

# Einfluss der Temperatur in der Nachbrennkammer von Kremationsöfen auf die CO-Konzentration im Abgas

J. Bachmann, J. Kiecherer, J. Sommerer, M. Olzmann

**Zusammenfassung** Mithilfe eines detaillierten reaktionskinetischen Modells wurde der CO-Gehalt im Abgas von Krematorien für prozess-typische Bedingungen simuliert. Vorausgesetzt wurde dabei, dass die Oxidation von CO zu CO<sub>2</sub> im Wesentlichen in der Nachbrennkammer erfolgt. Ein in der Literatur vorgeschlagener qualitativer Zusammenhang zwischen CO-Gehalt, O<sub>2</sub>-Gehalt und Reaktionstemperatur konnte bestätigt und quantifiziert werden. Aus den Modellrechnungen folgt, dass die Einhaltung der vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer unabdingbar für die Einhaltung des CO-Grenzwertes von 50 mg/m<sup>3</sup> ist.

## Influence of the temperature in the post-combustion chamber of cremators on the CO concentration in the exhaust gas

**Abstract** A detailed chemical kinetic model was used to simulate the CO content in the exhaust gas of crematories under process-typical conditions. It was presumed that oxidation of CO to CO<sub>2</sub> essentially takes place in the post-combustion chamber. A qualitative relation between CO content, O<sub>2</sub> content, and temperature that was taken from the literature could be confirmed and quantified. From the calculations, it follows that maintenance of the legal minimum temperature of 850 °C in the post-combustion chamber is necessary to comply with the CO legal emission limit of 50 mg/m<sup>3</sup>.

## 1 Einleitung

In Deutschland werden gegenwärtig ca. 150 Krematorien mit über 250 Einäscherungsöfen betrieben. Den Betrieb von Krematorien regelt die Siebenundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 19. März 1997 (27. BImSchV) [1]. Einäscherungsanlagen zählen gemäß dieser Verordnung nicht zu den genehmigungspflichtigen Anlagen. Ihr Betrieb ist nur anzeigepflichtig; baurechtliche Anforderungen bleiben davon unberührt.

Gemäß § 4 der 27. BImSchV dürfen Anlagen nur so errichtet und betrieben werden, dass bei den Emissionen folgende Grenzwerte im Abgas nicht überschritten werden:

- Kohlenmonoxid (CO): Stundenmittelwert 50 mg/m<sup>3</sup>,
- Gesamtstaub: Stundenmittelwert 10 mg/m<sup>3</sup>,
- organische Stoffe (angegeben als Gesamtkohlenstoff, TOC): Stundenmittelwert 20 mg/m<sup>3</sup>,
- polychlorierte Dioxine und Furane (angegeben als Summenwert): Mittelwert über die jeweilige Probenahmezeit 0,1 ng/m<sup>3</sup>.

Die Werte beziehen sich auf das Abgasvolumen im Normzustand (i. N.,  $T = 273 \text{ K}$ ,  $P = 1013 \text{ mbar}$ ) nach Abzug des Feuchtegehaltes und auf einen Volumengehalt an Sauerstoff von 11 % [1]. In der vorliegenden Untersuchung konzentrieren wir uns auf die CO-Emissionen.

Die Einäscherung ist ein Prozess, der in verschiedenen Teilschritten abläuft (siehe z. B. [2]). In der Hauptbrennkammer des Ofens, die den Sarg aufnimmt, herrscht eine Mindesttemperatur von ca. 650 °C. Die Kammer wird, wie die anderen Bereiche Mineralisierung und Nachbrennkammer, in der Regel von Erdgasbrennern vorgeheizt bzw. auf Betriebstemperatur gehalten. Die Verbrennung in der Hauptbrennkammer dauert ca. 50 bis 60 min. Anschließend werden die Rückstände in die Mineralisierungskammer überführt, wo sie noch einmal ca. 40 min verweilen. Die so nahezu vollständig ausgebrannte Asche gelangt in die Kühlkammer und wird dann aus dem Ofen entnommen. Die Abgase durchströmen den Ofen durch die genannten Kammern in der angegebenen Reihenfolge. Bevor das Abgas den Ofen verlässt, wird eine Nachbrennkammer durchströmt. Für diese besagt § 3 (2) der 27. BImSchV: „Die Temperatur nach der letzten Verbrennungsluftzuführung muss mindestens 850 °C, ermittelt als Zehnminutenmittelwert, betragen“. Gemäß § 8 (3) der 27. BImSchV gilt der Grenzwert für CO als eingehalten, wenn kein Stundenmittelwert (kontinuierlich ermittelt) den o. g. Grenzwert von 50 mg/m<sup>3</sup> überschreitet.

Die Einhaltung der Grenzwerte für die Emissionsparameter Staub, Dioxine und Furane sowie Gesamt-C (TOC/FID) ist in der Regel durch technische und technologische Maßnahmen ohne Probleme möglich. Demgegenüber zeigen Vor-Ort-Messungen, dass die Anzahl der Messwerte für den Parameter Kohlenmonoxid an den meisten Krematorien die o. g. Vorgabe der 27. BImSchV überschreitet. Es ist aber auch bekannt, dass bei Kremationsöfen, in denen die vorgeschriebene Temperatur in der Nachbrennkammer eingehalten wird, die geringste Anzahl von CO-Grenzwertüberschreitungen auftritt. Beobachtet wird weiterhin, dass diese Öfen keine oder nur geringe Gasverbräuche in der Nachbrennkammer haben. Die Temperatur in der Nachbrennkammer wird ohne zusätzliche Energiezufuhr gehalten.

Je nach technischem Zustand und Betriebsweise des Krematoriums (Alter der Anlage und der Steuerung, Wartungszustand, Falschlufteinflüsse etc.) kann jedoch auch ein erheblicher Anteil der Stundenmittelwerte über dem Grenzwert liegen. Als besonders relevant für dessen Einhaltung nennen die Betreiber in der Regel vier verschiedene Phasen der Kremation:

1. Beginn der Kremation – Überführung des Sarges in den Ofen (Öffnen der Ofentür),
2. Sargaufbruch nach ca. 10 bis 20 min,
3. Überführung der Verbrennungsrückstände (mit noch unverbrannten Bestandteilen) in die Mineralisierung bzw. Ascheauskühlkammer,
4. Ascheentnahme (Flachbettöfen – Öffnen der Ofentür).

Dr. Jörg Bachmann,  
IFU GmbH, Niederlassung Umweltanalytik Saalfeld.  
Dipl.-Chem. Johannes Kiecherer, Dr. Jörg Sommerer,  
Prof. Dr. Matthias Olzmann,  
Institut für Physikalische Chemie, Karlsruher Institut  
für Technologie, Karlsruhe.

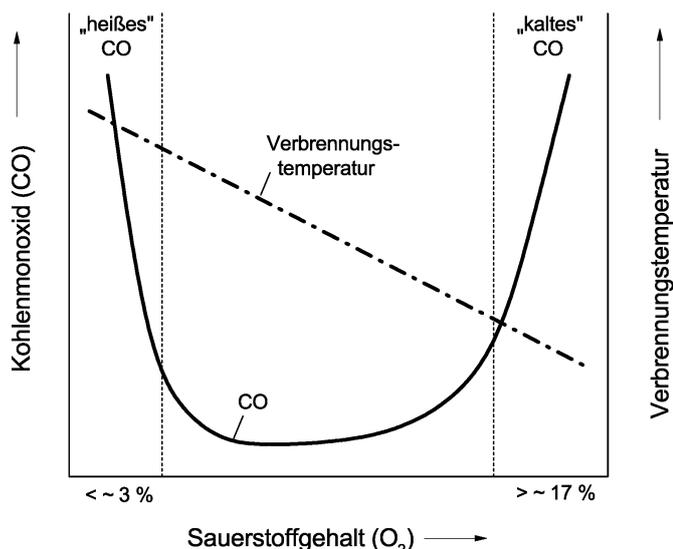


Bild 1. Qualitativer Zusammenhang zwischen CO-Konzentration im Rauchgas und Sauerstoffgehalt sowie Verbrennungstemperatur (nach [2]).

Die bei diesen Verfahrensschritten beobachteten CO-Spitzen lassen sich qualitativ mit einem von Schetter [2] vorgeschlagenen Zusammenhang erklären, der in Bild 1 dargestellt ist. Dabei wird die CO-Konzentration mit dem Sauerstoffgehalt im Abgas und der Verbrennungstemperatur korreliert. Ein geringer Sauerstoffgehalt führt unmittelbar zu hohen CO-Anteilen, da der für die Weiteroxidation benötigte Sauerstoff nicht zur Verfügung steht. Ein hoher Sauerstoffanteil ist hingegen nur mittelbar mit hohen CO-Konzentrationen verknüpft, weil er in der Regel mit erhöhter Luftzufuhr und damit niedrigerer Temperatur verbunden ist. Hier ist die Weiteroxidation temperaturbedingt gehemmt. Bei den o. g. Verfahrensschritten 1. und 4. strömt sehr viel Kaltluft in den Ofen, was zu einer Temperaturerniedrigung führt. Bei den Verfahrensschritten 2. und 3. hingegen kommt es zu einem Sauerstoffdefizit.

In umfangreichen Feldmessungen konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Variation der Temperatur in der Nachbrennkammer die CO-Emission stark beeinflusst werden kann. Tabelle 1 fasst Ergebnisse einer kontinuierlichen Überwachung an drei verschiedenen Kremationsöfen im Zeitraum von Januar bis April 2013 zusammen. Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Anzahl der Betriebszeitintervalle, in denen der CO-Grenzwert überschritten wurde, und dem relativen Anteil der Betriebszeiten, in denen die Temperatur der Nachbrennkammer unter 850 °C lag. Der Anteil der Betriebszeiten mit Überschreitungen ( $t_u/t$ , Tabelle 1, Spalte 4) nimmt von 9,9 % über 5,1 % auf 0,6 % ab, wenn der Anteil der Betriebsstunden mit  $T < 850$  °C ( $n_{R2}/(n_{R1} + n_{R2})$ , Spalte 7) von 34,8 % über 4,7 % auf 0,6 % sinkt. Der Grad der Korrelation wird jedoch auch von weiteren Faktoren, wie z. B. der Luftzuführung, beeinflusst.

Tabelle 1. Einfluss der Temperatur in der Nachbrennkammer auf die gemessene CO-Konzentration ( $t$ : Betriebszeit,  $t_u$ : Betriebszeit mit Überschreitung  $[CO] > 50$  mg/m<sup>3</sup> (gemittelt über 1 h und bezogen auf 11 Vol.-% O<sub>2</sub>),  $n_{R1}$  und  $n_{R2}$ : Anzahl der über jeweils 10 min gemittelten Werte im Regime R1 ( $T > 850$  °C) bzw. R2 ( $T < 850$  °C).

	$t$ in h	$t_u$ in h	$t_u/t$ in %	$n_{R1}$	$n_{R2}$	$n_{R2}/(n_{R1}+n_{R2})$ in %
Ofen 1	1 157	115	9,9	4 317	2 308	34,8
Ofen 2	741	38	5,1	4 008	197	4,7
Ofen 3	1 075	6	0,6	6 099	38	0,6

Daraus ergibt sich die Frage, ob sich CO-Grenzwertverletzungen durch eine strikte Einhaltung der auch vom Gesetz geforderten Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer weitgehend vermeiden lassen. Durch technische Maßnahmen (z. B. Modernisierung des Luft-Managementsystems) kann sichergestellt werden, dass die Forderung nach Einhaltung der Mindesttemperatur erfüllt wird [5]. So benötigen, nach Betreiberangaben, Anlagen mit modernem Energiemanagement unter Berücksichtigung der Aufheizphase weniger als 10 m<sup>3</sup> Brenngas pro Kremation im Einschichtbetrieb bei voller Einhaltung der Mindesttemperaturen. Im Zwei- und Dreischichtbetrieb liegen die Verbräuche nochmals niedriger und tendieren bei optimaler Prozessführung zu Tagesverbräuchen nahe Null. Dies lässt sich erreichen, wenn während der Kremation die Reaktionswärme aus den Oxidationsprozessen in der Nachbrennkammer optimal genutzt wird, um die Temperatur auf dem erforderlichen Wert zu halten. Eine Absenkung der Temperatur in der Nachbrennkammer ist somit, auch unter dem Gesichtspunkt der Brennstoffeinsparung, nicht notwendig und erschwert wesentlich, wie im Folgenden gezeigt wird, die Erfüllung der Forderung der 27. BImSchV bezüglich der Einhaltung des CO-Grenzwertes.

Im Rahmen dieser Arbeit soll durch detaillierte reaktionskinetische Modellrechnungen untersucht werden, wie sich unter den typischen Bedingungen der Nachbrennkammer die Temperatur auf die Oxidationsgeschwindigkeit von CO auswirkt und welche Schlussfolgerungen sich für die Temperaturführung ableiten lassen. Hier stellt sich insbesondere die Frage, wie stark prozessbedingte Temperatur- und Verweilzeitschwankungen die CO-Konzentration beeinflussen. Darüber hinaus soll geprüft werden, ob das oben erwähnte Schema zum Einfluss von Sauerstoffgehalt und Temperatur auf den CO-Gehalt im Abgas quantifiziert werden kann.

## 2 Modellbetrachtungen zum Kremationsprozess

Die Verbrennung nicht gasförmiger organischer Substrate ist ein komplizierter Prozess, bei dem Phasenübergänge, Transportvorgänge und chemische Kinetik eng miteinander verbunden sind. Generell kann davon ausgegangen werden, dass die Oxidation des Kohlenstoffanteils nicht direkt zu CO<sub>2</sub> führt, sondern zunächst hauptsächlich zur Bildung von CO [4]. Aus den Bruttoreaktionen mit den zugehörigen Standard-Reaktionsenthalpien (für  $T = 1\ 100$  K) [5],  $C_{fest} + 0,5 O_2 \rightarrow CO$  mit  $\Delta_R H = - 112,6$  kJ/mol,  $CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$  mit  $\Delta_R H = - 282,2$  kJ/mol und  $C_{fest} + CO_2 \rightarrow 2 CO$  mit  $\Delta_R H = 169,7$  kJ/mol, folgt, dass der überwiegende Teil der dabei entstehenden Reaktionswärme durch die CO-Oxidation freigesetzt wird. Um die Wärmebelastung des Ofenmaterials in der Hauptbrennkammer zu begrenzen, sollte die Oxidation des CO zu CO<sub>2</sub> weitgehend in der Nachbrennkammer stattfinden. Hierbei laufen überwiegend homogene

Tabelle 2. Zusammensetzung in mol-% (Corpus und Holz nach [10]).

	C	H	O	N	Mineralien
CH <sub>4</sub>	20	80	-	-	-
Corpus	9,5	63,0	25,5	1,4	0,6
Holz	49,1	6,3	44,0	0,1	0,5

Tabelle 3. Abgaszusammensetzung in mol-%.

Fall	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
A	0	3,5	7,7	16,3	72,5
B	0,01	3,5	7,7	16,3	72,5
C	0,1	3,4	7,7	16,3	72,5
D	1,0	2,5	7,7	16,7	72,1
E	3,5	0	7,7	18,0	70,8

Gasphasenreaktionen ab. Derartige Reaktionssysteme lassen sich mit fortgeschrittenen kinetischen Modellen in ihren wesentlichen Aspekten gut beschreiben (siehe z. B. [4; 6]).

### 3 Kinetische Modellierung der CO-Konzentration

Für die kinetische Modellierung der CO-Konzentration in der Nachbrennkammer wurde das Programmpaket HOMREA [7] verwendet. Die wissenschaftlichen Grundlagen solcher Berechnungen sind z. B. in [6] beschrieben. Als Reaktionsmechanismus wurde eine Kombination der H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/CO-Submechanismen aus [4] verwendet. Details und die entsprechenden kinetischen und thermodynamischen Daten hierzu sind in [8; 9] zu finden. Der resultierende Gesamtmechanismus umfasst 31 reversible Reaktionen unter Beteiligung von elf reaktiven chemischen Spezies (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H, O, OH, HO<sub>2</sub>, HCO) sowie N<sub>2</sub> als inerte Komponente.

Die Modellierung geht von folgenden vereinfachenden Annahmen aus: Die Endkonzentration von CO im Abgas, das in die Atmosphäre emittiert wird, wird im Wesentlichen durch die Prozesse in der Nachbrennkammer bestimmt. Die Nachbrennkammer wird in den Modellrechnungen als idealer Strömungsreaktor ohne Rückvermischung bei iso-

therm/isobarer Prozessführung angenähert. Die Zusammensetzung der in die Nachbrennkammer eintretenden Abgase kann aus den Stoffbilanzen abgeleitet werden. Die zugrunde gelegten Elementanteile [10] sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Geht man davon aus, dass in einem Kremationsprozess typischerweise 20 m<sup>3</sup> Erdgas (als reines CH<sub>4</sub> angenommen), 100 kg Corpus und 20 kg Holz in einem Überschuss an Luft umgesetzt werden, so folgen unter der Bedingung, dass 2 000 m<sup>3</sup> (i. N.) Abgas entstehen, die in **Tabelle 3** angegebenen Stoffmengenanteile. Als Grenzfälle ergeben sich CO-Anteile von 0 und 3,5 %, entsprechend vollständiger Oxidation des Kohlenstoffs zu CO<sub>2</sub> (Fall A) bzw. vollständiger Teiloxidation zu CO (Fall E). Zur Charakterisierung des dazwischenliegenden Bereichs wurden drei verschiedene CO-Konzentrationen willkürlich ausgewählt (Fälle B, C und D). In den Simulationsrechnungen wurden alle Konzentrationen als stationär angenommen.

Beispiele für die primären Ergebnisse (d. h. Konzentrations-Zeit-Kurven) unserer Simulationsrechnungen sind in **Bild 2** dargestellt. Gezeigt ist die Abnahme der CO-Konzentration, ausgehend von ihrem höchsten Anfangswert, 3,5 % (Fall E). Dieser Fall wurde ausgewählt, da hier die längste Reaktionszeit bis zum Erreichen eines vorgegebenen Werts benötigt wird. Der Einfluss der Temperatur ist klar zu erkennen. Reaktionsflussanalysen mit dem Programm OpenSMOKE [11] ergaben, dass der Schritt CO + OH → CO<sub>2</sub> + H der wichtigste CO-Oxidationsschritt ist. Für die maximal (Fall E) freigesetzte Reaktionswärme durch CO-Oxidation in der Nachbrennkammer ergibt sich mit den oben angegebenen Stoffmengen und den Reaktionsenthalpien aus Abschnitt 2 ein Wert von ca. 9 · 10<sup>5</sup> kJ pro Kremation. Legt man eine Verbrennungsdauer von 1 h zugrunde, folgt eine Wärmeleistung von ca. 250 kJ/s, die aus der Nachbrennkammer abzuführen ist.

**Bild 3** zeigt die Reaktionszeiten, die nötig sind, um bei einer gegebenen Temperatur und CO-Anfangskonzentration den Wert von 0,004 % entsprechend 50 mg/m<sup>3</sup> (i. N.) für die CO-Konzentration zu erreichen. Dabei wird von den in **Tabelle 3** angegebenen Stoffmengenanteilen ausgegangen. Herausgehoben ist eine Zeit von 2 s als typische mittlere Verweilzeit in der Nachbrennkammer. Es fällt auf, dass diese Reaktionszeiten nur wenig von der CO-Anfangskonzentration abhängen. Lediglich für die niedrigste der betrachteten Anfangskonzentrationen ergeben sich etwas

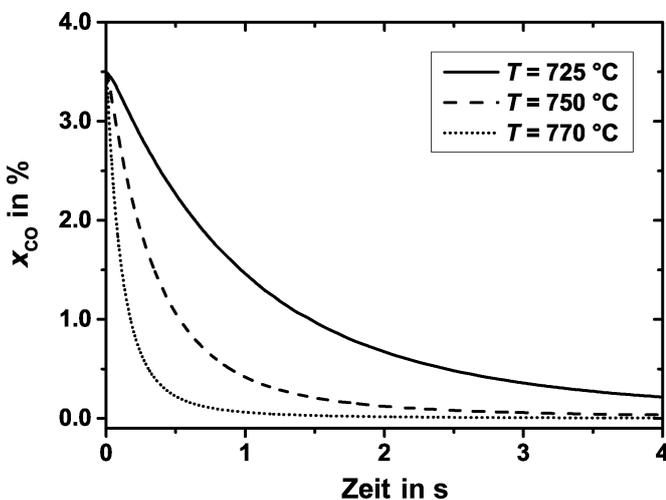


Bild 2. Abnahme des CO-Molenbruchs mit der Zeit bei verschiedenen Temperaturen für einen CO-Anfangsmolenbruch von 3,5 % (Fall E nach Tabelle 3).

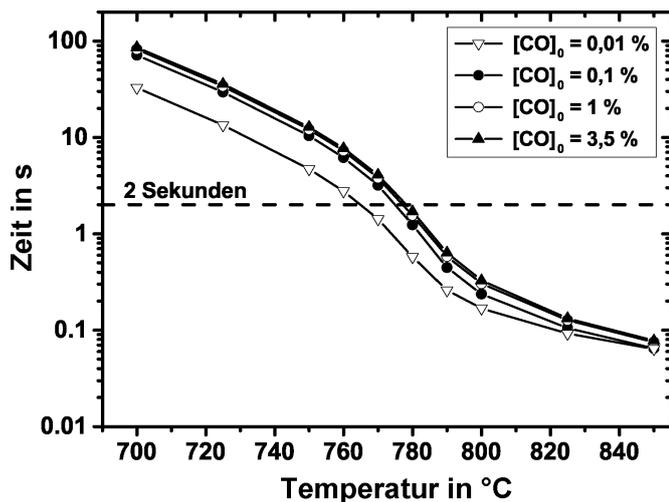


Bild 3. Zeit, nach der bei einer bestimmten Temperatur der CO-Stoffmengenanteil den Wert von 0,004 % (unkorrigiert bezüglich des O<sub>2</sub>-Gehalts) erreicht (Symbole: Simulationsergebnisse, Verbindungslinien zur besseren Visualisierung der Verläufe eingezeichnet).

kürzere Zeiten. Nimmt man eine mittlere Verweilzeit der Abgase in der Nachbrennkammer von 2 s an, so sind nach unseren Rechnungen Mindesttemperaturen von ca. 780 °C erforderlich, um innerhalb dieser Verweilzeit eine Absenkung des CO-Gehalts unter 0,004 % zu erreichen.

Unsere Simulationsrechnungen gestatten es auch, den in Bild 1 gezeigten Zusammenhang zwischen CO-Konzentration im Abgas und dem Sauerstoffgehalt sowie der Verbrennungstemperatur zu überprüfen und zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurden die CO-Konzentrationen nach einer Reaktionszeit von 2 s für variierende Sauerstoffanteile im Eingangsgas und Temperaturen in der Nachbrennkammer berechnet. Für den in [2] qualitativ angegebenen Zusammenhang zwischen Reaktionstemperatur und Sauerstoffgehalt wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen 1 040 und 640 °C für Sauerstoffanteile zwischen 0 und 20 % angenommen. Für die Anfangskonzentrationen wurde Fall E aus Tabelle 3 zugrunde gelegt (3,5 % CO). Die O<sub>2</sub>-Konzentration wurde zwischen 0 und 20 % variiert und die Gesamtstoffmenge über eine entsprechende Änderung der N<sub>2</sub>-Konzentration ausgeglichen. Die Resultate sind in Bild 4 dargestellt; die Übereinstimmung mit Bild 1 ist evident. Es zeigt sich ein drastischer Abfall der CO-Konzentration bei Sauerstoffanteilen zwischen 1,5 und 2 %. Ein Wiederanstieg in Bereiche oberhalb des Grenzwerts von 0,004 % erfolgt zwischen 13 und 14 % Sauerstoffanteil, entsprechend Temperaturen von 780 bzw. 760 °C.

#### 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mithilfe kinetischer Modellrechnungen wurden CO-Konzentrationen im Abgas unter Bedingungen, wie sie typischerweise in den Nachbrennkammern von Krematorien auftreten, berechnet. Ein dafür von Schetter [2] vorgeschlagener qualitativer Zusammenhang zwischen CO-Konzentration, O<sub>2</sub>-Gehalt und Temperatur konnte bestätigt und quantifiziert werden. Nach diesen Berechnungen ist für eine Absenkung des CO-Gehalts unter den vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Grenzwert bei einer angenommenen Verweilzeit von 2 s eine Mindesttemperatur von 780 °C erforderlich. Da die Verweilzeit der Abgase in der Nachbrennkammer dem Betreiber der Kremationsöfen in

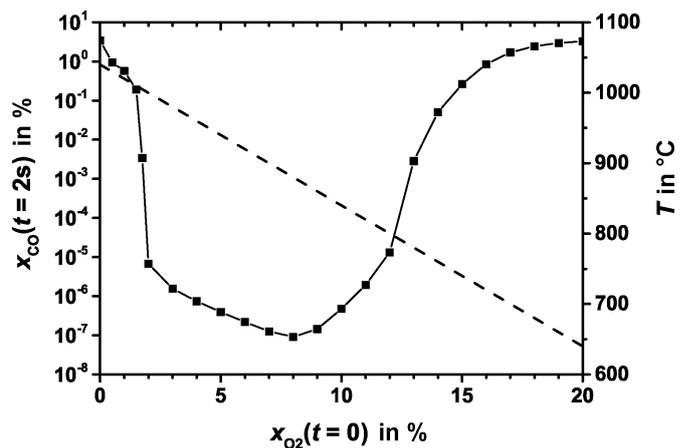


Bild 4. Stoffmengenanteile an CO im aus der Nachbrennkammer austretenden Gas (Symbole: Simulationsergebnisse, Verbindungslinien zur besseren Visualisierung der Verläufe eingezeichnet, gestrichelte Linie: Temperatur der Nachbrennkammer).

der Regel nicht genau bekannt ist und nach Auskunft von Ofenherstellern unter 2 s liegt, sollte im Normalbetrieb die Temperatur in der Nachbrennkammer den gesetzlich vorgeschriebenen Wert von 850 °C nicht unterschreiten. Es besteht ansonsten die Gefahr, dass die Reaktion von CO zu CO<sub>2</sub> nicht bis zu den erforderlichen Umsätzen abläuft und die Einhaltung des CO-Grenzwerts von 0,004 % (50 mg/m<sup>3</sup>) nicht in jeder Phase des Kremationsprozesses gewährleistet werden kann.

#### Literatur

- [1] Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung vom 19. März 1997. BGBl. I, S. 545, zul. geänd. durch Art. 10 der Verordnung vom 2. Mai 2013. BGBl. I, S. 973.
- [2] Schetter, G.: Primärmaßnahmen zur Schadstoffminimierung in Krematorien, Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 72 (2012) Nr. 6, S. 235-240.
- [3] DBU-Projekt Nr. 19512/02 der Fa. Umweltanalytik Saalfeld.
- [4] Glassman, I.; Yetter, R. A.: Combustion. 4th Ed. Amsterdam: Elsevier 2008.
- [5] Handbook of Chemistry and Physics. 75th Ed. Hrsg.: Lide, D. R. Boca Raton: CRC Press 1994.
- [6] Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R. W.: Verbrennung: physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. 3. Aufl. Berlin: Springer 2001.
- [7] Warnatz, J.: HOMREA – User Guide. [www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/reaflow/Descr.HOMREA.pdf](http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/reaflow/Descr.HOMREA.pdf)
- [8] Li, J.; Zhao, Z.; Kazakov, A.; Chaos, M.; Dryer, F. L.; Scire, J. J.: A comprehensive kinetic mechanism for CO, CH<sub>2</sub>O, and CH<sub>3</sub>OH combustion. Int. J. Chem. Kinet. 39 (2007) Nr. 3, S. 109-136.
- [9] Li, J.; Zhao, Z.; Kazakov, A.; Dryer, F. L.: An updated comprehensive kinetic model of hydrogen combustion. Int. J. Chem. Kinet. 36 (2004) Nr. 10, S. 566-575.
- [10] Römpp Chemie Lexikon. 9. Aufl. Hrsg.: Falbe, J.; Regitz, M. Stuttgart: Thieme 1989.
- [11] Cuoci, A.; Frassoldati, A.; Faravelli, T.; Ranzi, E.: A computational tool for the detailed kinetic modeling of laminar flames: Application to C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub> coflow flames. Combust. Flame 160 (2013) Nr. 5, S. 870-886.