

Abschätzung der Zerstörungs- und Beseitigungseffizienz von PFAS in einer Verbrennungsanlage für gefährliche Abfälle

Florian Grote, Andres Van Brecht, Stefan Kühnbach und Boris Ufer

1.	Untersuchungen in Antwerpen.....	82
1.1.	Versuchsablauf	82
1.2.	Probenahme und Analyse.....	85
1.3.	Ergebnisse.....	85
2.	Untersuchungen in Hamburg.....	86
3.	Zusammenfassung.....	88
4.	Quellen.....	88

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind eine Gruppe von persistenten, toxischen Chemikalien, von denen viele aufgrund ihrer amphiphilen Eigenschaften, niedrigen Oberflächenenergie sowie hohen thermischen und chemischen Stabilität seit den 1950er Jahren in zahlreichen Industrie- und Konsumgütern eingesetzt werden. Zu den Anwendungen zählen unter anderem Galvanikanwendungen, Feuerlöschschäume, Reinigungsmittel und wasser- sowie schmutzabweisende Beschichtungen für Textilien. Aufgrund der breiten Definition von PFAS durch die OECD [11] zählen aber unter anderem auch Antibiotika, Pestizide und verschiedene Kühlmittel, wie sie in Wärmepumpen eingesetzt werden, zu der Gruppe der PFAS. Durch diese breite Anwendung und ihre Persistenz sind PFAS heute in allen Umweltkompartimenten nachweisbar.

Die Entsorgung PFAS-haltiger Abfälle ist eine große Herausforderung. Die zur Zeit einzige Behandlungsmethode, die eine Zerstörungs- und Beseitigungseffizienz (Destruction and Removal Efficiency, DRE) von über 99,9999 % (entsprechend des Baseler Übereinkommens [7]) erwarten lässt, ist die thermische Zerstörung in dafür vorgesehenen Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAV). Es gibt eine steigende Zahl Untersuchungen zur Zerstörung von PFAS, die dies im Labor- und Technikums Maßstab betrachten [2, 14, 13] allerdings nur wenige Daten zur tatsächlichen Zerstörung von PFAS in industriellen Verbrennungsanlagen Anlagen [4, 14, 11].

Die Europäische Kommission hat bislang keinen analytischen Standard zur Messung von PFAS in Umwelt- oder Produktproben etabliert. Von den über 7.500 bekannten PFAS können derzeit nur etwa 75 mit den verfügbaren Methoden quantifiziert werden. Die gängigste Methode umfasst eine umfangreiche Probenvorbereitung durch u.a. die Extraktion mit Methanol, Anreicherung über Festphasenextraktion und Aufreinigung der Extrakte über Aktivkohle. Die Analyse selbst findet dann mittels Flüssigchromatographie

in Kombination mit Massenspektrometrie (LC-MS/MS) statt. Des Weiteren sind für die Probenahme gasförmiger Proben aufwändige Probenahme Systeme notwendig. Diese entsprechen, oder orientieren sich an den Methoden OTM-45 und OTM-50 der US EPA. Ein zentrales Problem der gesamten Kette, ist die Kreuzkontamination mit PFAS als Verunreinigung, aufgrund ihres massiven Einsatzes und ihre ubiquitären Verteilung in der Umwelt und in den eingesetzten Materialien [5, 11, 1].

Neben den notwendigen, aber bisher nicht etablierten analytischen Standards mangelt es derzeit auch an Leitlinien zu den bestehenden verschiedenen nationalen und internationalen Vorschriften. Das Stockholmer Übereinkommen listet drei PFAS-Stoffe (PFOS, PFOA und PFHxS sowie deren Salze) als persistente organische Schadstoffe (POP) auf, deren Herstellung und Verwendung eingeschränkt oder eingestellt werden muss. Die POP-Richtlinien beziehen sich auf eine Zerstörungs- und Beseitigungsseffizienz (DRE) von 99,9999 % für die Verbrennung. Dies ist aber ein eher technischer Maßstab und keine gesetzliche Verpflichtung. Darüber hinaus ist der wissenschaftliche Ansatz der vollständigen Mineralisierung heute technisch und wirtschaftlich nicht in dem Umfang realisierbar, in dem er angesichts der enormen Mengen an zum Teil auch hochkonzentrierten PFAS-Abfällen erforderlich wäre. So wurden allein in Belgien im Jahr 2024 in der gesamten Industrie etwa 8.330 Tonnen PFAS in Produkten verwendet, darunter z.B. medizinische Geräte, Textilien, Polster, Leder, Bekleidung, Teppiche, Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Kälteanlagen [12].

Da es sich bei PFAS um eine große Gruppe von mehr als 7.500 Substanzen handelt und sich die wissenschaftlich fundierten Messmethoden für diese Verbindungen, schnell weiterentwickeln, bedeutet dies, dass beispielsweise die analytisch bestimmbare Summe der PFAS kontinuierlich steigt. Die Risiken steigen jedoch nicht, wenn mehr Verbindungen messbar werden. Daher ist eine klare Definition des Parameters *PFAS* erforderlich (z.B. Summe der 3 POP-PFAS, 4 EFSA-PFAS usw.). Zweitens besteht Bedarf an Vergleichbarkeit der PFAS-Luftemissionsmessungen, da heute viele Varianten der Probenahme Systeme (z.B. OTM45, OTM50 oder das flämische auf OTM45-basierte LUC/VI/003 [8]) eingesetzt werden.

Schließlich gibt es Initiativen, PFAS in verschiedene Richtlinien aufzunehmen, um risikobasierte Umweltqualitätsnormen festzulegen. Derzeit ist PFOS die einzige PFAS-Verbindung, die als prioritäre gefährliche Substanz (gemäß der Abfallrahmenrichtlinie) eingestuft ist und für die auf europäischer Ebene eine risikobasierte Umweltqualitätsnormen festgelegt wurde. Für PFOS besteht daher die Verpflichtung, die Einleitung zu stoppen oder schrittweise einzustellen.

Da weder die Gesetzgebung noch wissenschaftliche Erkenntnisse über die Auswirkungen mit dieser rasanten Entwicklung Schritt halten können, besteht auf EU-Ebene Bedarf an Leitlinien zu den drei genannten Ebenen: Parameterdefinition, Messtechnik und Normung, um gleiche Wettbewerbsbedingungen innerhalb der EU-Mitgliedstaaten zu schaffen.

Die Hochtemperaturverbrennung in Sonderabfall-Verbrennungsanlagen ist derzeit die einzige kommerziell rentable Methode zur großtechnischen Vernichtung hochkonzentrierter PFAS-Abfälle. Sie wandelt die Toxizität der PFAS im Abfall irreversibel um,

sodass ungiftige Rückstände entstehen. Um den Einfluss, der für die PFAS haltigen Abfälle vorgesehenen Verbrennungsanlagen auf ihre unmittelbare Umgebung sowie die Umwelt im allgemeinen, bewerten zu können, muss der Input in die betrachtete Anlage in Relation zu einem möglichen Output gesetzt werden. Dafür ist ein Bilanz des gesamten Systems notwendig, die aber auch von den zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen, durch z.B. Kontaminationen und Hintergrundbelastungen, begleitet wird. Um sich dieser notwendigen Bewertung der Anlagen zu nähern, führt die Indaver, neben der regelmäßigen Überwachung von möglichen Emissionen auch Versuche an verschiedenen Anlagen durch, um Bilanzen zu erstellen, Zerstörungseffizienz zu bestimmen und Bilanzräume zu schließen.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen fanden in den Sonderabfall-Verbrennungsanlagen der Indaver an den Standorten in Antwerpen und Hamburg statt. Beide Anlagen verfügen über jeweils zwei Drehrohröfen für die thermische Behandlung von Sonderabfällen. Diese sind so konzipiert, dass sie feste, pastöse und flüssige Sonderabfälle, einschließlich PFAS-haltiger Abfälle, aufnehmen können. Feste Abfälle und Fässer werden über eine Schleuse zugeführt, während flüssige Abfälle über Lanzen direkt in den Ofen eingebracht werden. Brennbare organische Flüssigkeiten und Abwässer können auch in die Nachbrennkammer (Post Combustion Chamber, PCC) eingedüst werden. Jeder dieser Öfen hat eine Durchsatzkapazität von etwa 8 Tonnen pro Stunde.

Die bei der Verbrennung entstehenden heißen Abgase werden in einem Dampfkessel abgekühlt und der so erzeugte Dampf wird für industrielle und häusliche Anwendungen sowie zur Stromerzeugung verwendet. Die Abgase durchlaufen anschließend eine mehrstufige Reinigung bestehend aus einer Entstaubung mittels Elektrofilter, gefolgt von einer mehrstufigen nassen Rauchgaswäsche zur Entfernung von unter anderem HCl, Cl_2 , HF, SO_2 , Quecksilber und Schwermetallen.

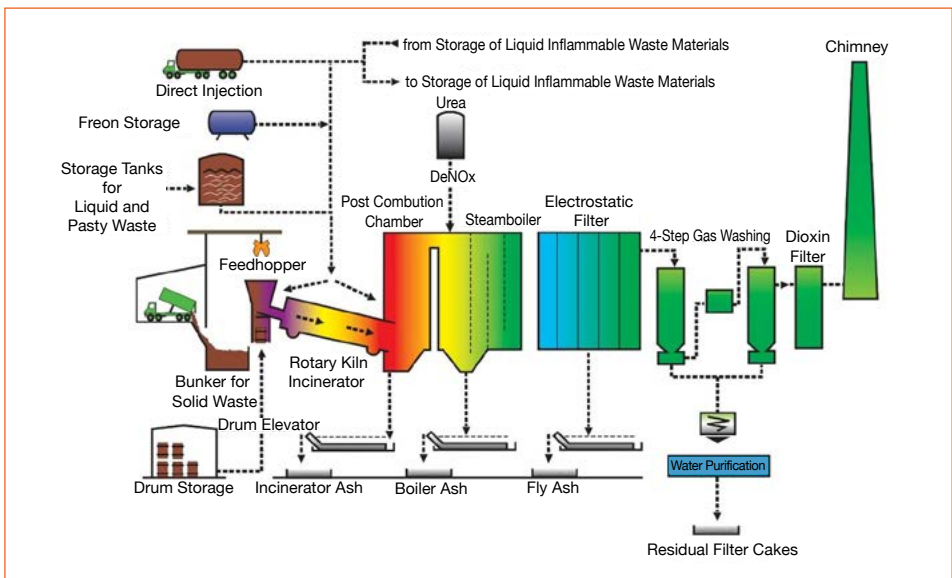


Bild 1: Prozessschema der Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Antwerpen

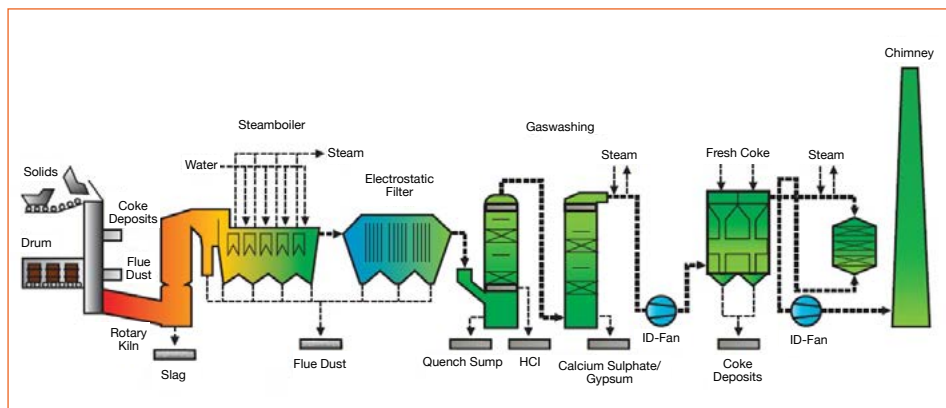


Bild 2: Prozessschema der Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Hamburg

Im letzten Schritt werden die Gase durch einen Kohlefilter geleitet, bevor sie über den Kamin abgegeben werden. Die beiden Anlagen unterscheiden sich in der Rauchgasreinigung in ein paar Details, die aber im Rahmen dieser Darstellung vernachlässigbar sind (Bilder 1 und 2). Die festen Rückstände (Bodenasche, Kessel- und Filterasche sowie anfallender Gips und Filterkuchen) werden auf dezidierten Deponien für gefährliche Abfälle entsorgt.

1. Untersuchungen in Antwerpen

Das zentrale Ziel der Versuche in Antwerpen war es, die Zerstörungs- und Beseitigungseffizienz (DRE) für PFAS in einer industriellen Verbrennungsanlage für gefährliche Abfälle unter realen Betriebsbedingungen zu bestimmen. Bewertet wurden dazu die PFAS, die durch die Stockholm Konvention in der Gruppe der persistenten organischen Verunreinigungen POP genannt sind. Als PFAS Quelle diente dazu ein kontaminierter Boden aus einem Sanierungsprojekt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Detail in [4] veröffentlicht worden.

1.1. Versuchsablauf

Das Experiment gliederte sich in drei aufeinanderfolgende Phasen:

Baseline-Phase: Die Anlage wurde mit einer Standardmischung aus festen, pastösen und flüssigen Abfällen betrieben. Hier lag der PFAS-Gehalt unter 40 mg/kg. Nach mindestens drei Stunden stabilen Betriebs, wurden über einen Zeitraum von drei Stunden Abgasproben entnommen, um die Basisemissionen an PFAS zu bestimmen.

Spiking-Phase: Im nächsten Schritt wurde die Anlage zusätzlich mit PFAS-kontaminiertem Boden (3,7 t/h, durchschnittlich 107 mg/kg PFAS) beschickt. Nach einer erneuten Stabilisierungsphase von mindestens drei Stunden wurden wiederum drei Stunden lang Abgasproben genommen, um die Emissionen unter erhöhter PFAS-Belastung zu erfassen.

TOGETHER WE MEET YOUR CLIMATE



Als Branchenführer wollen Sie die Umwelt so wenig wie möglich belasten. Ein zuverlässiger Partner für Ihr Abfallmanagement kann dazu beitragen. Dank unseres Fokus auf die Kreislaufwirtschaft und der Rückgewinnung von Wertstoffen (Lösungsmittel, Edelmetalle, Salzsäure, etc.) und Energie aus Ihren Abfällen, helfen wir Ihnen Ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Sicher und zirkulär.

**INDAVER TRÄGT ZU IHREN KLIMAZIELEN BEI
IN NACHHALTIGER PARTNERSCHAFT
DANK 35 JAHREN KNOW-HOW UND INNOVATION.**



IHR PARTNER FÜR DIE
KREISLAUFWIRTSCHAFT

Noch keinen Partner? Kontaktieren Sie uns:
iws-services@indaver.com | +49 40 73351-141 | www.indaver.com

Energie aus Abfall



Herausgeber: Thomé-Kozmiensky (et. al)

Energie aus Abfall:

2006: Band 1	20,00 EUR
2007: Band 2	20,00 EUR
2007: Band 3	20,00 EUR
2008: Band 4	20,00 EUR
2008: Band 5	20,00 EUR
2009: Band 6	20,00 EUR
2010: Band 7	20,00 EUR
2011: Band 8	20,00 EUR
2012: Band 9	20,00 EUR
2013: Band 10	23,00 EUR

2014: Band 11	20,00 EUR
2015: Band 12	20,00 EUR
2016: Band 13	35,00 EUR
2017: Band 14	50,00 EUR
2018: Band 15	50,00 EUR
2019: Band 16	50,00 EUR
2020: Band 17	50,00 EUR
2021: Band 18*	20,00 EUR
2022: Band 19	65,00 EUR
2023: Band 20	65,00 EUR

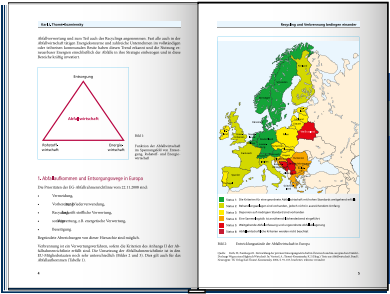
*Nur E-Book

Erhältlich als Hardcover und E-Books.

Paketpreis

450,00 EUR
statt 628,00 EUR

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter books.vivis.de



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51
16816 Nietwerder-Neuruppin
Tel. +49 3391 4545 0
E-Mail: order@vivis.de

TK Verlag

Rückkehr zur Baseline: Nach Beendigung der Spiking-Phase wurde die Anlage wieder mit der vorherigen Abfallmischung gefahren und es wurden, wieder nach 3 Stunden-stabilen Betriebs, erneut drei Stunden lang Abgasproben genommen.

Diese 3 Phasen des Versuchs wurden nach 24 Stunden wiederholt. Die Temperatur in der Nachbrennkammer wurde dabei auf 1.035 °C ($\pm$ 4 K) gehalten.

1.2. Probenahme und Analyse

Vor der Anlieferung des kontaminierten Bodens wurde, wie für jeden anderen Abfall auch, im Rahmen eines Vorakzeptanzverfahrens geprüft, ob die thermische Behandlung technisch und rechtlich geeignet ist. Für jede der vier Lieferungen à 25 Tonnen wurden jeweils drei Einzelproben von je 0,5 kg mit einem Bohrstock entnommen und zu einer Mischprobe vereinigt. Die PFAS-Gehalte wurden sowohl am Sanierungsstandort als auch bei Anlieferung in der Anlage bestimmt.

Die Abgasproben wurden nach dem Standard LUC/VI/003 isokinetisch aus dem Kamin entnommen [8]. Das Gas wurde durch einen beheizten Quarzfilter zur Abscheidung partikelgebundener PFAS und anschließend durch eine Reihe von gekühlten Waschflaschen und XAD-2-Kartuschen zur Abscheidung gasförmiger PFAS geleitet. Die gesamte Apparatur zur Probenahme wurde ausschließlich für diesen Versuch verwendet, um Kreuzkontaminationen zu vermeiden. Außerdem wurden die Konzentration von HF im Abgas kontinuierlich mittels FTIR überwacht, um mögliche Veränderungen durch die thermische Zersetzung von PFAS zu erfassen.

Die PFAS-Gehalte in Boden und Abgas wurden mittels Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) bestimmt. Für die Bodenproben wurde die Methode CMA/3/D (basiert auf DIN 38414-14 und ISO 21675:2019) angewendet. Die Abgasproben wurden nach WAC/IV/A/025 (ebenfalls ISO 21675:2019) analysiert. Die Nachweisgrenze für die LC-MS/MS lag bei 1 ng/l und die Wiederfindungsraten zwischen 63 % und 148 %. Für die Bodenproben ergibt sich dann eine Bestimmungsgrenze (Level of Quantification, LOQ) von 100 µg/kg Trockenmasse. Für die Proben aus dem Reingas ist die Bestimmungsgrenze 0,05 ng/m³. Für die Berechnungen der DRE wurde dann für Werte die kleiner als die Bestimmungsgrenze sind, ½ LOQ angenommen.

1.3. Ergebnisse

Die Analyse der Bodenproben ergab am Sanierungsstandort einen mittleren PFAS-Gehalt von etwa 107 mg/kg. Bei Anlieferung in der Verbrennungsanlage lag der Wert mit 7,63 mg/kg deutlich niedriger. Diese Differenz wird darauf zurückgeführt, dass bei der Probenahme aus dem LKW vor allem die oberen Bodenschichten erfasst wurden, während sich die feineren, stärker kontaminierten Partikel vermutlich am Boden des Containers abgesetzt hatten. Für die Berechnung der DRE wurde daher sowohl mit dem höheren als auch mit dem niedrigeren Wert gerechnet, um die Bandbreite der möglichen Ergebnisse abzudecken.

Die Fingerprint-Analyse zeigte, dass PFOS den größten Anteil an den PFAS im Boden ausmachte (47 – 80 %), gefolgt von N-EtFOSAA und N-MeFOSAA. Der Anteil von PFOA lag nur bei 1 – 5 %, was mit Literaturdaten zu PFAS-Belastungen in kontaminierten Böden übereinstimmt [9, 7].

Während der Spiking-Phase stieg die PFAS-Konzentration im Abgas nur minimal von 4,20 ng/m³ (Baseline) auf 4,27 ng/m³. Die HF-Konzentration blieb ebenfalls nahezu unverändert, was darauf hindeutet, dass das Gaswäschesystem zusätzliche HF-Mengen effektiv entfernt. Die geringe Differenz zwischen Baseline und Spiking zeigt, dass entweder die zusätzliche PFAS-Fracht im Input nicht zu einer signifikanten Erhöhung der PFAS-Emissionen führt oder dass die Abgasreinigung sehr effizient arbeitet.

Die Fingerprint-Analyse des Abgases ergab ein deutlich anderes Bild als im Input: Hier dominierte PFOA (62 %), gefolgt von PFOS (26 %). Dies deutet darauf hin, dass während der thermischen Behandlung ein Teil der PFAS, insbesondere PFOS und verwandte Vorläufer, zu PFOA abgebaut werden.

Für die Berechnung der DRE wurden ausschließlich die acht PFAS-Marker betrachtet, die gemäß Stockholmer Konvention als POP gelten. Die Berechnung selbst ist angepasst an die Vorgaben der Basel-Konvention. Dazu wurde die Differenz zwischen dem zusätzlichen PFAS-Input während der Spiking-Phase und dem zusätzlichen PFAS-Output im Abgas ins Verhältnis zum Input gesetzt. Die Berechnung erfolgte sowohl mit den am Sanierungsstandort als auch mit den bei Anlieferung gemessenen PFAS-Konzentrationen, um eine Worst-Case-Betrachtung zu ermöglichen.

Die berechnete DRE lag – je nach zugrunde gelegtem Inputwert – zwischen 99,99996 % (bei niedrigerem Input) und 99,99997 % (bei höherem Input). Damit erfüllt die Anlage die Anforderungen der Basel-Konvention für eine umweltgerechte Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen [7]. Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass bei Temperaturen über 1.000 °C und ausreichender Verweilzeit in einem sehr hohen Maße die erfassten PFAS-Komponenten zerstört werden.

Ein anderer Aspekt der in Betracht gezogen werden muss, ist die Veränderung des PFAS-Fingerprints zwischen Input und Output. Während im Boden PFOS dominiert, ist im Abgas PFOA am häufigsten vertreten. Dies spricht für eine thermische Umwandlung von PFOS und verwandten Substanzen zu PFOA während der Verbrennung. Die genaue Kinetik und die Zwischenprodukte dieser Prozesse sind jedoch noch nicht vollständig verstanden und sollten Gegenstand weiterer Forschung sein.

Insgesamt ist jedoch zu beachten, dass die analytischen Methoden zur Bestimmung von PFAS in festen und gasförmigen Proben noch mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Hauptlimitationen liegen dabei in der analytischen Erfassung aller relevanten PFAS-Komponenten/Moleküle sowie in der repräsentativen Probenahme. Die unter diesen Bedingungen bestimmten Konzentrationen liegen oft nahe an der Bestimmungsgrenze, und die Wiederfindungsraten variieren. Zudem wurden ausschließlich die acht PFAS aus der POP Verordnung betrachtet, für die ein regulatorischer Rahmen existiert. Daher sind die berechneten DRE-Werte als Näherungswerte zu verstehen, die die tatsächliche Zerstörungs- und Beseitigungseffizienz vermutlich eher unterschätzen als überschätzen.

2. Untersuchungen in Hamburg

Die Untersuchungen am Standort in Hamburg begleiten den Anlagenbetrieb über einen längeren Zeitraum, um die möglichen Veränderungen, die sich aus neuen, PFAS haltigen Abfallströmen ergeben könnten, zu verfolgen. Dazu werden die Emissionen

am Kamin durch regelmäßige Untersuchungen verfolgt. Dies wird begleitet von Untersuchungen aller Relevanten innerbetrieblichen Ströme, um eine Massenbilanz für PFAS am Standort zu erhalten. Daneben wird auch der Abwasserstrom, der aus anfallendem Regenwasser besteht und mit dem Anlagenbetrieb – und damit auch mit einer Bilanz in Zusammenhang mit der thermischen Behandlung von Abfällen – keinen unmittelbaren Zusammenhang hat, untersucht.

Da die Messungen begleitend stattfinden, können diese nicht direkt mit der Versuchskampagne der Versuche in Antwerpen verglichen werden. Die Messungen der PFAS Konzentrationen im Reingas während des normalen Betriebs der SAV, innerhalb dessen auch PFAS-haltige Abfälle thermisch behandelt wurden, werden durch zwei verschiedenen Messinstitute wahrgenommen. Hier kommen zwei verschiedene Methoden der Probenahme zum Einsatz. Zum einen die Umsetzung der OTM-45, zum anderen aber auch eine daran angelehnte Variante, bei der eine gekühlten Sonde zum Einsatz kommt.

Bei den so erhaltenen Ergebnissen können deutliche Abweichungen in den festgestellten Rauchgaskonzentrationen beobachtet werden. Die Ursache ist in den verwendeten Probenahmeverfahren zu vermuten. Dieser Befund wird auch von den ersten Ergebnissen aus Ringversuchen am GKS Schweinfurth gestützt [14]. Insgesamt zeigen die Ergebnisse für Hamburg, ebenso wie für Antwerpen, sehr geringe PFAS Konzentrationen im Rauchgas.

Ausgehend von einem Durchsatz von 151.000 Tonnen Abfall im Jahr 2024 und davon etwa 600 Tonnen PFAS-haltige Abfälle, kann hier für Hamburg, mit den aus den Reingasmessungen resultierenden Masseströmen, eine Zerstörungseffizienz von > 99,9999 % abgeschätzt werden. Dies entspricht den Anforderungen des Baseler Übereinkommens [11].

Regenwasser

Die Überwachung des Regenwassers im Bereich der Regenwasser- und Löschwasserrückhaltung, durch ein externes akkreditiertes Labor, zeigte PFAS Konzentrationen, die zwar bereits erwartbar waren – dies aufgrund historischer Löschmitteleinträge nicht nur der eigenen Anlage – jedoch die Gelegenheit boten, trotz Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte, das Tochterunternehmen Inopsys mit einem alternativen nicht thermischen Behandlungsverfahren über eine Pilotanlage einzubeziehen.

Das Unternehmen Inopsys ist spezialisiert auf mobile Lösungen für die Behandlung von komplexen und toxischen Abwässern, die bei pharmazeutischen und chemischen Produktionsprozessen anfallen. Neben der Rückgewinnung von wertvollen Materialien, ist dies insbesondere die Entfernung von besonders besorgniserregenden Stoffen (SVHC) wie aktiven pharmazeutischen Inhaltsstoffen (API) oder PFAS aus Industrieabwässern.

Grundsätzlich werden modulare Systeme verschiedener Technologien und verschiedener entwickelter Absorbentien im Rahmen einer R&D-Phase im Laborbereich getestet und ideal zur Anwendung gebracht. Für das Regenwasser in Hamburg wurde ein Filtersystem, bestehend aus Sandfiltern und speziellen Ionentauschern, ausgelegt. Die Filter und Ionentauscher sind in einem Container zusammen mit der benötigten Infrastruktur

montiert und konnten somit einfach in die bestehende Infrastruktur der Anlage in Hamburg direkt integriert werden (Bild 3). Für die Installation und Inbetriebnahme waren lediglich Strom und Wasser sowie das zu behandelnde Abwasser bereitzustellen. Der Betrieb dieser Pilotanlage wird über einen Fernzugriff gesteuert. Die Probenahme und Überwachung der Anlage liegt in den Händen der Mitarbeiter vor Ort.

Mit dieser Anlage und der projektierten und bereitgestellten Technologie, in diesem Fall den insbesondere speziellen Ionentauschern, können die PFAS Konzentrationen im Abwasser bis unter die Bestimmungsgrenze gesenkt werden. Das System zeigt damit nicht nur die Machbarkeit, sondern dient innerhalb des Unternehmens auch als Demonstrationsanlage für die Entfernung von PFAS aus Abwasserströmen.

3. Zusammenfassung



Bild 3: Ansicht der Filter innerhalb des Containers

Die durchgeführten Versuche und begleitenden Untersuchungen zeigen, dass industrielle Sonderabfall-Verbrennungsanlagen unter den richtigen Bedingungen eine sehr hohe Zerstörungs- und Beseitigungseffizienz für PFAS erreichen können. Vergleichende Literaturdaten zeigen, dass die hier gemessenen PFAS-Emissionen im Bereich oder unterhalb der Werte liegen, die in anderen industriellen und Pilotanlagen beobachtet wurden. Die Unterschiede in den Emissionen können auf unterschiedliche Abfallzusammensetzungen, Prozessbedingungen und Abgasreinigungssysteme zurückgeführt werden. Die Ergebnisse liefern wichtige Anhaltspunkte für die regulatorische

Bewertung und die Weiterentwicklung von Entsorgungsstrategien für PFAS-haltige Abfälle, die in bestimmten Konzentrationen in flüssigen Medien auch alternativ behandelt werden können, wie dies über die modulare Technik der Inopsys nachgewiesen wurde.

4. Quellen

- [1] Aleksandrov, K.; Gehrmann, H.-J.; Hauser, M.; Mätzing, H.; Pigeon, D.; Stapf, D.; Wexler, M.: Waste incineration of Polytetrafluoroethylene (PTFE) to evaluate potential formation of per- and poly-fluorinated alkyl substances (PFAS) in flue gas. *Chemosphere*, 2019, 226, 898
- [2] Blotvogel, J.; Giraud, R. J.; Rappé, A. K.: Incinerability of PFOA and HFPO-DA – Mechanisms, kinetics, and thermal stability ranking. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457, 141235.
- [3] Boudin, S.; Huppertz, T.; Le Bihan, M.; Salmon, T.: PFAS in Belgian industry – market study. Reference Nr. 2023/80109/E4, Federal Public Service of Belgium, 2023
- [4] Caneghem, J. V.; Verstegen, A.; Torremans, G.; Hofman, J.; Berghmans, P.; Otten, G.; Herremans, S.; Van Meenen, E.; De Ren, L.; Van Brecht, A.: Polyfluoroalkyl substances in dedicated hazardous waste incinerators: Framework and industrial scale experimental estimation of destruction and removal efficiency. *Waste Management & Research*, 2025, 0, 0

- [5] Crisenbery, M.; Kumm, J.; Barranco, F. T.; Troxler, W.: Case Study: PFAS Thermal Destruction Testing at a Commercial Hazardous Waste Incinerator. EM Magazine, Air & Waste Management Association, 2024
- [6] Gehrmann, H.-J.; Taylor, P.; Aleksandrov, K.; Bergdolt, P.; Bologa, A.; Blye, D.; Dalal, P.; Gunasekar, P.; Herremans, S.; Kapoor, D.; Michell, M.; Nuredin, V.; Schlipf, M.; Stapf, D.: Mineralization of fluoropolymers from combustion in a pilot plant under representative European municipal and hazardous waste combustion conditions. Chemosphere, 365, 2024, 143403
- [7] Li, F.; Zhang, C.; Qu, Y.; Chen, J.; Liu, Y.; Zhou, Q.: Quantitative characterization of short- and long-chain perfluorinated acids in solid matrices in Shanghai, China. Science of the Total Environment, 2010, 408, 617.
- [8] LUC/VI/003: Determination of the concentration of per- and polyfluoroalkyl compounds (PFAS) in a guided gas stream. Version Juni 2024
- [9] McGuire, M. E.; Schaefer, C.; Richards, T.; Backe, W. J.; Field, J. A.; Houtz, E.; Sedlak, D. L.; Guelfo, J. L.; Wunsch, A.; Higgins, C. P.: Evidence of remediation-induced alteration of subsurface poly- and perfluoroalkyl substance distribution at a former Firefighter Training Area. Environmental Science and Technology, 48, 6644, 2014
- [10] OECD: Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance. OECD Series on Risk Management of Chemicals, OECD Publishing, Paris, ENV/CBC/MONO(2021)25, 2021
- [11] Technical Guidelines Addendum: Technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with perfluorooctane sulphonic acid PFOS, its salts and perfluorooctane sulphonyl fluoride PFOSF and PFOA-related compounds, and perfluorohexane sulphonic acid PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds. <https://www.basel.int/Implementation/TechnicalMatters/DevelopmentofTechnicalGuidelines/TechnicalGuidelines/tabid/8025/Default.aspx> [Zugriff am 30. Oktober 2024]
- [12] United States Environmental Protection Agency EPA: PFAS Destruction by a Hazardous Waste Incinerator: Testing Results. EPA 600/R-25/172, September 2025
- [13] Weber, N.H.; West, G.V.; Roberson, W.R.; Mackie, J.C.; Mattila, J.M.; Burnette, P.; Allen, M.; Preston, W.; Linak, W.P.; Krug, J.D.: Thermal treatment of hexafluoropropylene oxide dimer acid HFPO-DA using a pilot-scale research combustor. Journal of Hazardous Materials, 495, 138905, 2025
- [14] Wother, D.; Quicker, P.; Warnecke, R.; Holfelder, A.; Gehrmann, H.-J.: Behavior of PFAS in a municipal solid waste incineration plant under systematic increase of PFAS input. Vortrag, 16.09.2025, online PFAS Workshop der BAM

Ansprechpartner



Dr. Florian Grote

Indaver Deutschland GmbH
Director SWI Treatment Germany
Waldstraße 11
64584 Biebesheim, Deutschland
+49 40 73351 558
florian.grote@indaver.com