



Das Krematorium in Schwäbisch Hall.

GEFÖRDERTES VORHABEN

Ein Krematorium energieeffizient betreiben (Teil 1)

Wie Krematorien Energie besser nutzen können, um die CO₂-Bilanz zu verbessern, hat **Dr.-Ing. Gebhard Schetter** untersucht. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat seine Forschung gefördert.

Im Rahmen umfangreicher, von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderter Vorhaben wurde die Verbesserung der Energieeffizienz in Krematorien durch primärseitige Einflussnahme sowie durch Maßnahmen zur Abwärmenutzung untersucht [1–3]. In letztgenanntem Projekt stand ferner die Bedeutung dieser Maßnahmen für die CO₂-Bilanz von Krematorien im Fokus, die ausführlich in [4] aufgezeigt und diskutiert wird.

Maßnahmen zur Reduzierung des Energieeinsatzes

Der prozessbedingte Energieeinsatz wird bestimmt durch die Ofenbeheizung, den Stromverbrauch für den Anlagenbetrieb (Luft- und Abgasgebläse, Rückkühlwerk, Kühlwasser-

pumpen, Stellantriebe, etc.) und die Prozesssteuerung.

Die meisten, in Deutschland in Betrieb befindlichen Krematorien sind gasbeheizt [5]. Von einigen Kremationslinien liegen Betreiberinformationen zum jährlichen Gasverbrauch und die dazugehörigen Kremationsleistungen vor (Bild 1). Dabei bestätigt sich die erwartete Abhängigkeit des kremationsspezifischen Gasverbrauchs von der jährlichen Kremationsleistung.

Unterstellt man eine jährliche Betriebszeit von 250 Arbeitstagen, so ergeben sich bei Kremationszahlen von weniger als 2.000 Kremationen pro Jahr im Mittel weniger als acht Kremationen pro Tag. Dies hat zur Folge, dass der Kremationsofen etwa in zwei Drittel der Tageszeit außer

Betrieb ist und trotz Gegenmaßnahmen, die gemäß VDI-Richtlinie 3891 in Abschnitt 6.1.3 [6] auf den Ofenaufbau (Wärmedämmung), Prozessführung bei niedrigem Luftüberschuss und auf die Reduzierung der Stillstandsverluste abzielen, abkühlt.

Zur Kompensation der Stillstandsverluste ist ein erhöhter Gaseinsatz erforderlich, der, wie Bild 1 zeigt, bei niedrigen jährlichen Kremationszahlen zu einem erheblichen kremationsspezifischen Energieeinsatz führt.

Über den Energieverbrauch elektrisch beheizter Ofensystemen sind nur wenige Informationen verfügbar. Die Auswertung monatlicher Aufzeichnungen einer Elektroofenlinie in der Schweiz ergab eine Bandbreite von 34 bis 164 kWh/Kremation, im Mittel 84 kWh/Kremation. Im Ge-

gensatz zu diesen vorliegenden Verbrauchswerten wurden für die Beheizung einer Kremationsofenanlage in Österreich mit etwa zehn bis 45 kWh/Kremation deutlich geringere spezifische Stromverbrauchswerte in Abhängigkeit der jährlichen Kremationsleistung (950 bis 2.800 Kremationen) genannt, wobei laut Hersteller die Starttemperatur in der Nachverbrennung bei 700°C lag [7].

In Krematorien, die mit mehreren Kremationslinien ausgestattet sind, stellt sich darüber hinaus die Frage, ob durch ein geändertes Betriebsmanagement der Energieeinsatz für das tägliche Aufheizen der Ofenlinien dahingehend reduziert werden kann, indem beispielsweise immer eine Kremationslinie über einen begrenzten Zeitraum (beispielsweise über drei bis sechs Monate) außer Betrieb genommen wird und die durchzuführenden Kremationen bei längerem Tagesbetrieb in der(n) restlichen Kremationslinie(n) erfolgen.

Dies hat zur Konsequenz, dass das Betriebspersonal gegebenenfalls im erweiterten Schichtbetrieb einzusetzen ist. Trotz dieser Auswirkungen auf das Personalmanagement haben Wirtschaftlichkeitsberechnungen gezeigt, dass nicht nur der kremations-spezifische Energieeinsatz für das tägliche Aufheizen des Ofens und damit der CO₂-Ausstoß reduziert werden kann, sondern dass sich zudem geringere Wartungs- und Instandhaltungskosten erzielen lassen. Zwingend ist hierbei, dass eine auf den Einzelfall bezogene Wirtschaftlichkeitsanalyse vorangestellt wird.

Wie vergangene Untersuchungen gezeigt haben [1, 2], kann der Primärenergieeinsatz durch Absenkung der Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer von 850 °C auf 750 °C signifikant gesenkt werden (Tabelle 1).

Die an diesen Krematorien durchgeführten Untersuchungen beinhalten auch begleitende Emissionsmessungen und Auswertung der kontinuierlichen CO-Datenerfassung über jeweils längere Zeiträume. Zusammenfassend ist dabei festzuhalten, dass

- der CO-Grenzwert von 50 mg/Nm³ bei Berücksichtigung des Standes der Technik gemäß Kap. 7 der VDI-Richtlinie 3891 (siehe [6]), gesichert eingehalten

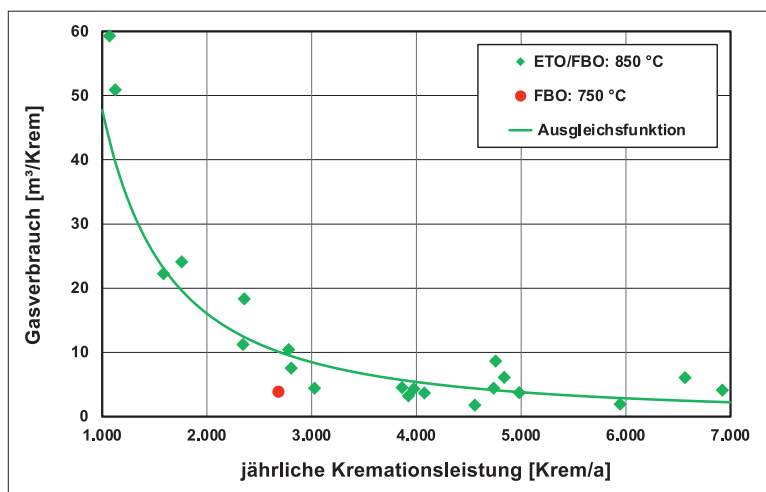


Bild 1: Gasverbrauch einiger Krematorien (ETO: Etagenofen; FBO: Flachbettöfen)

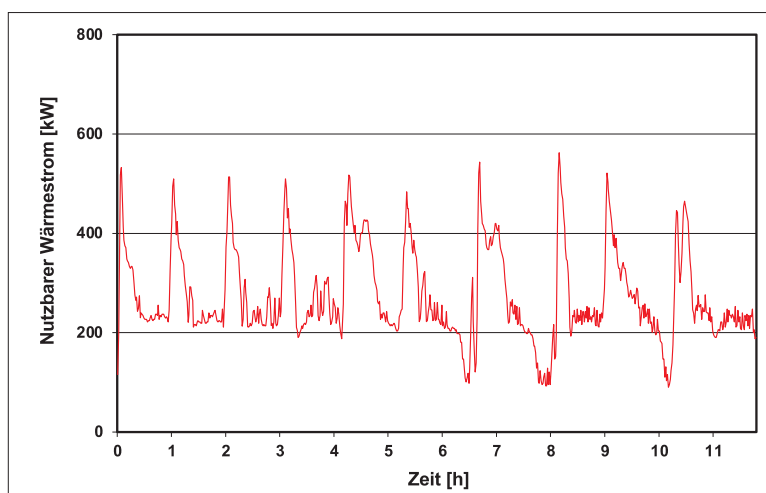


Bild 2: Nutzbarer Wärmestrom im Kühlwasserkreis, gemessen am 9.6.2020 (aus [9])

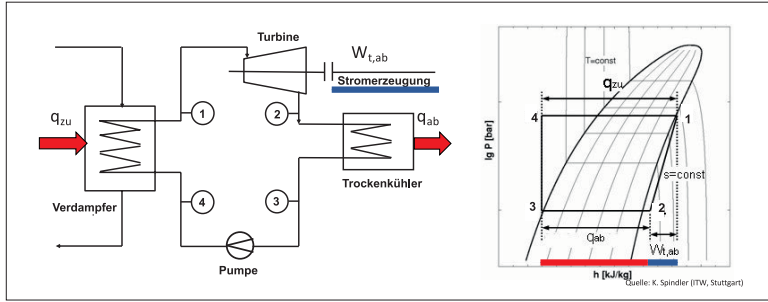
- sowie die Grenzwerte der 27. BImSchV [8], insbesondere Gesamt-C (20 mg/Nm³) sowie PCDD/PCDF (0,1 ngTE/Nm³), mit zum Teil deutlichem Sicherheitsabstand unterschritten wurden. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurde für die Linie 2 des Crema-

toriums Schwäbisch Hall eine langfristige Ausnahmegenehmigung zur Absenkung der Mindesttemperatur auf 750 °C erteilt, die zwischenzeitlich bis zum 31. Dezember 2023 verlängert wurde. Seit Ende 2020 wird diese Kremationslinie – schwerer Flachbettöfen (System Heinicke) ▶

Tabelle 1: Einfluss der Betriebsweise mit reduzierter Mindesttemperatur auf den Gasverbrauch [2]

Gasverbrauch inkl. Aufheizbetrieb	Krematorium Berlin-Baumschulenweg Linie 3	Krematorium München Linie 5	Krematorium Pforzheim
Betriebsweise	2 (3) - Schichtbetrieb ca. 16 Kremationen / Tag	1 (2) - Schichtbetrieb ca. 9 Kremationen / Tag	2 (3) - Schichtbetrieb 24 bis 32 Kremationen / Tag
850 °C (Referenz)	40,2 m ³ /Kremation	26,0 m ³ /Kremation	7,6 m ³ /Kremation
750 °C	28,8 m ³ /Kremation (-28,4 %)	22,6 m ³ /Kremation (-13,1 %)	1,7 m ³ /Kremation (-77,6 %)

Bild 3: Schematische Darstellung des ORC-Kreisprozesses



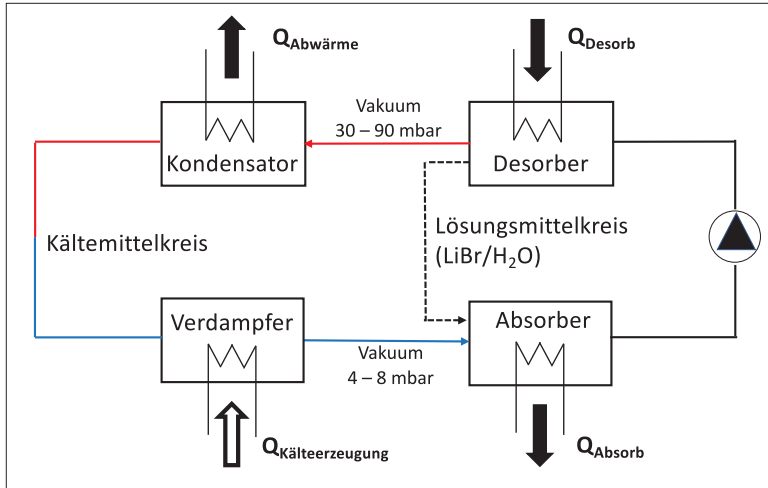
temperatur von 850 °C, ermittelt als 10-Minuten-Mittelwert, unterschritten ist. Von der in § 12 angegebenen Ausnahmeregelung machen generell Elektroofensysteme Gebrauch. Unter Berücksichtigung vorgenannter Ergebnisse und insbesondere der verbesserten CO₂-Situation sollte von dieser Forderung unter der Maßgabe abgerückt werden, dass die in der 27. BImSchV aufgeführten Emissionsgrenzwerte entsprechend dem Stand der Technik (siehe VDI-Richtlinie 3891, insbesondere Abschnitt 7) gesichert eingehalten werden. Dies gilt umso mehr bei zunehmender Gasverknappung und den damit verbundenen Preissteigerungen.

Möglichkeiten der Abwärmenutzung

In [9] wurde über die Messungen der nutzbaren Abwärme an Linie 2 des Krematoriums Schwäbisch Hall ausführlich berichtet. Der dort gemessene nutzbare Wärmestrom ergab sich im Mittel bei geregelterm Betrieb des Kühlwasserkreises und Einhaltung der Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer zu 289 kW. Es zeigten sich, prozessbedingt, signifikante zeitliche Schwankungen, die im Extremfall zwischen etwa einem Drittel und dem Zweifachen des Mittelwertes liegen können (Bild 2). Die an diesem Messtag erfasste Größenordnung der nutzbaren Abwärme hat sich an sämtlichen weiteren Messtagen bestätigt.

Bei den Messreihen mit reduzierter Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer von 750 °C lag der mittlere, täglich nutzbare Wärmestrom

Bild 5: Funktionsschema der Absorptionskältemaschine.



► mit nachgeschaltetem Kugelrotorumlauferverfahren zur Abgasreinigung [9] – unter diesen Bedingungen betrieben. Der an dieser Verfahrenslinie in 2021 festgestellte Gasverbrauch (Flüssiggas) ist, umgerechnet auf den Energiegehalt von Erdgas, ebenfalls in Bild 1 (FBO: 750 °C) dargestellt. Dabei ist festzuhalten, dass über das Jahr 2021 die CO-Überschreitungshäufigkeit bei weniger als 0,6 Prozent lag und damit ein deutlicher Sicherheitsabstand zum Stand der Technik (3 Prozent) gemäß VDI

3891 [6] gegeben ist. Zusammen mit dem Anlagenhersteller wurde Anfang 2022 die Prozesseinstellung weiter optimiert. Der erdgasäquivalente Verbrauch konnte dadurch auf knapp über 2 m³ pro Kremation gesenkt werden. Im ersten Quartal 2022 wurde bei dieser Prozesseinstellung und 818 durchgeführten Kremationen lediglich eine CO-Grenzwertüberschreitung festgestellt.

Gemäß § 3(2 und 3) der 27. BImSchV [8] darf ein Sarg nicht eingefahren werden, wenn die Mindest-

Bild 4: Aufstellung ORC-Anlage und techn. Daten (Angaben Typenschild).



Lieferant	ElektraTherm (USA)	
Modell	ET-50-4000	
Max. Heißwasserdurchfluss	m ³ /h	45
Betriebstemperaturbereich	°C	88-116
Generator	kW	65
Drehstrom	Hz	50
	V	400
	A	116
Kältemittel	R-245FA	
min. Kältemittelbefüllung	kg	182
Öl	100 ISO/500SUS	
	Alkylbenzene	
Ölbefüllung	kg	13,5

bei rund 246 kW und fiel demnach rund 15 Prozent geringer aus als unter Normalbetriebsbedingungen.

In der Regel wird die zur Verfügung stehende Abwärme über Rückkühlersysteme an die Umgebung abgeführt. Sofern derzeit eine Abwärmenutzung in Krematorien erfolgt, so ist diese, von Ausnahmen abgesehen, auf die Unterstützung der Gebäudeheizung und Brauchwassererwärmung beschränkt. Das Ziel des von der DBU geförderten Untersuchungsprogramms [3] bestand nun darin, Möglichkeiten der Abwärmenutzung für Krematorien aufzuzeigen und das damit verbundene CO₂-Minderungspotenzial zu quantifizieren.

Da neben der Ofenbeheizung in einem Krematorium auch Strom für den Anlagenbetrieb (Luft- und Abgasgebläse, Rückkühlwerk, Kühlwasserpumpen, Stellantriebe, Prozesssteuerung etc.) sowie für die Sarg-

kühlung (Kompressionskältemaschinen) benötigt wird, ist es naheliegend, den ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) zu betrachten. Dabei handelt es sich um einen separaten Kreisprozess, dem die Abwärme aus der Kremation zugeführt wird. Das im Verdampfer erhitzte Arbeitsmittel (zum Beispiel R-245 FA), deren niedrigere Siedetemperaturen sich daher besonders für Einsatzbereiche von unter 350 °C eignen, wird in einer Turbine entspannt und nachfolgend auf die Ausgangstemperatur abgekühlt (Bild 3). Wählt man für die Darstellung des Kreisprozesses das log p-h-Diagramm, so lassen sich die mögliche Stromerzeugung und somit der Wirkungsgrad direkt ablesen.

Im Krematorium Diemelstadt wurde durch die Firma IFZW GmbH eine Pilotanlage errichtet (System Bitzer – ElektraTherm), die seit Ende 2018 in Betrieb ist. Sie ist direkt in den Wasser-/Glykol-Kreis der dortigen

Kremationslinie 3 (großer Ofen für Särge größer 130 kg) eingebunden und im Außenbereich des Krematoriums aufgestellt (Bild 4).

Anstelle der bei großen Leistungen und geringen Lastschwankungen üblichen Turbinen erfolgt die Entspannung des Kältemittels (Arbeitsmittel) in einem Schraubenexpander. Zur Vermeidung von Arbeitsmittelleckagen am Übergang vom Expander zur Welle kam in der Anlage im Krematorium Diemelstadt erstmals ein von der Firma Bitzer neu entwickelter, halbhermetischer Schraubenexpander zum Einsatz. Weitere Informationen sind dem DBU Schlussbericht zu entnehmen [3].

Entscheidend für die Stromerzeugung ist die Temperaturdifferenz zwischen Arbeitsmitteltemperatur im Kühler des ORC-Kreislaufs und der Außentemperatur am Rückkühler. Die über den Rückkühler sicherzustellende Kondensatkühlung ▶

Anzeige

MODERNE FRIEDHOFSKULTUR

Friedhofskultur – das einzige Fachmagazin für das gesamte Friedhofswesen

E-Paper-Abo mit
12 Ausgaben
für nur 129,99 € digital lesen



GRABGESTALTUNG & -PFLEGE • FRIEDHOFSPLANUNG & -GESTALTUNG
FRIEDHOFS- & BESTATTUNGSKULTUR • WIRTSCHAFT • VERWALTUNG • RECHTSFRAGEN

+49 531 38004-39 leserservice@haymarket.de shop.taspo.de www.friedhofskultur.de

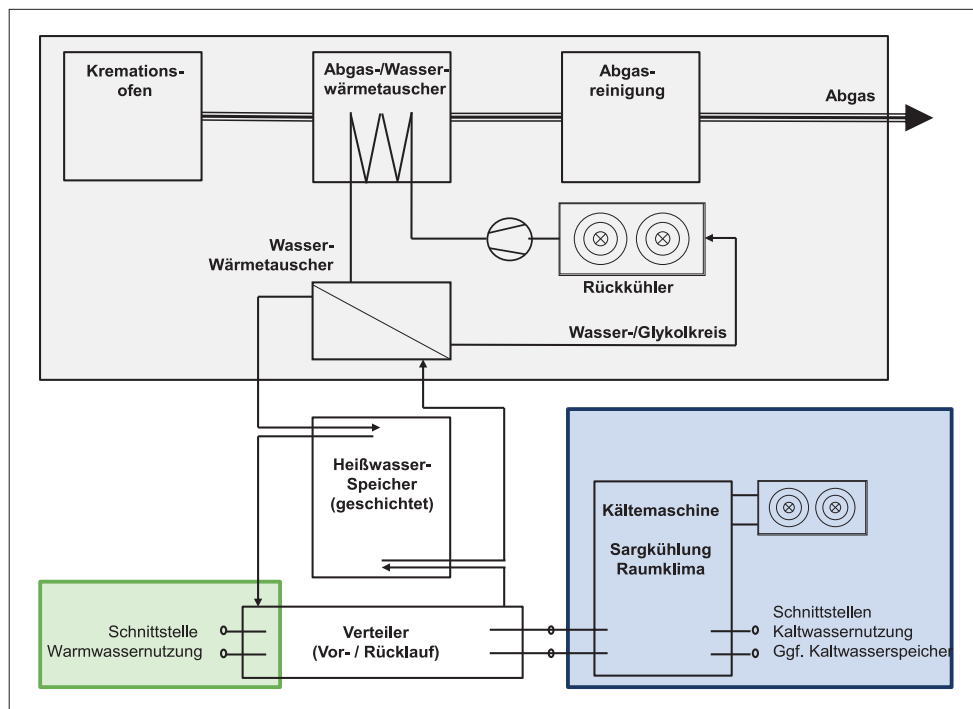


Bild 6: Einbindung der Kälteerzeugung zur Abwärmenutzung in einem Krematorium.

► benötigt bei Umgebungstemperaturen von etwa 35 °C (Sommer) für den Antrieb der luftgekühlten Rotoren einen hohen Eigenstrombedarf, so dass die sich einstellende effektive Stromerzeugung sogar auf „Null“ sinken kann. Nach bisherigen Erfahrungen liegt nach Abzug der Eigenverbraucher der elektrische Wirkungsgrad bei etwa fünf Prozent und gewährleistet somit, über das Jahr gesehen, eine respektable Stromerzeugung. Der Einsatz der ORC-Technik ist also insbesondere dann angezeigt, wenn die Abwärme mehrerer Kremationslinien zur Stromerzeugung genutzt wird und eine hohe Auslastung (Zwei-Schichtbetrieb) gegeben ist.

Zur Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen für den Einsatz in Krematorien lassen sich derzeit nur begrenzte Aussagen ableiten. So ist zu erwarten, dass nach Auswertung der ersten Erfahrungen beim Einsatz in Krematorien technologische Entwicklungen zur Prozessoptimierung auf die Preisfindung Einfluss nehmen. Entscheidend wird ferner sein, wie sich der Strompreis in der Zukunft entwickeln wird. Auch politische Rahmenbedingungen, wie CO₂-Abgaben, können die Anwendung der ORC-Technik in Krematorien beeinflussen.

In Krematorien wird neben Strom und Wärme auch Kälte benötigt. Für die Kälteerzeugung kommen Ab-

sorptions- wie Adsorptionskältemaschinen infrage. Nachfolgend wird ein kurzer Abriss zur Anwendung der Absorptionskältetechnik gegeben; eine ausführliche Darstellung und Bewertung auch der Adsorptionskälte findet sich in [3].

Absorptionskältemaschinen arbeiten ebenfalls als Kreisprozess, in dem Kältemittel (Wasser) zur Wärmeaufnahme eines zu kühlenden Mediums eingesetzt wird. Die Wärmeaufnahme (Kühlleistung) erfolgt analog zu Kompressionskältemaschinen in einem Verdampfer (Wärmetauscher). Anstelle des mechanischen Verdichters von Kompressionskältemaschinen wird bei Absorptionskältemaschinen ein „thermischer“ Verdichter, bestehend aus je einem Ab- und Desorber eingesetzt. Hierzu bedarf es eines Lösungsmittels, das den im Verdampfer entstehenden Kältemitteldampf im Absorber absorbiert und als kältemittelreiche Lösung dem Desorber zugeführt wird (Bild 5).

In Abhängigkeit der zu erzeugenden Kältetemperatur werden bei Absorptionskältemaschinen entweder Wasser oder Ammoniak (NH₃) als Kältemittel und Lithiumbromid (LiBr) oder Wasser als Sorptionsmittel eingesetzt (Tabelle 2). Als kostengünstig erweisen sich Absorptionskälteanlagen mit der Kombination LiBr/H₂O, die allerdings wegen des verwendeten Wassers als Kältemittel (Gefrierisiko) auf Kältetemperaturen von größer 0°C (ca. 3,5 °C) begrenzt sind. Vorteilhaft bei den LiBr/H₂O-Absorptionsanlagen sind die guten Austreibeigenschaften von LiBr im Desorber, da das Kältemittel Wasser sich in dem Prozess unter Vakuum sehr gut von der Trägerlösung trennen (ausdampfen) und der Lösung wieder zuführen lässt.

In H₂O/NH₃-Absorberanlagen lassen sich Kühltemperaturen bis etwa minus 20 °C erzielen. Im Gegensatz zu LiBr/H₂O-Absorberanlagen arbeiten thermische H₂O/NH₃-Absorbermaschinen bei Überdruck bis etwa 35 bar. Dadurch unterliegen NH₃-Absorptionsmaschinen der Druckgeräte-Richtlinie und weiteren Sicherheitsbestimmungen. Vor diesem Hintergrund sind H₂O/NH₃-Anlagen etwa um den Faktor drei bis vier teurer als LiBr/

Danksagung

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Besonderer Dank gebührt hierbei Franz-Peter Heidenreich, der dieses Projekt seitens der DBU betreute. Gedankt sei auch Jochen Lutz, der sein Krematorium in Schwäbisch-Hall zur Verfügung gestellt und das Vorhaben mit vielen wertvollen Tipps unterstützt hat. Des Weiteren möchte ich mich bei Heiko Friederichs (Firma H.R. Heinicke GmbH), bedanken, der sich insbesondere als wichtiger Diskussionspartner in dieses Projekt eingebracht hat. Dank gebührt Dieter Zahn, Firma IFZW GmbH, der den Zugang zu seiner Pilotanlage im Krematorium Diemelstadt ermöglicht hat.

H₂O-Absorptionskältemaschinen. Andererseits zeigen wärmetechnische Auslegungen, dass die mit LiBr/H₂O-Absorptionskältemaschinen erzielbaren Kaltwasseraustrittstemperaturen nicht ausreichen, die Sargkühlung autark sicherzustellen. Um dies zu erreichen, benötigt man zusätzlich eine elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschine. Das Kaltwasser des Absorbers kann aber zur Vorkühlung eingesetzt werden. Da bei Nachrüstungen in Bestandsanlagen meist ohnehin eine Kompressionskältemaschine vorhanden ist, bietet sich die Absorptionskälte ergänzend zur Reduzierung des Strombezugs an.

Eine mögliche Form der Einbindung in Krematorien kann entsprechend Bild 6 erfolgen. Dabei empfiehlt es sich, die Abwärme zunächst in einem Heißwasserspeicher zu speichern, an den die Verbraucher – Warmwassernutzung und Kälteerzeugung – angeschlossen werden.

Handlungsempfehlung zur Energieeffizienz-Steigerung

Die Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz in Krematorien lassen sich untergliedern in mehrere Maßnahmen:

Primärmaßnahmen: Der Kremationsprozess sollte entsprechend Abschnitt 6.1.3 der VDI Richtlinie 3891 [6] betrieben werden. Darüber hinaus sollten auch die Möglichkeiten zur Reduzierung der Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer ausgeschöpft werden, wie sie bei Elektroofensystem seit vielen Jahren akzeptiert werden. Es wäre daher konsequent, wenn der Gesetzgeber bei einer Novellierung der 27. BImSchV generell auf die Einhaltung jedweder Mindesttemperaturforderung verzichten würde. Eine Anpassung der Prozesssteuerung auf die veränderte Temperatureinstellung ist dabei zwingend. Es wird empfohlen, diese unter Einbeziehung des Anlagelieferanten vorzunehmen.

Sekundärmaßnahmen: Als nachgeordnete Maßnahmen kommen sämtliche Möglichkeiten der Abwärmenutzung infrage. Hierbei ist anzumerken, dass mit den Maßnahmen zur Abwärmenutzung stets ein technischer und finanzieller Mehrauf-

Tabelle 2: Flüssige Sorptions- und Kältemittel-Paare (entnommen aus [10])

Verfahrensweise	1-stufig	2-stufig	1-stufig
Sorptionsmittel	Lithiumbromid	Lithiumbromid	Wasser
Kältemittel	Wasser	Wasser	Ammoniak
Abwärmtemperatur	75°C - 110°C	130°C - 160°C	80°C - 120°C
Kältetemperatur	> 0°C	> 0°C	bis - 60 °C
Wärmeverhältnis	0,55 - 0,8	0,9 - 1,3	0,3 - 0,7



Foto: Alexander Huber

Vorbereitung zur Abschiednahme am Sarg vor der Ofeneinfahrt (Krematorium Schwäbisch Hall).

wand verbunden ist und deren Umsetzung bei Bestandsanlagen aufgrund der räumlichen Gegebenheiten oft nicht oder nur mit großem Aufwand möglich sind. 🌱

Dr.-Ing. Gebhard Schetter, Schetter GmbH & Co. KG, Kirchheim u. Teck

Quellenverzeichnis

- [1] Schetter, G.: Untersuchung der Möglichkeiten und Auswirkungen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer der Einäscherung in Krematorien, DBU Schlussbericht (AZ 26847), 2010.
- [2] Schetter, G.: Langzeituntersuchungen zu Emissions- und Schadstoffminderungen in Krematorien durch veränderte energieeffiziente Betriebsweisen, DBU Schlussbericht (AZ 31407/01), 2016.
- [3] Schetter, G.: Steigerung der Energieeffizienz von Krematorien durch Einsatz der ORC-Technik oder Verfahren zur Kälteerzeugung, DBU Schlussbericht (AZ 35389/01), 2022.
- [4] Schetter, G.: Krematorium – Teil 2: Umsetzung von Klimaschutzziele, Friedhofskultur, Nr. 7, Juli 2022.
- [5] Schetter, G., Bittig, M.: Umweltrelevanz und Stand der Technik bei Einäscherungsanlagen, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Schlussbericht, Forschungskennzahl FKZ 3716 53 302 1, 2020.
- [6] VDI-Richtlinie 3891: Emissionsminderung – Anlagen zur Humankremation, März 2013.
- [7] Schütz, F.: Ofensteuerung an einem Elektroofen, in „Krematorium – Emission und Energie“, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-45-4, 2014.
- [8] 27. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV): Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung, 19.03.1997, Beck-Texte, 9. Auflage, Nov. 2007.
- [9] Schetter, G.: Zwischenbericht über ein DBU-Forschungsvorhaben zur Nutzung der Abwärme aus dem Kremationsprozess durch Einsatz der ORC-Technik oder anderen Verfahren zur Kälteerzeugung, in „Krematorium – Stand der Technik und Entwicklungstendenzen“, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-66-9, 2021.
- [10] Biedermann, F., Kolb, M.: Nutzung von Wärmetechnologien – Ratgeber Wärme in Hessen (insbesondere Abschnitt 3.4), Endbericht der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, A-Nr. IHK-HE-01, November 2014.