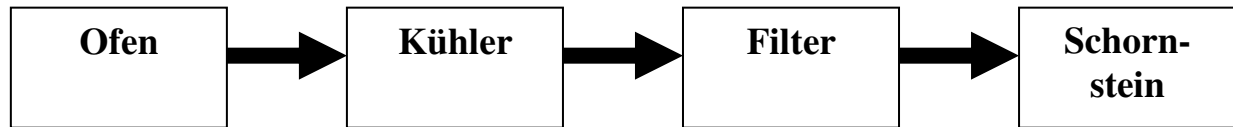


Verfahrenstechnische Betrachtungen und Grundaufbau moderner Kremationsanlagen

Lange sind die Zeiten vorbei, wo ein Krematorium nur aus der Feierhalle, einer Leichenhalle und den meist unterirdisch eingebauten Öfen bestand. Heutzutage gehören Filteranlagen zur Grundausstattung einer jeden Feuerbestattungsanstalt. Trotz der Vielzahl unterschiedlichster technischer Lösungen existiert ein Grundschemata im Anlagenaufbau.

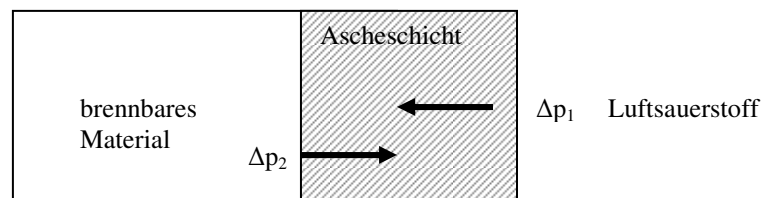


Die Verbrennung im Ofen erfolgt zwischen 650°C und 1200°C. Die entstehenden Rauchgase verlassen den Ofen mit Temperaturen zwischen 870°C und 1400°C. Anschließend werden sie auf 120°C bis 200°C abgekühlt, um dann gefiltert zu werden.

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 in einer Erdgrube mit Hilfe von 200 Litern Benzin, sich unliebsamer Mitmenschen zu entledigen, funktioniert nicht. Woran liegt das?

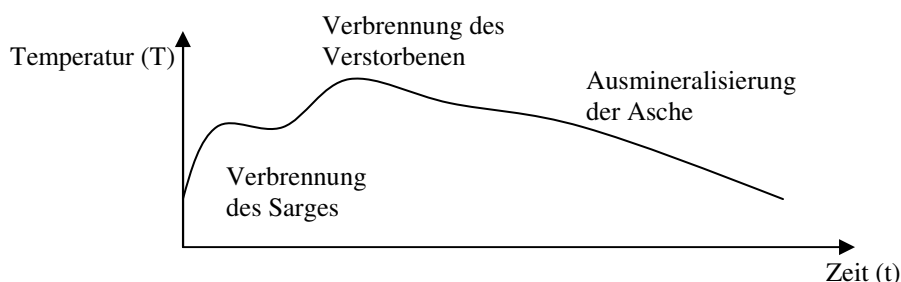
Modellieren wir den Verbrennungsprozess aus physikalisch-chemischer Sicht. Grob veranschaulicht passiert folgendes: Der Sauerstoff reagiert mit dem Brenngut, die Rauchgase entweichen und es bildet sich eine erste Schicht Asche. In der nächsten Phase muss erst der Sauerstoff durch die Ascheschicht zum Brenngut vordringen. Dort erfolgt die Reaktion, die entstandenen Rauchgase entweichen durch die Ascheschicht zurück 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.

Die Energiebilanz

Die Einäscherung des Verstorbenen können wir in 2 Phasen unterteilen. Die eigentliche Verbrennung und die Ausmineralisierung der Knochen. Doch das ist die halbe Wahrheit. Zu einer Einäscherung gehört ein Sarg. Zum einen ist der Sarg das Behältnis, mit dem der Verstorbene überhaupt in den Ofen eingefahren werden kann, 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.

Die Aktivierungsenergie

Um eine Reaktion überhaupt in Gang zu bringen, muss ein Aktivierungsenergieniveau erreicht sein. Bei einer Verbrennung von organischem Material hat sich in der Technik eine Mindesttemperatur (und Sicherheitstemperatur) von 650°C durchgesetzt. Allerdings ist diese Temperatur noch nicht ausreichend, um den Einäscherungsprozess optimal zu führen. Hier sollten Temperaturen von mindestens 800°C erreicht werden.

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.

Der Ofen

Geschichtlich betrachtet ist die Zeit von 1870 bis 1930 die Epoche der Entwicklung der verschiedensten Öfen. Danach wurden keine wesentlichen Änderungen technischer Art mehr vollzogen.

Es existieren heutzutage 2 Grundtypen der Kremationsöfen. Der Flachbettofen und der Etagenofen. Beim Flachbettverfahren erfolgen Einäscherung und Mineralisierung in einer Ofenkammer (Muffel).

Beim Etagenofen erfolgt die Verbrennung der Leiche im Oberofen, während die Ausmineralisierung der Knochen im Unterofen stattfindet.

Beide Ofentypen unterscheiden sich auch im Aufbau. Bedingt durch die Größe und die Höhe (über 2 Etagen) ist in einem Etagenofen viel Feuerfestmaterial verbaut. Der wesentlich kleinere Flachbettofen ist leichter und kompakter. Hier zeigt sich, dass der Flachbettofen für kleinere Krematorien oder Feuerbestattungsanstalten, die nicht jeden Tag einäschern, geeignet ist. Er muss nicht so lange bis zur Mindesttemperatur von 650°C aufgeheizt werden. Die Investitionskosten sind gering. Allerdings sind die laufenden Betriebsausgaben sehr hoch.

Der Etagenofen dagegen ist für Krematorien geeignet, die viele Einäscherungen vollziehen. Der Vorteil des Etagenofens ist seine Energieeffizienz und der geringe Wartungsaufwand. Die Abwärme, die bei der Verbrennung im Muffel entsteht, wird im Unterofen zur Ausmineralisierung der Asche genutzt. Durch die dickeren Schichten von Feuerfestmaterial sind die Reparaturzyklen wesentlich länger. Den niedrigen Betriebskosten stehen hier hohe Investitionskosten entgegen.

Bei Etagenöfen ist es möglich, mit durchschnittlich 2m³ Erdgas pro Einäscherung auszukommen. In Flachbettöfen mineralisiert das Knochengerüst nur dann aus, wenn die Brenner zugeschaltet werden. Hier kann der durchschnittliche Gasverbrauch bis 60m³ pro Einäscherung betragen. Auch hier kann es Schwankungsbreiten geben. Es gibt Etagenöfen, die aufgrund ihrer Konstruktion ebenfalls mit 30m³ Erdgas betrieben werden müssen.

Wenn wir an dieser Stelle einmal zusammenfassen, zeigt sich, dass bereits hier verfahrenstechnische Schranken existieren. Die Grenzen für eine vollständige Kremierung können nur in einem Ofen eingehalten werden. Eine Einäscherung kann nur innerhalb von 90 bis 120 Minuten vollzogen werden. Selbst bei optimaler Fahrweise der Öfen dauert der Einäscherungsprozess minimal 70 Minuten. Durch die technische Besonderheit des Etagenofens (dass die Prozesse in 2 getrennten Kammern ablaufen) kann zwar aller 35 Minuten der Ofen beschickt werden. Die eigentliche minimale Reaktionsdauer liegt trotzdem bei 2 x 35 min also auch bei 70 Minuten. Ein wesentliches Kriterium für die Einäscherungsgeschwindigkeit ist die technische Auslegung der Filteranlage. In Anlagen mit Filterauslegungen bis zu 10000 Betriebskubikmetern pro Stunde (4800 Nm³/h) sind geringe Einäscherungszeiten die Norm. In kleineren Anlagen (1700 – 2300 Nm³) muss durch die Reduzierung der Luftmenge die Verbrennungsgeschwindigkeit soweit vermindert werden, dass die Filteranlage einen ordnungsgemäßen Betrieb gewährleisten kann.

Bei früheren Anlagen, die nur über einen Schornstein (im Normalzug) betrieben wurden, konnten diese schnellen Einäscherungszeiten (mit optimierten Filteranlagen), nicht erreicht werden.

Die Nachbrennkammer

Nachdem die Verbrennung abgeschlossen ist, verlassen die Rauchgase den eigentlichen Ofen. Die Asche des Verstorbenen befindet sich im Aschekasten, kühlt dann später aus, wird in der Aschemühle zerkleinert und in die Urne abgefüllt. Dem Ofen schließen sich die Nachbrennkammer und der Rauchgaskanal (Fuchs) an. Die Nachbrennkammer ist inzwischen konstruktiv ein Teil des Ofens geworden.

In der Nachbrennkammer verweilen die Rauchgase bei einer Mindesttemperatur von 870°C mindestens 0,3 Sekunden, damit Schadstoffe ausgebrannt werden können. Längere Verweilzeiten verbessern natürlich den Ausbrand der Rauchgase. In manchen Nachbrennkammern werden inzwischen Zeiten von 3 s erreicht. Bei diesen Reaktionsbedingungen wandelt sich das giftige Kohlenmonoxid (CO) zu Kohlendioxid (CO₂) um. Bestehende Russpartikel, zyklische und andere organische Verbindungen werden oxidiert. 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 sogar die Rückbildung von CO.

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 200°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, so dass 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 gangbare 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 2 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 Teflontextil 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.

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 3 Verfahren durchgesetzt. Die Absorptionsverfahren (Flugstrom, Festbett) arbeiten im Temperaturbereich von 120°C bis 140°C am effektivsten. 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 dabei Schüttungen aus Herdofenkoks, Aktivkohle oder auch Kalk-Aktivkohlegranulaten anzutreffen. 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 in einer Zeitreaktion (Dauer 200 Tage) zerstört. Hier regeneriert sich das Festbett von allein. Betriebszeiten von 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 1. Schicht regelmäßig austauscht.

Oxidationsverfahren

Möglichkeiten zur Dioxinzerstörung bestehen, indem man Ozon (O₃) 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 im ungereinigten Rauchgas sich 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.