nicht mehr abgeerntet und als Grund wurde die Schadstoffbelastung durch das Krematorium angegeben. Höhepunkt bildete die Angst in den 1990er Jahren, Menschen wären ihr Leben lang Schadstoffen ausgesetzt und würden sie aufnehmen, womit sie als Sondermüll zu betrachten wären. Glücklicherweise siegte in diesem Fall der biologische Sachverstand, denn: Wären Menschen kritisch schadstoffbelastet, wären sie wohl auch daran verstorben.

Allerdings zeigte die Beobachtung eines Krematoriums (ohne Filterbetrieb) durchaus, dass häufiger als bei anderen Krematorien Rauch aufstieg. Dieser Rauch entstand in den kritischen Verbrennungsphasen, die entscheidend auf das Emissionsverhalten wirken. Regelungen für Krematorien im Umweltbereich wurden ab Mitte der 1970er Jahre geschaffen.

Grundsätzlich gilt: Je weniger Schadstoffe unmittelbar im Ofen entstehen, desto weniger Aufwand muss für deren Behandlung betrieben werden.

3.1. Die Entwicklung von Umweltnormen als Wunsch des Zeitgeistes

Die gesetzlich geschaffenen Umweltregeln entsprechen dem Stand der aktuellen Technik. Wurde als erste große Umweltmaßnahme die Rauchgasentschwefelung durchgeführt, weil man einfacherweise nur Kalk zur Schwefeloxidbindung zugeben musste, entwickelte sich danach die Rauchgasentstaubung. Zuerst auf Basis von Zyklonen, später durch Gewebefilter verschiedenster Art. Dieser Prozess ist dem Kaffeefilter vom Grundsatz her nachempfunden und einfach zu beherrschen. Das führte zu ständig sinkenden Grenzwertkonzentrationen.

Erst später wurde es durch Absorbenten und Katalysatoren möglich, weitere Schadstoffemissionen zu verhindern. Diese Prozesse verlangen ein höheres Technologieniveau und wurden erst in den letzten Jahren verfahrensreif ausgestaltet.

In diesem sachlichen Zusammenhang ist immer die Umweltgesetzgebung zu betrachten, ohne dabei unter den Tisch zu kehren, dass bestimmte Interessengruppen damit erheblich Geld verdienen wollen und versuchen, die Gesetzgebungsverfahren zu beschleunigen. Das erhöht jedoch das Risiko, dass – getragen durch die blinde Gläubigkeit der Verbraucher und Interessenverfechter, sowie die Geldgier der Produzenten – sich der Umweltschutz ins Gegenteil verkehrt und letztendlich der Schaden an der Natur den Nutzen übersteigt. Schließlich ist jede Handlung mit einem Risiko verbunden. Warum sollte das im Umweltbereich anders sein?

3.1.1 TA Luft aus dem Jahr 1974

- Feinstaubgehalt 100 mg/m³

3.1.2 TA Luft aus dem Jahr 1984

- Feinstaubgehalt 50 mg/m³

3.1.2.1 Bedeutung der Aerosole in der Luft

Die Archäologie bezieht einen Großteil ihrer Kenntnisse aus den Begräbnisstätten früherer Jahre. Aus diesen Daten lassen sich Schlussfolgerungen auf das Klima ableiten. Aktuell sagen die verschiedensten Modelle für das Elbtal und die Lausitz künftig ein steppenartiges Klima voraus. Diese Klimaschwankungen traten mehrfach im sächsischen und brandenburgischen Gebiet auf, was sich an den stark schwankenden Besiedlungsdichten seit dem Ende der letzten Eiszeit erkennen lässt. In regenreichen Zeiten blühten die verschiedensten Kulturen auf, um in regenarmen Zeiten wieder zu verschwinden.

Niederschlag entsteht nur, wenn feuchte Luft aufsteigt und der Wasserdampf in den oberen Luftschichten an Teilchen kondensiert. Diese Teilchenzahl hat in den letzten Jahrzehnten rapide abgenommen. Zur genaueren Charakterisierung dieser Teilchen hat sich der weiter gefasste Begriff der Aerosole durchgesetzt.

Die verschiedenen Aerosole wirken klimatisch entgegengesetzt. Zum einen wird (je nach Aerosolstruktur z.B. Farbe, Durchmesser, Aggregatzustand) die Sonnenenergie in den Weltraum reflektiert (kühlender Effekt) aber auch absorbiert (aufheizender Effekt). Wenn weniger Energie die Erde erreicht, verdunstet wenig Wasser. Partikel, die die Wärme aufnehmen, fördern die Verdunstung und behindern das Abregnen. Andererseits bilden die Aerosole (hauptsächlich die Staubteilchen) erst den Grundstock, dass Regen entstehen kann.

3.1.2.1.1 Keine Aerosole

Ohne Aerosole gibt es keine Kondensationskeime für die Regentropfen. Der Wasserdampf wird nicht kondensieren. Der Regen bleibt aus.

3.1.2.1.2 Wenig Aerosole

Bei wenig Staubteilchen in der Atmosphäre, wachsen die Tropfen so schnell, dass sie sofort abregnen. Durch die relativ perfekt beherrschbare Staubfiltertechnologie ist der Aerosolanteil in der Umgebungsluft abgesunken. Zwangsläufig führt das zu immer mehr regionalen Überschwemmungsereignissen, da wasser- und insbesondere energiehaltige Luftmassen diesen Prozess begünstigen und die Wolken thermisch nach oben treiben. Dieser thermische Prozess wird dadurch angetrieben, dass bei der Kondensation von Wasserdampf zu Wasser Wärme frei wird, die beim Verdampfungsprozess auf der Erde aufgenommen wurde.

Ähnliche Erscheinungen sind in den Regenwaldgebieten zu beobachten. Viel Sonnenenergie erreicht den Boden. An den wenigen Kondensationskernen (über dem sauberen Regenwald) kondensiert der Dampf. Die Tropfen des nachfolgenden Regens sind außerordentlich groß, die Regenmenge extrem hoch und lokal auf ein kleines Gebiet begrenzt.

3.1.2.1.3 Mittlere Konzentration von Aerosolen

Bei mittleren Teilchenkonzentrationen wird der Zeitpunkt des Regens nach hinten verlagert. Einmal verdunstet weniger Wasser, außerdem bilden sich nur leichte Tropfen, die in den Wolken nach oben steigen. Die Tropfen gefrieren, Erstarrungswärme wird dabei freigesetzt. Die Eiskristalle steigen in die höhere die Atmosphäre. Es bilden sich große Wolken. Dadurch wird die Zirkulation in der Atmosphäre angeregt. Die Wolken werden über weite Strecken transportiert. Mittlere Aerosolkonzentrationen bringen den meisten Regen, der allerdings über große Flächen verteilt wird.

3.1.2.1.4 Viele Aerosole

Sind viele Keime vorhanden, entstehen mehr und kleine Tropfen, die länger in der Luft schweben. In stark verschmutzter Luft gibt es noch mehr Kondensationsmöglichkeiten. Die Tropfen bleiben klein und erreichen mitunter nicht das notwendige Gewicht, um zu fallen. Diese Wolken werden vom Wind über weite Strecken fortgetragen und ermöglichen so den feinen Landregen auch in weit vom Meer entfernten Gebieten. Die vielen kleinen Tröpfchen werfen mehr Sonnenlicht in das Weltall zurück und wirken für die Erdoberfläche zusätzlich abkühlend.

3.1.2.1.5 Sehr hohe Aerosolkonzentrationen

Sehr hohe Aerosolkonzentrationen dämpfen das Sonnenlicht und vermindern so den Wasserkreislauf. Es entstehen nur winzige Regentropfen oder Eiskristalle, die nicht zur Erde fallen. Stattdessen verdampfen/ sublimieren die Tropfen/ Kristalle. Damit bleibt der summare Energieumsatz in der Atmosphäre gering. Der Regen wird ausbleiben. Trockenheit, sommerliche Hitze und extreme Winterkälte breiten sich aus.

3.1.2.1.6 Aerosole und das Wetter im Elbtal/ Sachsen

Die regionalen Auswirkungen können erheblich sein. Die Gebirge, in deren Regenschatten das Elbtal und die niedere Lausitz liegen, haben sich nicht verändert. Trotzdem kam es in den Zeiten der steinzeitlichen und bronzezeitlichen Besiedlung zu großen Schwankungen in der Besiedlungsdichte. Archäologisch konnte dabei ein Zusammenhang zu den klimatischen Bedingungen (Regenmenge) gezogen werden.

Unbestritten ist in der modernen Welt der menschliche Einfluss auf das Klima. Das hat auch Auswirkungen auf die einzelne Region. Im Elbtal und der niederen Lausitz sanken die Niederschlagsmengen seit Beginn der 1990er

Jahre erheblich. Die Niederschläge an den sächsischen und böhmischen Mittelgebirgen nahmen zu, da die Wolken aufgrund der Aerosoleffekte energiereicher sind und sich somit in den Höhenlagen verstärkt abregnen. Als Ursachen (unter vielen weiteren) wird die Abschaltung von Braunkohlekraftwerken (bzw. deren Umstellung auf Filterbetrieb), die Umstellung der Hausheizungen (weg von der Kohle) und das Verbot der Verbrennung von Gartenabfällen vermutet, wodurch in der Vergangenheit größere Staubmengen in die Luft emittierten.

Inzwischen fehlen durch die Umweltmaßnahmen der letzten Jahrzehnte erhebliche Mengen an Aerosolen in der Atmosphäre, die als Kondensationskeime für den Regen in Betracht kommen konnten.

So sind vielen Älteren die langanhaltenden Landregen mit kleinen Tropfendurchmessern in Erinnerung geblieben, die bis in die 1980er Jahre für eine gleichmäßige Durchfeuchtung der Böden sorgten. Gleichsam sind zwischen 1950 und 2000 nur wenig relevante Hochwasserereignisse im genannten Gebiet zu verzeichnen gewesen. In diese Zusammenhänge kann man auch die menschengemachten Wetterextreme (Extremkälte und Hochwasserereignisse) zwischen 1940 und 1950 einordnen. Die Ursachen waren einmal die großen Brände während der Kämpfe, die extrem viele Aerosole in die Luft brachten, andererseits die zerstörte Industrie nach dem Krieg, die weniger Aerosole emittierte.

Selbstverständlich würde es den Rahmen sprengen, inwieweit die derzeit stattfindende Versteppung des Elbtals und der Lausitz als eine Folge der durchgeführten Umweltschutzmaßnahmen angesehen werden muss. Umweltschutz an regionalen Veränderungen festmachen zu wollen, blendet die globale Welt aus, die bis jetzt noch keiner perfekt klimapolitisch am Rechner modellieren konnte.

Eins ist allerdings Fakt: Der rasante Anstieg der Hautkrebsfälle hängt u.a. auch mit der geringeren UV-Licht-Absorptionsfähigkeit der Atmosphäre zusammen.

3.1.3 VDI-Richtlinie 3891 aus dem Jahr 1992

- Einäscherungsöfen (Hauptbrennraum, Ausbrandbereich zur Mineralisierung der Asche, separat beheizte Nachbrennkammer)
- Heißgasfilter oder Filter mit Vorkühlern
- Einsatz NO_x -armer Brenner
- Temperatur im Hauptbrennraum $> 650^\circ\text{C}$
- Temperatur im Nachbrennraum $> 800^\circ\text{C}$ (heute 850°C)
- Verweilzeit im Nachbrennraum $> 0,3\text{s}$
- Sauerstoffmindestgehalt 6%

3.1.4 Genehmigungspflicht 4. BImSchV (Nr. 10, 24 A.4) aus dem Jahr 1993

vereinfachtes Genehmigungsverfahren, Orientierung an den Emissionsgrenzwerten der 17.BImSchV

- Staubförmige Stoffe (Gesamtstaub) 15 mg/m^3
- Quecksilber $0,2 \text{ mg/m}^3$
- Kohlenmonoxid 100 mg/m^3 (h-Mittel)
- Organische Stoffe (Gesamt-C) 10 mg/m^3
- Stickstoffoxide (NO_x) 200 mg/m^3
- Schwefeloxide, (SO_2) 100 mg/m^3
- Anorganische Chlorverbindungen (HCl) 30 mg/m^3
- Anorganische Fluorverbindungen (HF) 2 mg/m^3

Neben dem Nachteil der nicht bundeseinheitlich geregelten Grenzwerte war die versuchte Gleichstellung von Müllverbrennungsanlagen und Kremationsöfen äußerst fragwürdig. Aus diesem Grunde wurde diese Regelung 1997 aufgehoben.

3.1.4.1 Verfolgungswahn und Logik

Bei diesem Gesetzesvorhaben, den Körper als Schadstoff zu bewerten, hätte durch sinnvolle Vorüberlegungen Umweltaktionismus verhindert werden können. Der menschliche Organismus kann nur begrenzt Schadstoffe aufnehmen. Der frühe Tod wäre sonst die Folge. Viele dieser aufgestellten Grenzwerte erwiesen sich als nicht sinnvoll. Bestimmte anorganische Verbindungen waren nicht nachweisbar (HF) oder lagen wesentlich unter den Grenzwerten (HCl und SO_2). Schwefel ist beispielsweise im Insulin enthalten, was nicht in diesen Unmengen im Körper vorkommt, dass es einen relevanten Umwelteinfluss haben könnte. Zwar ist der Chloridanteil im menschlichen Körper höher, da die Struktur des Blutplasmas durch die Anwesenheit von Kochsalz geprägt ist, trotzdem handelt es sich um zu vernachlässigende Größenordnungen.

Der Quecksilberwert im Rauchgas ergab auch keine Bedeutung und lag fast immer unterhalb der Nachweisgrenze. Mit ein wenig Lebenskenntnis hätte man im Vorfeld erkennen können, dass hohes Lebensalter mit Zahnlosigkeit einhergeht. Der Eintrag von Quecksilber durch Amalgam konnte also nicht die zuge dichtete Rolle spielen.

Weiterhin liegen die Temperaturen beim Einäscherungsprozess in niedrigen Bereichen, dass der Stickoxidanteil nicht die gravierende Rolle spielt.

3.1.4.2. Gut für den Menschen - schlecht für die Rüben

Unbestritten ist, dass der Einfluss von Säuren auf Bäume und Gebäude als negativ zu bezeichnen ist. So lag es nahe, den Anteil der Säuren in der Luft und in den Gewässern zu neutralisieren. Großflächige Kalkungen von Wäldern wurden vollzogen. Nunmehr musste auch dem Eintrag dieser sauren Bestandteile (oder deren Vorprodukten) Beachtung geschenkt werden, die bei Verbrennungsprozessen entstehen.

Die Verfahren zur Rauchgasentschwefelung zählen zu den ältesten Reinigungsverfahren. Das klassische Prinzip ist (trotz einiger technischer Schwierigkeiten) relativ einfach: Kalkzugabe. Übrig bleibt Gips. Die Einführung der Rauchgasentschwefelung vollzog sich zeitgleich mit den Diskussionen um das Waldsterben.

In der Wahrnehmung aus der damaligen Zeit sind die entwaldeten Bergrücken in Ost und West in der Erinnerung. In den forstwirtschaftlichen Monokulturen verschwanden die Vögel, der Borkenkäfer nahm überhand und führte zu den sichtbaren Baumskeletten. Die Bilder des Waldsterbens erschienen zuerst in der alten Bundesrepublik (Schwarzwald), zogen sich dann über Mittelgebirgsregionen der DDR (Erzgebirge) und breiteten sich anschließend im tschechischen Bereich (Isergebirge/ Jizerské hory) aus. Der Zusammenhang zwischen Abnahme der Vögel und der darauffolgenden Zunahme des Borkenkäfers ist im Isergebirge zur damaligen Zeit Gesprächsthema gewesen. Was maßgeblich zur Minimierung der Vogelzahlen führte, lässt sich aus dem langen zeitlichen Abstand oder fehlenden Messergebnissen nicht herleiten. So werden erst seit Beginn der 1980er Jahre Zustandsmessungen in den Baumwipfeln durchgeführt.

Glücklicherweise beschränkte sich das Waldsterben auf weniger als 1% der deutschen Waldfläche. Ein Zusammenhang mit der Kohleverstromung scheint zu bestehen. Allerdings wurde unmittelbar vor dem Waldsterben in den Emissionsausgangsgebieten mit ersten Versuchen zur Rauchgasentschwefelung in zeitlicher Reihenfolge alte BRD, ČSSR (Revier Most), anschließend DDR (Hagenwerder) begonnen. War die Rauchgasentschwefelung schuld? Inzwischen haben sich die Wälder wieder erholt. Dass ab 2000 trotz der vielfältigen Umweltschutzmaßnahmen plötzlich das Waldsterben im Bayerischen Wald/ Böhmerwald auftrat, wird vielen ein Rätsel bleiben. Dem aufmerksamen Beobachter ist es allerdings nicht entgangen, dass die Borkenkäferplage von einem Waldstück ausging, was gezielt zu einem Urwald verwildern sollte. Umweltschutz setzt aber Kenntnis der Natur voraus und keinen kurzfristigen Aktionismus.

Regelmäßig wird diskutiert, ob der Eintrag von Schwefeldioxid in die Atmosphäre dem Treibhauseffekt entgegenwirken kann. Das Temperaturabsenkungspotential von Partikeln und Schwefeldioxid gilt seit dem Vulkanausbruch des Pinatubo (1991) als nachgewiesen. Damals sank die globale Jahrestemperatur um 0,5 Kelvin. Das führte seitdem zu den genannten Überlegungen. Allerdings bergen solche Versuche ein erhebliches Risiko. Über weitere Wechselwirkungen eines Schwefeloxideintrags in der Stratosphäre ist schließlich kein Wissen vorhanden. Trotzdem zeigt gerade die Diskussion über die Rolle von SO₂ auf das Klimageschehen unterschiedliche Ausrichtungen.

Fakt ist, dass durch die radikale Reduzierung von SO₂ der Schwefeleintrag als Dünger in den Boden massiv zurückgegangen ist. Das wirkt sich in großem Maße auf solche Kulturen wie Raps und Rüben aus. Erhielten früher die Bauern gigantische Schwefelmengen gratis aus der Luft, ist als Folge der Rauchgasreinigung in Kraftwerken und der Verwendung schwefelarmer Kraftstoffe der daraus resultierende Mangel zur häufigsten regionalen Ernährungsstörung von Nutzpflanzen geworden.

Die Reduzierung der Abgase aus dem Hausbrand verändert das Verhalten der Vögel. In den historischen Zeiten räucherten die Vögel die Parasiten auf den Hausschornsteinen aus ihrem Gefieder. Diese Möglichkeiten wurden begrenzt. Allerdings ist in historischen Krematorien, wo die Rauchgase die alten gemauerten Schornsteine (mit ausreichend großen Sitzflächen) verlassen, dieses Schauspiel zu beobachten. Hier kommen den Vögeln die hohen Rauchgasmengen an den Krematorien zugute.

Inzwischen wird unter dem Fachbegriff Umweltengineering ernsthaft diskutiert, ob man gezielt Aerosole in die Atmosphäre einbringt, um dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken. Die alles umfassende Frage lautet also: Warum erst sogenannte »Schadstoffe« abscheiden, wenn man die gleichen Materialien als »Nutzstoffe« wieder in die Natur einbringen will.

3.1.5 Die 27. BImSchV aus dem Jahr 1997

regelt bundeseinheitlich Errichtung, Beschaffenheit und Betrieb von Anlagen zur Feuerbestattung

- Staubförmige Stoffe (Gesamtstaub) 10 mg/m³
- Kohlenmonoxid 50 mg/m³
- Organische Stoffe (Gesamt-C) 20 mg/m³
- Dioxine/Furane 0,1 ng TE/m³Furane 0,1 ng TE/m³

3.1.6 Novellierte VDI 3891 aus dem Jahr 2001

- Darstellung des Standes der Technik zur Rauchgasreinigung
- Darstellung der verfügbaren Techniken ohne Bewertung der Eignung der einzelnen Verfahren
- Umfangreiche Definition der Anforderungen an die Kalibrierung der kontinuierlichen Messtechnik
- Durchführung der regelmäßigen Emissionsmessungen

3.1.7 Novellierte VDI 3891 (teilweise noch veränderbar) aus dem Jahr 2013

- Darstellung des Standes der Technik zur Rauchgasreinigung
- Darstellung der sicherheitstechnischen Aspekte
- Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Minderung von schädlichen Umwelteinwirkungen.
- Hinweise und Empfehlungen zur Beschränkung der Emissionen
- messtechnische Anleitungen zur Ermittlung der Emissionswerte
- Unter Punkt 8 wurde die abgesenkte Temperatur in der Nachbrennkammer - mit der Zielsetzung der Primärenergieeinsparung - diskutiert.

3.2 Die thermischen Verfahren zur Rauchgasbehandlung

3.2.1 Die Nachbrennkammer

Heutzutage gehören Filteranlagen zur Grundausstattung einer Feuerbestattungsanstalt. Bis es dazu kam, wurden verschiedene Lösungen gesucht. Als erste relativ universelle Lösung für diese Problematik stellte sich der Betrieb einer Nachbrennkammer heraus. Hier wird bei einer definierten Temperatur und zu vorgegebenen zeitlichen Bedingungen das Rauchgas ausgebrannt, sodass die Schadstoffbelastung reduziert werden kann.



Die vorrangig benutzten Anordnungen waren zuerst Anbauten an die Öfen. Mitunter wurden die Nachbrennkammern direkt im Rauchgaskanal errichtet. Im Laufe der Jahre kristallisierte sich heraus, dass die Integration der Nachbrennkammer in den Ofen mit den besten Ergebnissen (thermisch und raumseitig) verbunden ist. Die Verbindung von Ofen, Nachbrennkammer, Rauchgaskanal und gemauertem Schornstein zeigte, dass sich bereits in dieser Entwicklungsphase die Qualität der Rauchgase verbessert hat.

Erfahrungen aus anderen Branchen legten nahe, dass die Rauchgase im Temperaturbereich zwischen 800°C und 870°C verbrannt werden können und dabei eine Verweilzeit von 0,3 Sekunden nicht unterschritten werden soll. Später wurden 850°C mit dem Verweis auf Dioxine festgelegt.

Nachteilig stellte sich heraus, dass sich der Gasbedarf für die Öfen erheblich veränderte. Neben den gestiegenen Kosten wurde nunmehr wesentlich mehr Kohlendioxid in die Luft gegeben. Das zum Betrieb der Nachbrennkammer erforderliche Erdgas musste auch gefördert werden. Durch wenige Verunreinigungen verbrennt Erdgas zwar relativ sauber. Trotzdem müssen die Aufwendungen für die Förderung und den Transport (einschließlich der Herstellungskosten für Rohrleitungen, Terminals, Verdichterstationen, Schiffe etc.) in die Umweltbilanz einbezogen werden. Betrachtet man die neuen Methoden zur Förderung (z.B. von Schiefergas), muss die kritische Frage nach dem ökologischen Schaden verstärkt gestellt werden.

3.2.2 Der Mineralisierungsbrenner

Die Kremationsasche muss ausreichend ausgebrannt werden. In einigen Ofentypen ist dazu die Prozesswärme vollkommen ausreichend. In anderen Technologien wird die Asche thermisch (mit Gasbrennern) ausmineralisiert. Die in einigen Öfen eingesetzten Mineralisierungsbrenner wirken positiv auf die Zusammensetzung der Rauchgase. Speziell die verlängerte Verweilzeit der umzusetzenden Gase bei hohen Temperaturen spielt dabei eine entscheidende Rolle.



3.2.3 Der Einfluss des Rauchgaskanals

Kurze Rauchgaskanäle zwischen dem Ofen und den nachfolgenden Anlagen sind ungünstig für die CO-Emissionen. Je länger die Rauchgaskanäle ausgelegt sind, desto besser werden die Restbestandteile im Abgas vollständig ausgebrannt. Somit bildete sich ein weiteres Schema zur Gestaltung der Öfen heraus:



Hier spielt eher ein zeitlicher Effekt die Rolle. Die Verweilzeit der Rauchgase im heißen Bereich erhöht sich, was sich somit günstig auf die Reaktionszeit auswirkt. Die Möglichkeit, den Rauchgaskanal als eine weitere Reaktionskammer (in die Tiefe und Breite) auszubilden, hat sich in Krematorien als günstig erwiesen, die räumliche Probleme besitzen. Durch eine günstige Auslegung sind Verweilzeiten für Rauchgase von über 3 Sekunden möglich.

3.2.4 Die Wirkungsweise der thermischen Verfahren

3.2.4.1 Der Prozess der Umsetzung der Rauchgase

Die Hauptmenge der Rauchgase entsteht in den Minuten in der Hauptbrennkammer, bis die Fettverbrennung abgeschlossen ist. In den Mineralisierungszonen (Mineralisierungskammer/ Unterofen) werden kaum noch Abgase gebildet. Hier trennt sich der Abgasstrom vom eigentlichen Verbrennungsbereich und erreicht die Nachbrennkammer. Spätestens hier muss die Umwandlung der Rauchgase so erfolgen, dass die Grenzwerte sicher eingehalten werden können. Sind die technischen Bedingungen ausreichend, wandelt sich bei diesen Reaktionsbedingungen Kohlenmonoxid (CO) zu Kohlendioxid (CO₂) um. Bestehende Rußpartikel, zyklische und andere organische Verbindungen werden oxidiert. Die Wirksamkeit der Nachbrennkammer liegt demnach in engen chemisch-physikalischen Grenzen. Hohe Temperaturen in der Nachbrennkammer führen beispielsweise zum Anstieg der Konzentration von Stickoxiden (NO_x) und begünstigen die Rückbildung von CO. Bei niedrigen Temperaturen erfolgt keine ausreichende Umsetzung der Schadgase.

3.2.4.2 Bedeutung der Nachbrandtemperatur für die CO-Verbrennung

In einigen Krematorien sind Versuche zur Absenkung der Nachbrandtemperatur durchgeführt worden. Das Niveau der Temperaturabsenkung lag im Bereich zwischen 650 bis 780°C. Je nach Ofentyp ergab sich, dass der Kohlenmonoxidgehalt auch in diesem Bereich innerhalb der Grenzwertvorgaben lag.

Im Meißner Krematorium steigt der CO-Gehalt unterhalb von 710°C in der Nachbrennkammer stark an. Oberhalb von 750°C kann mit der Nachbrandtemperatur der CO-Wert kaum noch beeinflusst werden.

Unstrittig ist, dass unterhalb von (je nach Krematorium differierenden) Nachbrandtemperaturen die CO-Bildungspotentiale ansteigen.

Bei sehr hohen Nachbrandtemperaturen (> 1250°C) ist aufgrund von Rückbildungsreaktionen ebenfalls mit höheren CO-Werten zu rechnen. Hierbei ist die Zeit der Abkühlung hinter der Nachbrennkammer ausreichend, die Grenzwerte wieder einzuhalten. Günstig wirkt in diesem Bereich ein höherer Sauerstoffgehalt (> 14%).

Viel wichtiger ist es, die Frage zu diskutieren, wo kommt das CO in welchen Mengen her und wie kann man

seine Bildung verhindern bzw. vorhandenes CO umsetzen, denn es scheint, dass hier der Technologie der Nachbrennkammer insgesamt Grenzen gesetzt sind. Man muss also das Kohlenmonoxid vorher mindern. Unter diesem Aspekt müssen Versuche (die häufig das Ziel der Energieeinsparung durch Absenkung der Nachbrandtemperaturen haben) durchaus kritisch diskutiert werden, da sie nur einen Ansatzpunkt der Schadstoffminimierung beleuchten.

3.2.4.3 Ableitungen für die Nachbrandtemperatur bei der Rußvernichtung

Ruß besteht aus kleinen Teilchen (10 bis 300 Nanometern), die miteinander verklumpen. Die Eigenschaften der Partikel bestimmen die Größe, Partikelform und Zusammensetzung. Ruß aus den Verbrennungsprozessen in Kremationsöfen enthält zusätzlich ölige Rückstände aus unvollständiger Verbrennung.

Reiner Ruß für sich betrachtet ist im eigentlichen Sinne kein Schadstoff, der auf die Umweltbewertung der Krematorien Einfluss hat. Da Ruß mit standardisierten Staubfiltern in nachfolgenden Technologieschritten abgeschieden wird, ist die Frage der Rußminimierung eher sekundär. Bedeutsamer ist, dass der Ruß, der sonst die Entzündung bzw. Selbstentzündung des Filterstaubs begünstigt, chemisch umgesetzt werden sollte. Glutnester an Filterpatronen führen zur Zerstörung des Filtergewebes.

Bei »niedrigen« Temperaturen (< 780°C) besteht die Rußproblematik fort. Erst oberhalb von 780°C werden Temperatur und Verweilzeit langsam ausreichend, um den Ruß zu vernichten, der bei der unvollständigen Verbrennung entstanden ist. Anlagentechnisch betrachtet muss also bei der Nachbrandtemperatur nur sekundär von der Kohlenmonoxidemission ausgegangen werden. Hier liegt das erforderliche Temperaturniveau höher.

3.2.4.4 Wirkung der Nachbrandtemperatur auf die Verringerung organischer Reste

Die Nachbrennkammer erfüllt normalerweise eine bedeutende Rolle zur primären Dioxinminderung. Bestehende Rußpartikel, zyklische und andere organische Verbindungen werden in der Nachbrennkammer oxidiert. Auch hier ist nicht die Temperatur in der Nachbrennkammer entscheidendes Merkmal, sondern die Verweilzeit. Aufgabe der Nachbrennkammer ist außerdem, die ringförmigen Verbindungen aufzuspalten, was eine längere Reaktionszeit verlangt. Zusätzlich entsteht bei diesen Reaktionen (Verbrennen von Benzolringen) üblicherweise Ruß. Doch gerade die Aufspaltung und Verbrennung der zyklischen Verbindungen senkt entscheidend den Dioxinanteil, da die Dioxine/ Furane bei Temperaturen unter 600°C (Maximum 350°C) - also im Bereich Wärmetauscher/ Filter - aus Halogenen und den übrig gebliebenen ringförmigen Verbindungen synthetisiert werden. Dabei wirken die metallischen Oberflächen der Wärmetauscher noch als Katalysator. Sicherlich kann durch ein schnelles Durchlaufen des Temperaturabschnitts von 350°C die De-Novo-Synthese günstig beeinflusst werden. Es ist jedoch wesentlich besser, wenn die Konzentrationen der zyklischen Reagenten niedriger ist.

Zusammenhänge zwischen Kohlenmonoxid und dem Auftreten von Dioxinen herzustellen, ist aufgrund der wenigen und teuren Messungen schwierig einzuschätzen. Man kann nur tendenzielle Schlüsse ziehen. Es scheint jedoch, dass aufgrund der Molekülgrößen und Molekülstrukturen die Reaktionszeit wesentlich entscheidender ist, als die Reaktionstemperatur, zumal sich bei Temperaturen von über 1000°C chemische Gleichgewichte teilweise zu anderen Schadstoffen hin verschieben. Entscheidend für die Emissionen ist somit der prinzipielle Aufbau der Öfen. Die Verbrennung muss in verschiedenen Ofensegmenten erfolgen, in denen die einzelnen Komponenten (Brenngut und Rauchgase) anfangs zeitgleich, bis zum Erreichen eines chemischen Gleichgewichts parallel, aber danach nacheinander verbrannt werden müssen. Die einzelnen Prozesse müssen aus der Nachbrennkammer in den Ofen vorverlagert werden.

3.2.4.5. Die Grenzen der Nachbrennkammer für die Schadstoffminimierung

Die Wirksamkeit der Nachbrennkammer liegt aber auch in engen chemisch-physikalischen Grenzen. Hohe Temperaturen in der Nachbrennkammer führen beispielsweise zum Anstieg der Konzentration von Stickoxiden (NO_x) und begünstigen die Rückbildung von CO. Hier stellt sich die Frage, ob die CO-Konzentration, wie früher angenommen wurde, als Prozessleitgröße für Schlussfolgerungen auf den Dioxinwert überhaupt sinnvoll ist. Der Nachbrennkammer kommt im Endeffekt nur die „abschließende Korrektur“ der Rauchgase zu.

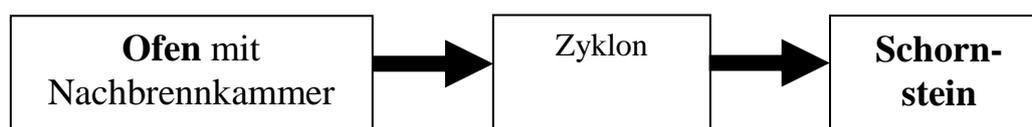
3.2.5. Verbrennungsprozesse hinter der Nachbrennkammer

Nach dem Verlassen der Nachbrennkammer folgen noch wenige Meter Rauchgaskanal. Hier erfolgt die erste Abkühlung der Rauchgase. Dabei sinkt die Temperatur um ca. 100 K je 1 Meter ab, bevor die Rauchgase auf den Kühler geleitet werden. Bei den klassischen Verbrennungsanlagen setzte sich durch die relativ langsame Abkühlung die Umsetzung der Schadstoffe im Schornstein fort. Durch die Zwischenschaltung von Filteranlagen änderte sich das Rauchgasverhalten. Spätestens beim Eintritt in den Kühler endete nunmehr die chemische Reaktionsfähigkeit zur primären Schadstoffvernichtung. Ab diesem Zeitpunkt muss mit sekundären Methoden zur Minimierung der Emissionen gearbeitet werden (Filter).

3.3. Die ersten physikalischen Verfahren zur Rauchgasbehandlung

Heutzutage gehören Filteranlagen zur Grundausstattung einer Feuerbestattungsanstalt. Bis es dazu kam, wurden verschiedene Lösungen gesucht. Das psychologisch-emotionale Problem, dass bei einem Krematorium Rauch aus dem Schornstein entweicht, verfolgt viele Mitmenschen. Historische Darstellungen verstärken noch diesen Eindruck.

Rauchgasreinigung heißt, dass Partikel abgeschieden werden sollen. Die klassischen Geräte dazu sind so genannte Massenkraftabscheider. Von den sich hier bietenden Möglichkeiten schied die Schwerkraftabscheider und Trägheitsabscheider aus und es wurden Zyklone zur Rauchgasentstaubung im Krematorium verwendet.

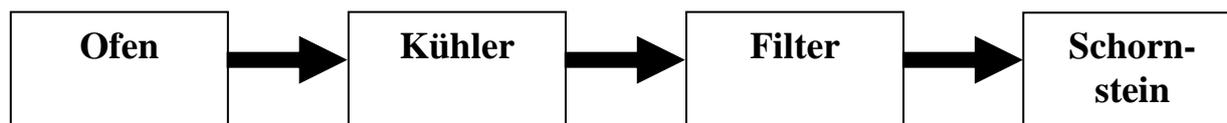


Zyklone sind Fliehkraftabscheider. Ein Fliehkraftabscheider besteht aus vier Teilen - von oben nach unten: Einlaufzylinder, Kegel, Partikelbehälter (Staubbunker) und in der Mitte angebracht das Tauchrohr. Die Rauchgase treten seitlich (tangential) ein und bewegen sich dadurch kreisförmig. Bei dieser Verwirbelung entstehen Zentrifugalkräfte, die die Staubpartikel an die Wand drücken. Im Kegel steigen die Rauchgasgeschwindigkeiten weiter an. Die Zyklonwand bremst diese Teilchen, die danach in einen Partikelbehälter fallen.

In der Mitte des Zyklons ist das Rauchgas mit weniger Partikeln belastet und wird von einem Rohr (Tauchrohr) in der Mitte abgesaugt. Die technologischen Grenzen ergeben sich aus den Rauchgasgeschwindigkeiten, den Staubpartikelgewichten und den räumlichen Gegebenheiten. Das führte dazu, dass diese Technologie durch die unterschiedlichen Partikelgrößen im Rauchgas eines Krematoriums nicht alle Staubteilchen abscheiden konnte. Die positiven Effekte, dass in den Zyklonen das heiße Rauchgas abgekühlt und grobe Partikel (z.B. glühende Holzkohlestücke) abgeschieden werden, sind aber so bedeutsam, dass in den später gebauten Rauchgasreinigungen die Zyklone oder andere Massenkraftabscheider (Absetzkammern) in abgewandelter Form noch verwendet werden.

3.4. Physikalische Verfahren zur Rauchgasreinigung

Die geforderten Umweltwerte konnten langfristig mit diesen Technologien noch nicht eingehalten werden. Als nächste Stufe mussten Staubfilter eingesetzt werden. Das allerdings setzte eine Kühlung der Rauchgase voraus. Somit sah das nächste Grundschema der Einäscherungsanlagen wie folgt aus:



Die Kühler

Nachdem die Rauchgase die Nachbrennkammer endgültig verlassen haben, müssen sie soweit heruntergekühlt werden, dass die Betriebstemperaturen der Filter erreicht werden. Je nach Abreinigungsverfahren liegen diese zwischen 120°C und 220°C. In der Regel werden dabei Luft-Wasser-Kühler und Luft-Luft-Kühler eingesetzt. Der Vorteil der Wasserkühler liegt in einer großen Übertragungsleistung bei einem geringen Volumen. Nachteilig wirkt sich die schlechte Regelbarkeit (Kochen der Kühlflüssigkeit bzw. Kondensationserscheinungen im Rauchgas) aus. Bei Wasserkühlern muss die heiße Kühlflüssigkeit (unter Druck stehend) zurückgekühlt

werden, damit sie für den Kreislauf wieder zur Verfügung steht. Dagegen lassen sich Luftkühler wesentlich genauer regeln, beanspruchen aber aufgrund der schlechteren Wärmeübertragung ein größeres Volumen.

Eine Kombination aus beiden Kühlern ist möglich. Dabei wird die Wärmegrundlast über die Wasserstufe dem Prozess entzogen und mit der Luftstufe kann die Regelung erfolgen.

Problematisch ist bei den Kühlern die Hochtemperatur-Chlorkorrosion anzusehen. Durch das Kochsalz (NaCl), das im menschlichen Körper enthalten ist, tritt diese Belastung an den heißesten Stellen des Kühlers auf.

Der Staub in den Rauchgasen enthält einen hohen Anteil an Kalzium (Ca) und Natrium (Na). Aufgrund der Zusammensetzung sintert der Staub an den Rohren fest, sodass die Kühlregister häufig gereinigt werden müssen. Dieser Verglasung kann man auch nur entgegenwirken, wenn man die Eintrittstemperatur in den Kühler so gering wie möglich hält. Hier kann man nur die Eintrittstemperatur senken oder muss mit Verschleiß oder erhöhtem Reinigungsaufwand rechnen. Die Verwendung von Strahlungskühlern, Zyklonen oder das Verlängern der Rauchgaswege sind gängige Verfahren.

Die Kühler müssen so konstruiert sein, dass der Temperaturbereich zwischen 350°C und 300°C schnell durchlaufen wird. Hier bilden sich sonst an den metallischen Kühlerflächen, die wie ein Katalysator wirken, Dioxine und Furane.

Die Rauchgase dürfen auch nicht zu stark abgekühlt werden. Unter 113°C kommt es zum Schwefelsäuretaupunkt. Das führt zur Korrosion an den Kühlern. Im Extremfall vermischt sich das Kondensat mit dem Filterstaub, vergipst und kann nur noch mit erheblichem Aufwand abgeschlagen werden.

Ideale Kühlerkonstruktionen ermöglichen Reinigungsintervalle von 16 Wochen und besitzen Standzeiten von über 70.000 Betriebsstunden.

Die Rauchgasreinigung

In den Rauchgasreinigungsanlagen werden zwei Rauchgasreinigungsverfahren angewendet - das physikalische und das chemische. Physikalisch werden beispielsweise Stäube und Quecksilber abgeschieden. Der Staub, der bei der Verbrennung entsteht, sind die mineralischen Überreste der Holzverbrennung (Sarg, Holzwolle) und die Stoff- und Papierasche (Wäsche, Füllungen). Die sterblichen Überreste wurden bereits dem Ofen entnommen. Das Quecksilber kommt aus den Amalgamfüllungen.

Durch chemische bzw. physikalisch-chemische Prozesse werden Dioxine und Furane, organische und anorganische Stoffe abgeschieden bzw. umgesetzt. Die Möglichkeit der Kombination verschiedenster Verfahren ist vielfältig. Bemerkenswert ist, dass der Großteil der Dioxine an den Staub direkt gebunden ist. Eine sehr gute Staubabscheidung ist die Voraussetzung für eine wirksame Dioxinminderung in den Nachfolgeaggregaten.

Die physikalischen Verfahren der Rauchgasreinigung

Für physikalische Verfahren werden im Kremationsbereich fast ausschließlich Gewebefilter verwendet. Den Gewebefiltern sind gegebenenfalls Zyklone vorangestellt. Bei den Gewebefiltern wird üblicherweise Teflongewebe verwendet. Hier kann man von über 8000 Betriebsstunden ausgehen. Der Einsatz von metallischen Filterelementen ist möglich. Standzeiten der Metallfilter von weit über 25.000 Betriebsstunden sind möglich. Hochtemperaturfilterverfahren (Hochtemperatur-Keramikfilter) eignen sich wegen des geringen Schmelzpunktes des Filterstaubes nicht. Nassabscheideverfahren haben sich aufgrund der geringen Staubgröße nicht bewährt. Elektrofilter werden selten eingesetzt.

Gefahren für den Filter

Filterbrände stellen die Hauptgefährdung bei Kremationsanlagen dar. Meist wird dabei das Filtergewebe zerstört und wird damit unbrauchbar. Selbst bei metallischen und keramischen Filtern versintert bei derartigen Ereignissen die Oberfläche durch das Schmelzen der Aschen, sodass an diesen Stellen kein Rauchgas mehr durch das Filtermaterial gelangt.

Voraussetzung ist allerdings, dass der Filterstaub (und selten auch das Filtermaterial) brennbar ist. Dabei spielt der Kohlenstoffgehalt (durch Ruß im Rauchgas) im Filterstaub eine entscheidende Rolle. Liegt er unter einem bestimmten Grenzwert, ist ein Filterbrand unwahrscheinlich. Filterstäube gelten ab einem Kohlenstoffgehalt von über 10% als brandgefährdet.

Filterbrände entstehen einmal, wenn Funken in den Filter gelangen und dort den Verbrennungsvorgang in Gang setzen. Bei diesem Feuer wird brennbares Material (bei Vorhandensein von Oxidationsmitteln – meist Sauerstoff) durch eine sogenannte externe Zündquelle entzündet. Sie liefert die notwendige Zündenergie. Sauerstoff ist hinreichend vorhanden.

Die Hauptursache ist jedoch die Selbstentzündung. Diese Erscheinung der Selbstentzündung ist aus vielen Lebensbereichen bekannt. Im Fall einer Selbstentzündung wird die Zündenergie nicht von außen geliefert, sondern durch das brennbare Material. Eine Selbstentzündung verläuft schrittweise. Es geht zuerst eine Selbsterwärmung voraus.

An einer Selbsterwärmung sind verschiedene exotherme Prozesse beteiligt, die chemischer oder physikalischer Natur in Filtern sind. Biologische Prozesse kommen in Krematorien nicht zum Tragen. Diese Reaktionen setzen nun mehr Wärme frei als vom brennbaren Material wieder abgeführt werden kann. Die Folge ist ein Wärmestau. Das betrifft insbesondere schlecht durchströmte Bereiche am Filterelement. Das wiederum führt zum

Temperaturanstieg, einer daraus resultierenden schnelleren Reaktionsgeschwindigkeit, bis die Zündtemperatur des brennbaren Materials überschritten wird. Aus einem anfänglichen Glimmbrand können sich in Extremsituationen offene Flammen entwickeln.

Mitunter führten in der Vergangenheit derartige Filterbrände teilweise zu unberechtigten Forderungen gegenüber den Filterlieferanten.

Dass schon allein diese Anforderungen den technischen Rahmen von Betrieben sprengten, zeigte sich in den Fakten, dass die Ofenbaufirmen, die Anfang der 1990er Jahre bestanden, 15 Jahre später in neuen Formen und Strukturen der Eigentumsverhältnisse weiterarbeiten mussten bzw. nicht mehr existierten, was in einer teilweise über 100jährigen Betriebsgeschichte vorher undenkbar schien. All das soll ein Beispiel dafür sein, wie Umweltschutz persönliche Existenzen im großen Stil vernichtet.

3.5. Die chemischen und physikalisch-chemischen Verfahren

Bei diesen Abreinigungsverfahren werden die Schadstoffe chemisch soweit umgewandelt, bis keine Umweltgefährdung mehr von ihnen ausgeht, bzw. so gebunden, dass die Grenzwerte zur Reinhaltung der Luft erreicht werden können. Ausgehend von den Grenzwerten sind Dioxine und Furane und andere Kohlenwasserstoffe zu behandeln. Es haben sich dabei zwei Verfahren durchgesetzt: Die Absorptionsverfahren (Flugstrom, Festbett) arbeiten im Temperaturbereich von 120°C bis 140°C am effektivsten und die Katalysatorverfahren können bei höheren Temperaturen betrieben werden.

Das Flugstromverfahren

Hierbei werden in der Regel Kalk-Aktivkohlegemische mit großer Oberfläche in den Rauchgasstrom vor dem Gewebefilter (mit ggf. vorgeschaltetem Zyklon) dosiert. Vorteilhaft ist, dass dieses Verfahren einen geringen Platzbedarf beansprucht und leicht zu handhaben ist. Der Nachteil des Verfahrens liegt in den Betriebskosten. Es muss pro Einäscherung mit 0,5 bis 1 kg Materialeinsatz gerechnet werden. Bei diesen Verfahren müssen die Filter leicht abzureinigen sein, damit das Gewebe sich nicht zusetzt.

Das Festbettverfahren

In einem Festbett, was dem Gewebefilter nachgeschaltet ist, werden die Schadstoffe an der Oberfläche oder in den Poren der Schüttung gebunden. Häufig sind das Schüttungen aus Herdofenkoks, Aktivkohle oder auch Kalk-Aktivkohlegranulaten. Hier werden die Schadstoffe bis zur Sättigung des Festbettes abgeschieden. Danach muss das Festbett ausgetauscht werden. Bei Festbettverfahren mit Herdofenkoks oder Aktivkohle muss aus Brandschutzgründen die Schüttung eher ausgetauscht werden. Außerdem erfordern diese Anlagen eine hohe Sicherheitstechnik, um Bränden vorzubeugen.

Selten sind regenerative oder mehrschichtige Festbetтанlagen zu finden. Bei regenerativen Anlagen werden die Schadstoffe durch Temperaturerhöhung aus der Schüttung wieder heraus getrieben und im Kreislauf über einem Katalysator verbrannt. Damit ist die Kapazität des Festbettes wiederhergestellt. Noch effektiver ist die katalytische Dotierung von Zeolithen, die sich im Festbett befinden. Hier werden die eingelagerten Dioxine katalytisch in einer Zeitreaktion (Dauer von 200 Tage) zerstört. Es regeneriert sich das Festbett von allein. Betriebszeiten von weit über 5 Jahren sind möglich.

Nachteilig an den Festbettverfahren ist, dass der Reststaub aus dem Gewebefilter den Druckverlust der Schüttung ansteigen lässt. Das kann man umgehen, indem man in einem Mehrschichtfestbett die erste Schicht regelmäßig austauscht.

Oxidationsverfahren

Möglichkeiten zur Dioxinzerstörung bestehen, indem man Ozon (O₃) dem Rauchgas zusetzt.

Katalytische Verfahren

Katalysatoren werden zur Vernichtung von Dioxinen/ Furanen und anderen Verbindungen an vielen Stellen in den Rauchgasstrom eingefügt, da für die chemische Aktivität des Katalysatormaterials bestimmte Mindesttemperaturen eingehalten werden müssen. Die unmittelbar in den Kühler eingebauten Katalysatoren erreichen ohne zusätzlichen (thermischen) Aufwand ihre Arbeitstemperatur. Sie haben den Nachteil, dass sie sich im ungereinigten Rauchgas befinden und häufig gereinigt werden müssen. Die Belastung des Rauchgases mit Katalysatorgiften (Schwermetallen) ist an dieser Stelle sehr hoch. Durch regelmäßigen und rechtzeitigen Wechsel der Katalysatorelemente (Katalysatorblöcke) können die Grenzwerte eingehalten werden.

Katalysatoren, die bei niedrigen Temperaturen aktiv sind, können in das Filtergewebe direkt eingewebt werden. Bei dieser Anwendung sind aber Kohlenmonoxidspitzen (die beim Einfahren des Sarges in den Ofen, oder bei schweren Verstorbenen auftreten können) unbedingt. Da Dioxinkatalysatoren häufig auch CO umsetzen, kann die Temperatur im Filter dermaßen ansteigen, dass das Filtergewebe verbrennen kann.

Bei einigen Anlagen werden die Rauchgase wieder aufgeheizt und dann über einen Katalysator, der sich nach

dem Filter befindet, geleitet. Da die aktiven Katalysatoroberflächen größtenteils aus Edelmetallen bestehen, ist der Anschaffungspreis sehr hoch.

Das Verfahren der nachträglichen Umwandlung von Kohlenmonoxid zum ungefährlichen CO₂ kann ebenfalls zur Anwendung gelangen.

Behandlung der Filterstäube

Der anfallende Filterstaub hat eine geringe Schüttdichte (0,1 g/cm³), sodass das Entsorgungsvolumen groß ist. Mit geeigneten Verdichtern kann der Filterstaub verpresst bzw. granuliert werden. Dabei sind Schüttdichten von 1,5 g/cm³ möglich. Sinnvoll ist die chemische Weiterbehandlung des Filterstaubes, um beispielsweise die Deponiefähigkeit auf der Hausmülldeponie zu erreichen. Dazu sind beispielsweise 6-wertige Chromionen in 3-wertige umzuwandeln.

Die Rückführung des Filterstaubs in die Urnen ist eine weitere bekannte Lösungsmöglichkeit.

4. Der ökologische Rucksack zum Erreichen der Umweltziele

4.1. Umweltschutz und der Satz von der Erhaltung der Energie

Wie in allen Bereichen der Welt gilt der Satz von der Erhaltung der Energie. Wäre diese modern verfügbare Energie nicht vorhanden, könnte keine Umwandlung in Arbeit erfolgen. Wieso sollte das beim Umweltschutz anders sein? Will man Umwelteffekte erzielen, muss »etwas« gemacht werden. Dieses »etwas« ist nur mit zusätzlicher Energie, die in den verschiedensten Prozessstufen in den Umweltprozess einfließen muss, möglich. Diese Prozessstufen beginnen bei der Anlagenherstellung und enden bei dem Betrieb der Umwelthanlagen.

An dieser Stelle beginnt das Bewertungsproblem. Die jährlichen Aufwendungen des Umweltschutzes in einzelnen Betriebsbereichen sind schnell erfasst. Man bewertet die dazu notwendigen Betriebskosten und berücksichtigt die Abschreibungen der entsprechenden Anlagen.

Fakt ist, dass jeder ausgegebene Euro bereits im Vorfeld einen entsprechenden Umweltschaden verursacht hat. Man benötigt schließlich Energie, Material, Rohstoffe und Wissen zur Herstellung von Erzeugnissen. Das schlägt sich im Preis nieder. Auf der anderen Seite wäre zu berechnen, wie hoch der Umweltschaden ist, wenn man den Umwelteuro nicht ausgibt. Zusätzlich erhöhen sich die Kosten des laufenden Betriebes. Der Verbrauch an Elektroenergie verzehnfachte sich teilweise. Die Emissionsmesstechnik für einen Ofen besitzt heutzutage den gleichen elektrischen Anschlusswert wie es für den Betrieb eines gesamten Krematoriums vor den Umweltmaßnahmen nötig war.

Das praktischste Beispiel zum Thema »Umwandlung von Energie in Arbeit«, stellt die Landwirtschaft dar. Oftmals stellt sich die Frage, wieso immer weniger Menschen durch ihre Arbeit immer mehr Erdbewohner ernähren können. Der Schlüssel liegt darin, dass der Energieeinsatz in der Landwirtschaft gestiegen ist. Früher hat ein Bauer mit seiner abgeklapperten Kuh nur eine kleine Fläche bewirtschaften können, die seiner Familie ein spärliches und dem Fronherrn ein hinreichendes Auskommen ermöglichten. Manchmal konnte der Bauer auch zum Markt fahren. Heute kann der einzelne Mensch durch die Nutzung von Energie immer größere Flächen allein bewirtschaften. Der Nutzen liegt auf der Hand. Die Welternährungslage hat sich in den letzten Jahrzehnten verbessert.

4.2. Der ökologische Euro – ein Beitrag zur Umweltverschmutzung

Umweltschutz ist eine Investition in die Zukunft. Es muss aus diesem Grunde genau abgewogen werden, ob Maßnahmen sinnvoll sind oder ob sie gar der Natur schaden. Welcher Preis ist heute zu zahlen, damit morgen die Umwelt besser wird?

Um es vorwegzunehmen: Einen Umweltschaden kann man wahrscheinlich nicht genau berechnen, meist basieren diese Werte auf Risikoberechnungen der Versicherungskonzerne, deren wirtschaftliches Ertragsziel durch Angst untermauert wird. Davon abgeleitet existieren bei der UNO und deren Unterorganisationen Veröffentlichungen, in denen ein Umweltschaden finanzieller Art bestimmten Emissionsmengen zugeordnet ist. Dabei sind die Auswirkungen des Treibhausgases Kohlendioxid am gravierendsten bewertet, weil großflächige Überflutungen erwartet werden.

Hier besteht der Widerspruch zwischen den ökonomischen Aspekten des Geldverdienens und der Ökologie. Manchmal kann es schon umweltschonender sein, ganz auf sogenannte Umweltschutzmaßnahmen zu verzichten, bis in Zukunft eine sinnvolle Lösung existiert.

Welche Lösungen sind richtig? Da beginnt die Glaubensfrage - auf keinen Fall jedoch die Wissensfrage.

Atomkraftwerke, Windenergieerzeugung, Photovoltaik, Kernfusion, konventionelle Wärmekraftwerke, Wasserkraftwerke etc. - jede Technologie hat ihre Vor- und ihre eigenen Nachteile. Hier muss man gegeneinander abwägen. Wer die Kohlendioxidmenge senken will, kommt an Atomkraftwerken nicht vorbei. Wer Atommüll vermeiden will muss auf Windenergieerzeugung setzen. Wer Strom bei Windstille benötigt,

muss... und das solange, bis sich die Katze wieder in den Schwanz beißt.

Spätestens dann, wenn man die Diskussion ernsthaft dazu entfacht, ob der Mensch die Merkmale eines Schädlings besitzt, ist es nur noch ein kleiner Schritt zum Ökofaschismus. Dann wird es nicht mehr weit sein, bis Menschen unter dem »großen Ziel« des Umweltschutzes ermordet werden. Geschichte wiederholt sich. Nur die Deckmäntel sind andere...

Der weitere Weg zum Umweltschutz muss sich nunmehr an der konsequenten Senkung des Primärenergieeinsatzes orientieren. Das heißt außerdem, dass die Anlagen möglichst reparaturarm und wartungsfrei arbeiten müssen, damit globale Umweltziele erreicht werden können. Wenn das nicht der Fall ist, bewirkt Umweltschutz genau das Gegenteil des Gewollten und die Natur wird weiter geschädigt.

4.3. Die Realität der ökologischen Ziele in Krematorien

Manche Krematorien verbrauchen inzwischen das Zehnfache an Gas und ein Vielfaches an Strom im Vergleich zum letzten Jahrhundert. Gas verbrennt. Hier findet die Energieumwandlung direkt in den Öfen statt. Doch selbst Strom kommt nicht nur so einfach aus der Steckdose: Bei der Erzeugung von 1 kWh Strom aus fossilen Rohstoffen entstehen etwa 1.300 mg CO und etwa 40 bis 80 mg Staub, die global als sekundäre Emissionen berücksichtigt werden müssen.

Was war passiert? Bei Messungen Anfang der 90er Jahre stellt man fest, dass in Krematorien die Werte nach TA Luft für Staub und Kohlenmonoxid (CO) im Rauchgas erhöht sind. Der Flugstaub besteht zu über 90% aus den Verbrennungsresten des Sarges (weiße Holzrasche) und der Füllmaterialien (Papierasche). Der Rest ist Ruß. So gesehen: Unschädlich. Die Emissionen der an Wochenenden millionenfach betriebenen Holzkohlegrills (mit genau denselben Rauchgasen) sind wesentlich höher.

Setzt man dagegen, dass eine Filterlinie 50 Tonnen hochlegiertes Material enthält, was aus Erzen mit Energieaufwand gewonnen und verarbeitet werden muss, so wird schnell klar, dass der Umwelteffekt nach frühestens 250 Jahren zum Tragen kommt.

Bei weiteren Messungen Anfang der 1990er Jahre waren bei Verbrennungen ohne Filteranlage am Schornsteinkopf keine Dioxine nachweisbar. Die Abgase verließen den Schornstein mit über 500°C. In der Luft wurden die Schwaden schlagartig so verdünnt und abgekühlt, dass keine chemischen Reaktionen mehr auftraten. Durch den Einsatz von Filtern mit den notwendigen vorgelagerten Kühleinrichtungen wurden nunmehr Dioxine und Furane erzeugt. Dem lagen die Effekte zugrunde, dass die metallischen Filterflächen katalytisch wirkten und die Rauchgase unterhalb von 350°C üblicherweise langsamer abkühlten, da die Temperaturdifferenzen geringer werden. Somit wurden optimale Bedingungen für die De-Novo-Synthese geschaffen. Der Dioxinstrom im Rohgas erreichte Größenordnungen von bis zu 1 µg/Nm³. Aus diesem Grunde wurde der Grenzwert für Dioxine/Furane in die Regelungen neu aufgenommen und weitere Grenzwerte erlassen. Zwangsläufig führte das zu neuen Anlagenkomponenten, für deren Betrieb weitere Energie notwendig wurde. Kurz und gut: Jetzt werden Schadstoffe mit riesigem Energieaufwand erzeugt, die vorher nicht existierten - nur um unschädliche Emissionen abzuscheiden, die eher ein optisches psychologisch-emotionales Problem sind. Die vorbeschriebenen Aerosoleffekte kann man in diese Bewertung mit einbeziehen.

Wirtschaftlich betrachtet sind wiederum die Kosten für den Umweltschutz anderen Kosteneinsparungen entgegenzusetzen. Durch den Betrieb der Filteranlage lassen sich bei bestimmten Ofentypen die Einäscherungszahlen pro Zeiteinheit erhöhen. Wurden früher (unter Normalzugbedingungen im Schornstein und abhängig vom Ofentyp) vier bis sieben Verstorbene pro Ofen und Schicht eingeäschert, so können aufgrund der höheren geförderten Rauchgasmenge durch den Filterbetrieb fünf bis dreizehn Einäscherungen in derselben Zeiteinheit erreicht werden.

Durch die erweiterte technische Ausstattung der Krematorien haben sich die Emissionen und die Energieverbrauchswerte in unterschiedliche Richtungen entwickelt:

	nur Ofen	mit Nachbrennkammer	mit Filter
Strom Anschlusswert pro Ofen	3 bis 10 kW	3 bis 10 kW	40 bis 120 kW
Gasverbrauch pro Einäscherung	4 bis 60 m ³	6 bis 120 m ³	6 bis 120 m ³
Emissionsmessung (elektrischer Anschlusswert)	-	-	4 bis 10 kW
Dioxine im Reingas	-	-	0,004 bis 0,1 ng/Nm ³
Dioxine im Rohgasstrom	-	-	0,01 bis 0,1 µg/Nm ³
Masse der Filteranlage gesamt pro Ofen	-	-	8 bis 15 t
Masse Nebeneinrichtungen pro Ofen	-	-	5 bis 10 t
primäre Staubbelastrung Reingas ohne Rußanteil	40 mg/ Nm ³	40 mg/Nm ³	0,5 bis 5 mg/Nm ³
primäre Staubbelastrung	40 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³	0,2 bis 5 mg/Nm ³

Reingas nur Ruß			
sekundäre Staubbelastung Reingas durch Stromerzeugung	-	-	1,5 bis 6,0 mg/Nm ³
primäre Kohlenmonoxidemission durch das Krematorium (Durchschnitt)	200 mg/Nm ³	10 bis 50 mg/Nm ³	10 bis 50 mg/Nm ³
sekundäre Kohlenmonoxidemission durch die Stromerzeugung (Kraftwerk)	-	-	18 bis 36 mg/Nm ³
sekundäre Kohlenmonoxidemission durch Erdgas (Nachbrennkammer)	-	0,1 bis 2,0 mg/Nm ³	0,1 bis 2,0 mg/Nm ³
Organische Stoffe	100 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³	20 mg/ Nm ³

Spätestens bei der Auswertung dieser Tabelle spürt man, dass es auf den Ansatz ankommt, von welcher Seite der Umweltschutz betrachtet wird. Beginnt der Betrachtungswinkel bei den energetischen Aspekten, müssen die Filter abgeschaltet werden. Sieht man die Emissionen an der ersten Stelle, gibt es weitere technische Lösungen, die eingebaut werden könnten. Die Wahrheit wird also irgendwo in der Mitte liegen.

Somit wird einerseits erkennbar, dass es möglich ist, Emissionen in Krematorien zu begrenzen. Fakt ist andererseits, dass zum Erreichen der durchschnittlich erzielbaren Grenzwerte viel Energie benötigt wird und Anlagen gebaut werden müssen, die einen erheblichen Rohstoffeinsatz erfordern. An dieser Stelle muss die technische Entwicklung auf jeden Fall weitergehen. Das ideale Krematorium benötigt wenig Energie und bietet minimale Emissionen.