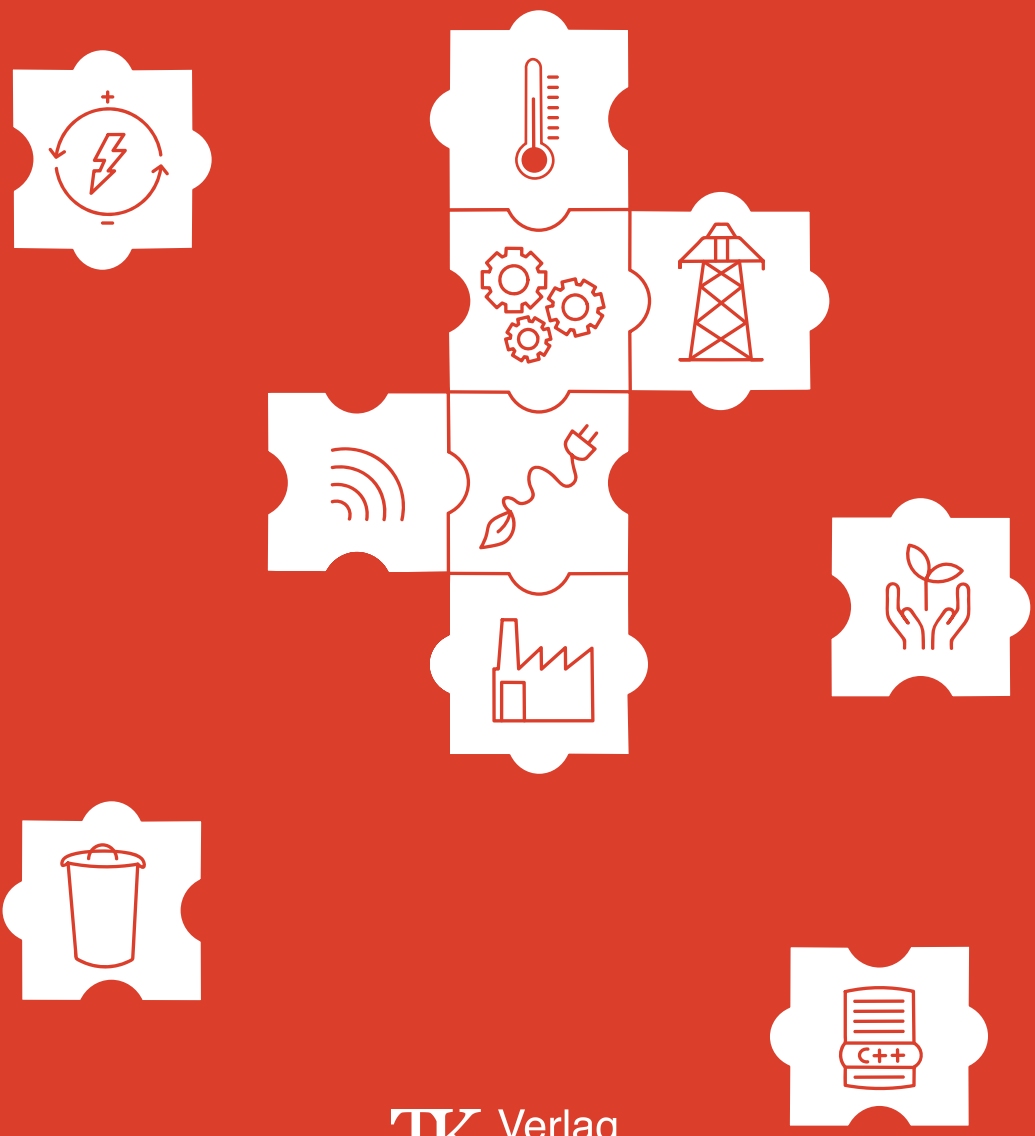
Abfallwirtschaft und Energie 2

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Peter Quicker, Alexander Gosten, Ella Stengler



TK Verlag

Stephanie Thiel
Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Peter Quicker
Alexander Gosten
Ella Stengler

Abfallwirtschaft und Energie

Band 2

TK Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dnb.de abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Alexander Gosten, Ella Stengler (Hrsg.):

Abfallwirtschaft und Energie, Band 2

ISBN 978-3-911006-86-6 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag:	Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2025
Redaktion:	Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm
Erfassung und Layout:	Julia Joschko, Carolin Paweł, Janin Burbott-Seidel, Roland Richter, Cordula Müller, Lena Stucke

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetze

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Vorwort

Liebe Freunde der Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie,

liebe Teilnehmer der Konferenz und

liebe Leser dieses Buches,

es ist nunmehr – nach vorangegangenen 20 Bänden der Reihe *Energie aus Abfall* – der zweite Band der neuen Buchreihe *Abfallwirtschaft und Energie*. Wir haben uns in den letzten Konferenzen sehr stark mit den neuen externen Einflüssen auf die Abfall- und Energiewirtschaft beschäftigt, die insbesondere die Branche der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen betreffen bzw. zunehmend betreffen werden. Dies waren u.a. Themen wie die Taxonomie, Kohlenstoffmanagement, Emissionshandel, Sektorenkopplung, IED-Novellierung, BVT-Schlussfolgerungen. Ferner haben wir die Zukunft der TAB aus den unterschiedlichen Perspektiven verschiedener Akteure betrachtet.

Unser Ziel war und ist es, unsere Kongressteilnehmer und Leser möglichst frühzeitig für wichtige Entwicklungen zu sensibilisieren und Impulse für Entscheidungen zu geben. Dieses Mal konzentrieren wir uns besonders auf die konkreten Problemstellungen zur Abscheidung von Kohlendioxid und den weiteren Umgang mit dem CO_2. Die Technologien sind im Prinzip bekannt, großtechnisch wird hier Neuland beschritten.

Natürlich wieder vertreten sind die bekannten Blöcke zu den Themen Neu- und Umbau von TAB, Betriebsoptimierungen, Anforderungen an kritische Infrastrukturen, Korrosion und Abgasmessungen. Von besonderer Aktualität sind der Umgang mit Carbonfasern und der Stand der Wärmeplanungen in Europa – ein Thema, um das hart gerungen wird. Es ist Chance und Risiko zugleich für die Zukunft der TAB.

Einen Überblick über die Evolution der rostbasierten TAB des Hauses *Martin* durch Herrn Ulrich Martin anlässlich des hundertjährigen Bestehens der Firma schließt die Plenarveranstaltung ab.

Wir hoffen einmal mehr mit dieser Konferenz allen Entscheidern und Stakeholdern wichtige Impulse für künftige Entscheidungen zu geben.

Januar 2025

Professor Dr.-Ing. Peter Quicker *Dr.-Ing. Alexander Gosten* *Dr. Ella Stengler*

Dr.-Ing. Stephanie Thiel *Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.*

Inhaltsverzeichnis

Wohin mit dem CO2?– Auf dem Weg zu Best Practice Lösungen

Betreiber im Spannungsfeld – Energieversorgung versus CO_2-Abscheidung
Rudi H. Karpf und Sophie Kreuz 2

CO_2-Strategie eines großen Anlagenbetreibers
Jörn Jakob 18

CO_2-Abscheidung an Abfallverbrennungsanlagen: Technische Optionen, wirtschaftliche Einstufung und THG-Bilanz
Wolfram Dietz, Roland Schipf und Wolfgang Rommel 26

25 Years of Commercial Experience with the KM CDR Carbon Capture Process
Torsten Buddenberg 42

TAB im Zentrum der Kreislaufwirtschaft – Roxyfuel für die energiesparende CO_2-Lieferung
Ragnar Warnecke 60

CCUS-Projekte in Europa – Beispiele und Lessons Learned
Mareike Schneider, Andrea Stooß und Matthew Geraghty 80

Wärmeplanung/Abwärmenutzung aus WtE-Anlagen in Europa

Europäische Rechtsgrundlagen der Wärmeplanung
Inès Stefen 96

Nachhaltige Wärmeversorgung aus TAB in Deutschland
Martin Treder 108

Wärmeplanung in Flandern (Belgien) und Wärmenutzung am Beispiel einer WtE-Anlage und Sonderabfallverbrennungsanlage
Andreas Ellerkmann 124

Nutzung von Abwärme aus Kehrichtverwertungsanlagen in der Schweiz
Robin Quartier 136

Dekarbonisierung der Fernwärme in Wien – mehr als nur ein Plan
Holger Huschka, Rusbeh Rezania und Marieluise Pöschko-Reinweber 144

Wärmeplanung und Abwärmenutzung in Finnland
Camille Dubost und Juha Ripatti 160

Kritische Infrastrukturen

Einbindung der zusätzlichen Anforderungen durch NIS2 und KRITIS-DachG in die laufenden Projekte zur Umsetzung der BSI-KRITISV
Tim Grünewald und Wolfgang Krause 173

Prüfung und Nachweise für KRITIS-Anlagen
Andreas Lemke und Tim Stauffenberg 183

Integrierte Projektabwicklung als Weg zur Projektbeschleunigung

Integrierte Projekt-Allianz IPA – Gemeinsam zum Erfolg
Matthias Grabe 195

Schnell und effizient zum Projekterfolg mittels Projektallianz *light*
Torsten Wenk, Léonie S. Mollet und Caroline Alexandra Stadelmann 209

Schnell und effizient zum Projekterfolg mittels Projektallianz (light)
Robert Theissen 219

Neubau und Umbau von Anlagen

Dubai Erfahrungsberichte
Kerstin Matthies und Ruedi Kummer 235

Herausforderungen bei globalen Projekten am Beispiel von Thailand
Tobias Scheithauer 249

Waste-to-Energy in Äthiopien – eine Bewertung der Reppie Anlage in Addis Abeba
Jörn Franck und Jürgen von Kories 259

Modernisierung des Gemeinschafts-Müllheizkraftwerks Ludwigshafen – Projektabschluss und Ausblick
Jochen Schütz 275

Do's and Don'ts beim Anlagenbau im Bestand (Brownfield): Herausforderungen und Erfahrungen bei Ertüchtigungsprojekten
Steffen Scholz 289

Technik, KI und Personal

Verbesserte Transparenz und Optimierung der technischen Prozesse an der MVA Oberhausen
Robert von Raven und Frank Nachtsheim 315

Dreißig Jahre Erfahrung mit KI-Systemen in der thermischen Abfallbehandlung – ein Rückblick
Christian Gierend, Uwe Schneider und Sebastian Georg 331

Wissensverlust verhindern, Zukunft sichern: Die Rolle moderner Technik in der Instandhaltung – KI und Drohnen-Technik im Müllheizkraftwerk
Stefan Kiene, Susanne Kumm, Matthias Probst und Waltraud Engel 353

Fachkräfte aus den eigenen Reihen gewinnen am Beispiel der GMVA
Kim Philipp Hölzer, Joel Zganiatz und Timo Kraus 365

Rost

100 Jahre *Martin* – Evolution der rostbasierten thermischen Abfallverwertung. Gestern, heute und morgen
Ulrich Martin und Valerie Degenhardt 375

Moderne Rostfeuerungssysteme – Potenziale im Kontext von steigenden Anforderungen an Emissionen und Effizienz
Bernd Spliethoff 389

Korrosion und Werkstoffe

Luftgekühlte mobile Hochtemperatur-Kamerasonde zum flexiblen Einsatz in thermo-chemischen Prozessen
Dominik Schneider, Joos Brell, Andreas Lichtinger, Markus Müller und Fabian Riegel 405

Rauchgasseitiger Einsatz von mineralischen Additiven für Korrosionsschutz, Kessel- und Rohgasreinigung
Sebastian Pentz, Joep Biermann und Ferdinand Haider 423

Thermische Spritzverfahren in Kraftwerken – ein bewährter Standard in der Praxis
Hendrik Häuser und Rainer Keune 441

Abgas – Messung und Reinigung

Kontinuierliche Erfassung der biogenen CO_2-Emissonen mittels Langzeitprobenahme
Jürgen Reinmann 463

Zirkulierende Wirbelschicht in der Abgasreinigung: Lösungen für verschärfte Emissionsanforderungen
Tobias Brand, Sven Kaiser und Jochen Treubel 473

Besondere Abfälle

Der Markt für Altholz in Deutschland bis 2030 – Wohin bewegt sich der Altholzmarkt?
Dirk Briese und David Litau 489

Konzept, Leistungsfähigkeit und erste Betriebserfahrungen des Dinslakener Holzenergiezentrums
Burkhard Krüger, Annette Ziemann-Nöthe, Ferdinand Krüll und Eckhard Lehmann 503

Schadstoff oder Ressource – zwei Aspekte zum Thema Nachhaltigkeit bei der innovativen Behandlung industrieller gefährlicher Reststoffe
Dina Filiz, Stefan Kühnbach und Florian Grote 521

Chemisches Recycling

Thermochemisches Kunststoffrecycling: Technische und ökologische Bewertung
Peter Quicker und Mathias Seitz 535

Wo steht das chemische Recycling in der Kreislaufwirtschaft? – Einordnung aus Sicht des Umweltbundesamtes
Julia Vogel 547

Vergleich von chemischen Recyclingoptionen mit der thermischen Abfallverwertung
Malte Hennig, Tristan Dreising, Anna Reeves, Hans-Joachim Gehrmann, Frank Richter, Britta Bergfeldt, Grazyna Straczewski, Salar Tavakkol und Dieter Stapf 559

Arcus – Status Update nach zwei Jahren Betrieb der Pyrolyse-Demonstrationsanlage
Marco Tomasi Morgano, Markus Klatte und Daniel Odenthal 571

Chemisches Recycling von Mischkunststoffabfällen mit dem Pyrolyse-Verfahren von Quantafuel
Bob Tulleken, Sigvart Eggen, Thomas Tharaldsen und Christian Lach 581

Direktverölung gemischter Kunststoffabfälle – thermo-chemische Konversion in der Flüssigphase
Christian Haupts..... 589

Carbonfasern in industriellen Hochtemperaturprozessen

Thermisches Abbauverhalten von Carbonfasern – Grundlagenuntersuchungen für potentielle Verwertungsprozesse
Manuela Wexler, Werner Baumann, Krassimir Garbev, Hans-Joachim Gehrmann, Manuela Hauser, Jonathan Mahl, Daniela Merz und Dieter Stapf 603

Carbonfaserhaltige Reststoffe als Sekundärrohstoff – Einsatz in der Pyrometallurgie
Florian Loose 617

Untersuchungen zur Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle im Zementwerk (Projekt EVCAZ)
Isabel Kaphahn, Kai Schlögel, Kirsten Stark und Peter Quicker 631

Dank..... 640

Autorenverzeichnis..... 645

Inserentenverzeichnis..... 651

Wohin mit dem CO_2? – Auf dem Weg zu Best Practice Lösungen

Operators in a Conflicting Situation – Energy Supply Versus CO_2 Capture

Rudi H. Karpf and Sophie Kreuz

Since being included in the Fuel Emissions Trading Act (BEHG), which regulates the trading of certificates for CO_2 emissions, German waste incinerators have been in the situation of having to pay money for every ton of CO_2 emitted. The current certificate price of 45 EUR per ton of CO_2 emitted is still at a level that is justifiable in terms of operating costs. However, if the certificate price rises rapidly, as politicians envisage, the construction and operation of a CO_2 capture stage can have economic advantages. For this reason, some plant operators are currently conducting studies to determine which processes for CO_2 capture are generally possible. It must be checked whether the necessary space is available for any retrofitting and what impact the operation of a capture facility might have on the site's energy infrastructure. The latter in particular puts operators in a conflict between CO_2-free or CO_2-neutral operation and their additional role as a regional heat supplier. This applies in particular to the CO_2 capture technology that is most frequently considered and most advanced today, amine scrubbing. This process is classified as a chemical absorption process and requires heat energy within the capture process for the regeneration of the amine solution or desorption of the CO_2. The energy consumption when using Monoethanolamine (MEA), the most widely used amine today, is approximately 1 MWh of thermal output per 1 ton of captured CO_2. Since the energy provided by combustion at German waste incineration plants is used to supply electricity or district heating, amine scrubbing reduces the electricity and heat output provided by the plant. In addition, the question arises as to what to do with the captured CO_2. There is currently no infrastructure for the transport routes, regardless of whether CO_2 recovery/use (CCU) or storage (CCS) is being pursued. In addition to the aspects already outlined, the space available at many waste incineration plant locations also plays a decisive role in considering CO_2-neutral or CO_2-free operation. Waste incinerators, whose original task is the safe and environmentally friendly recycling/disposal of waste, are operating in this area of tension.

Betreiber im Spannungsfeld – Energieversorgung versus CO_2-Abscheidung

Rudi H. Karpf und Sophie Kreuz

1. Aktuelle Situation der Abfallverbrenner als Energieversorger 4

2. Aktueller Stand der CO_2-Abscheidung..... 7

3. Einfluss und Auswirkungen einer CO_2-Abscheidung auf die TBA..... 12

4. Lösungsansätze für die Integration einer CO_2-Abscheidung 15

5. Zusammenfassung und Appell..... 16

6. Quellen.....17

Die deutschen Abfallverbrenner sind seit der Aufnahme in das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), das den Handel mit Zertifikaten für CO_2-Emissionen regelt, in der Situation für jede emittierte Tonne CO_2 Geld zu bezahlen. Der heutige Zertifikatpreis mit 45 EUR je emittierte Tonne CO_2 ist noch auf einem Niveau, was im Rahmen der Betriebskostenrechnung vertretbar ist.

Sollte sich jedoch, wie von der Politik angedacht, der Zertifikatpreis rasant nach oben bewegen, kann der Bau und Betrieb einer CO_2-Abscheidestufe betriebswirtschaftliche Vorteile haben.

Aus diesem Grund prüfen derzeit einige Anlagenbetreiber zunächst im Rahmen von Studien, welche Verfahren zur CO_2-Abscheidung grundsätzlich in Frage kommen. Es ist zu prüfen, ob für eine eventuelle Nachrüstung die erforderlichen Platzverhältnisse gegeben sind und welchen Einfluss der Betrieb einer Abscheideeinrichtung ggf. auf die Energieinfrastruktur des Standortes hat. Insbesondere Letzteres führt die Betreiber in ein Spannungsfeld zwischen CO_2-freiem bzw. -neutralem Betrieb und ihrer zusätzlichen Rolle als regionaler Wärmelieferant.

Dies gilt insbesondere für die heute am häufigsten betrachtete und am weitesten entwickelte CO_2-Abscheidetechnik, die Amin-Wäsche. Dieses Verfahren ist den chemischen Absorptionsverfahren zuzuordnen und benötigt innerhalb des Abscheideprozesses Wärmeenergie für die Regeneration der Amin-Lösung bzw. Desorption des CO_2. Der Energieverbrauch bei Verwendung von Monoethanolamin (MEA), als dem heute am weitest verbreiteten Amin, beträgt etwa 1 MWh thermische Energie pro 1 Tonne abgeschiedenem CO_2. Da an deutschen Abfallverbrennungsanlagen die aus der Verbrennung gewonnene Energie zur Strom- oder Fernwärmeversorgung genutzt wird, reduziert sich durch die Amin-Wäsche die durch die Anlage bereitgestellte Strom- und Wärmeenergie.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, wohin mit dem abgeschiedenen CO_2. Derzeit existiert noch keine Infrastruktur für die Transportwege, unabhängig ob eine CO_2-Verwertung/Nutzung (CCU) oder eine Speicherung (CCS) verfolgt wird.

Zu den bereits aufgezeigten Aspekten spielen an vielen Standorten von Abfallverbrennungsanlagen auch die Platzverhältnisse eine entscheidende Rolle in der Betrachtung einer CO_2-neutralen bzw. -freien Betriebsweise.

In diesem Spannungsfeld bewegen sich Abfallverbrenner, deren ursprüngliche Aufgabe die sichere und umweltfreundliche Abfallverwertung/-entsorgung ist.

1. Aktuelle Situation der Abfallverbrenner als Energieversorger

Die Abfallverbrenner leisten heute neben der sicheren und umweltgerechten Entsorgung/Verwertung entstehender Abfälle einen nicht zu vernachlässigen Anteil lokaler Energieversorgung. In einigen Kommunen und Städten sind die ausgekoppelten Wärmeleistungen eine tragende und nicht mehr wegzudenkende Energiequelle zur häuslichen Wärmeversorgung respektive Prozesswärmeversorgung von Industrie- und Produktionsprozessen.

Mit der Tatsache, dass aufgrund der Abfallzusammensetzung etwa 50 Ma.-% biogenen Ursprungs sind, ist die bereitgestellte Energie bereits zur Hälfte CO_2 neutral. Die restlichen 50% fallen unter unvermeidbare Abwärme des seit 1. Januar 2024 in Kraft getreten Wärmeplanungsgesetz (WPG) für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze. Das bedeutet, dass die unvermeidbare Abwärme aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen (TAB) mit erneuerbaren Energien (EE) im Wärmeplanungsgesetz (WPG) und Gebäudeenergiegesetz (GEG) gleichgestellt sind. Insofern trägt die TAB und die ausgekoppelte Wärmeleistung im Sinne des WPG und GEG zu einhundert Prozent zur Decarbonatisierung bei.

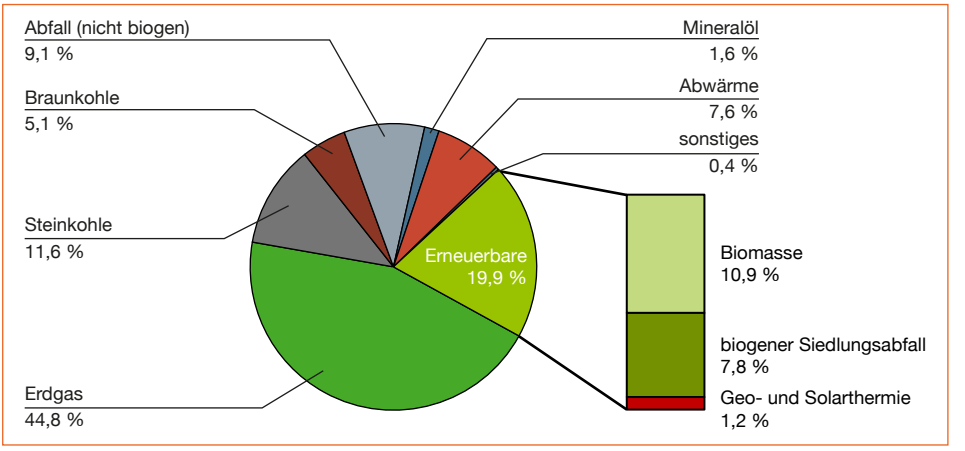


Bild 1: Wärmeerzeugung zur Versorgung über Wärmenetze zur leitungsgebundenen Fern- und Nahwärme-/-kälteversorgung, einschließlich Einspeisungen von Industrie und Sonstigen, netto, nach Energieträgern, 2023: 129 Mrd. kWh

Quelle: Destatis, BDEW; Stand 04/2024

In Folge dessen ist der Anteil der deutschen TAB an der Wärmeversorgung, die Summe aus Abfall (nicht biogen) mit 9,1 % und biogener Siedlungsabfall innerhalb der Erneuerbaren mit 7,8 %, nunmehr 16,9 %, wie in Bild 1 der Grafik zu entnehmen ist. Der größte Anteil mit 44,8 % wir über Erdgas abgedeckt.

Insgesamt leisteten die deutschen Abfallverbrennungsanlagen seit 2010, wie Bild 2 zu entnehmen ist, einen spezifischen Energie-Output pro Tonne Abfall von etwa 1,2 MWh. Diese Energie setzt sich standortspezifisch aus Prozessdampf, Wärme und elektrischer Energie zusammen. Diese Angaben stammen von dem Interessensverband der thermischen Abfallanlagen in Deutschland (ITAD) [4].

Kennwerte, MWh	2019	2020	2021	2022	2023
$Wärme_{exp.}$	9.549.000	9.961.000	11.156.000	10.452.000	10.341.000
$Prozessdampf_{exp.}$	12.597.000	13.548.000	13.824.000	14.005.000	14.598.000
Summe Wärme	22.146.000	23.509.000	24.980.000	24.457.000	24.939.000
$Strom_{prod.}$	10.025.000	10.497.000	10.280.000	10.366.000	10.720.000
$Strom_{exp.}$	7.640.000	7.983.000	7.798.000	7.865.000	8.085.000
Anzahl Anlagen	81	84	84	91	92

vorläufige Daten, bei neuem Erkenntnisstand können sich die Daten ändern, Daten gerundet (Rundungsfehler < 0,2 %)

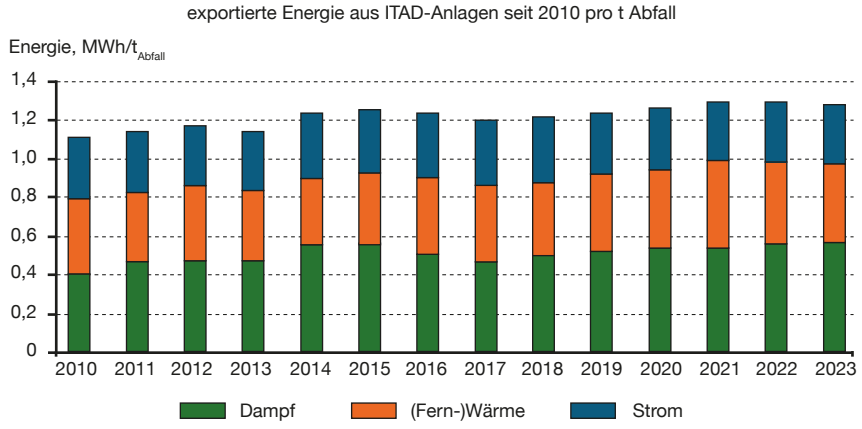


Bild 2: Energie-Output deutscher Abfallverbrennungsanlagen seit 2010

Quelle: Wens, B.: 36. VDI-/ITAD-Fachkonferenz Thermische Abfallbehandlung, Würzburg, 09.10.2024.

Dem gegenüber steht, dass die bei der Abfallverbrennung freigesetzten CO_2-Emissionen seit dem 1. Januar 2024 dem nationalen BEHG unterliegen. Die EU wird bis Mitte 2026 evaluieren, ob und wie die TAB ab 2028 in den europäischen Emissionshandel aufgenommen werden.

Mit Erreichung der politischen Zielsetzung, dass die CO_2-Emissionshandelskosten ein Niveau besitzen, dass die CO_2-Abscheidung kostengleich bzw. günstiger ist, wird ein Carbon Capture System wirtschaftlich. Wirtschaftlich nicht im Sinne von einer Gewinngenerierung, sondern in Bezug auf Kostenvorteile für die spezifischen Entsorgungskosten und somit für jeden einzelnen Bürger.

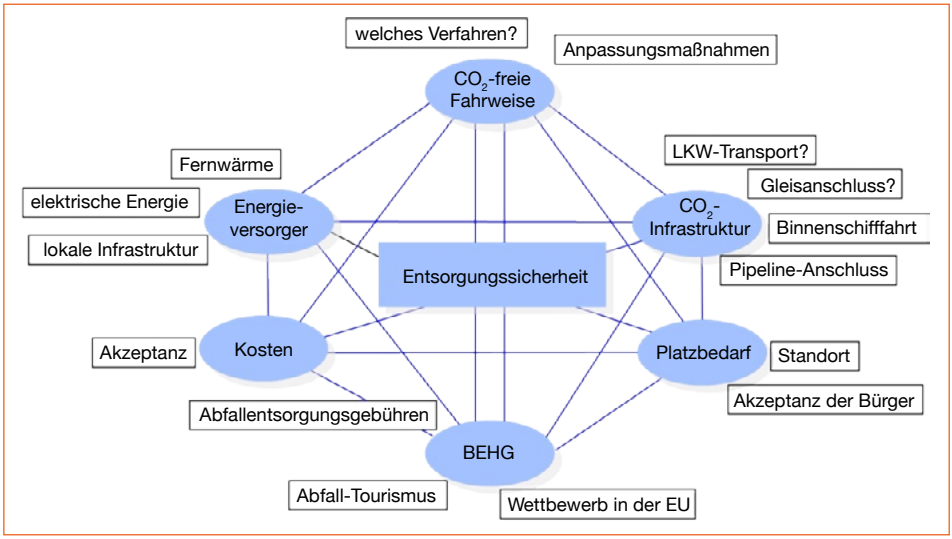


Bild 3: Spannungsfeld der nationalen Abfallverbrenner

Die Betreiber von TAB's befinden sich zunehmend in einem Spannungsfeld wie in Bild 3 dargestellt. Durch die heutige Einbeziehung der TAB in das BEHG steigt das Risiko von Abfall-Tourismus und einem Entsorgungswettbewerb innerhalb der EU. Eine mögliche CO_2-Abscheidung wird jedoch ganz unterschiedliche Konsequenzen für die einzelnen Standorte mit sich bringen. Beginnend mit der Frage welches Abscheideverfahren das günstigste und sinnvollste ist, gefolgt von dem spezifisch erforderlichen Energieaufwand und dessen Einfluss auf die Energieinfrastruktur (Fernwärme, Strom). Abgesehen davon ist ein umweltverträglicher Abtransport des abgeschiedenen CO_2 sicherzustellen. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass an einigen Standorten der Platz für die Nachrüstung eines Post Combustion Systems überhaupt nicht gegeben ist.

Da bei vielen auf dem Markt befindlichen CO_2-Abscheideverfahren der technische Entwicklungsstand noch nicht so weit ist, dass er als zuverlässig und erprobt eingestuft werden kann, sind die Varianzen eines an den Standort abgestimmtes Verfahren sehr gering. Wie der aktuelle Stand hierzu ist, wird im Folgenden beschrieben.

2. Aktueller Stand der CO_2-Abscheidung

In Europa gibt es derzeit eine Vielzahl von Projekten zur CO_2-Abscheidung in unterschiedlichen Anwendungen und Projektentwicklungsgraden. Bild 4 gibt einen Überblick zu den jeweiligen Projekten.

Unter Berücksichtigung des deutschen Anlagenbestandes an Abfallverbrennungsanlagen ist mehrheitlich von einer Notwendigkeit einer Integration der CO_2-Abscheidung in bestehende Anlagen auszugehen. Das bedeutet, dass der eigentliche Verbrennungsprozess mit der daran anschließenden Abgasreinigung, aber auch der Energiebereitstellung aus dem Wasserdampfkreislauf von der CO_2-Abscheidung weitestgehend unberührt bleibt. Diese Anforderung reduziert die einsetzbare Technik auf die sogenannten nachgeschalteten Verfahren (engl. Post Combustion).

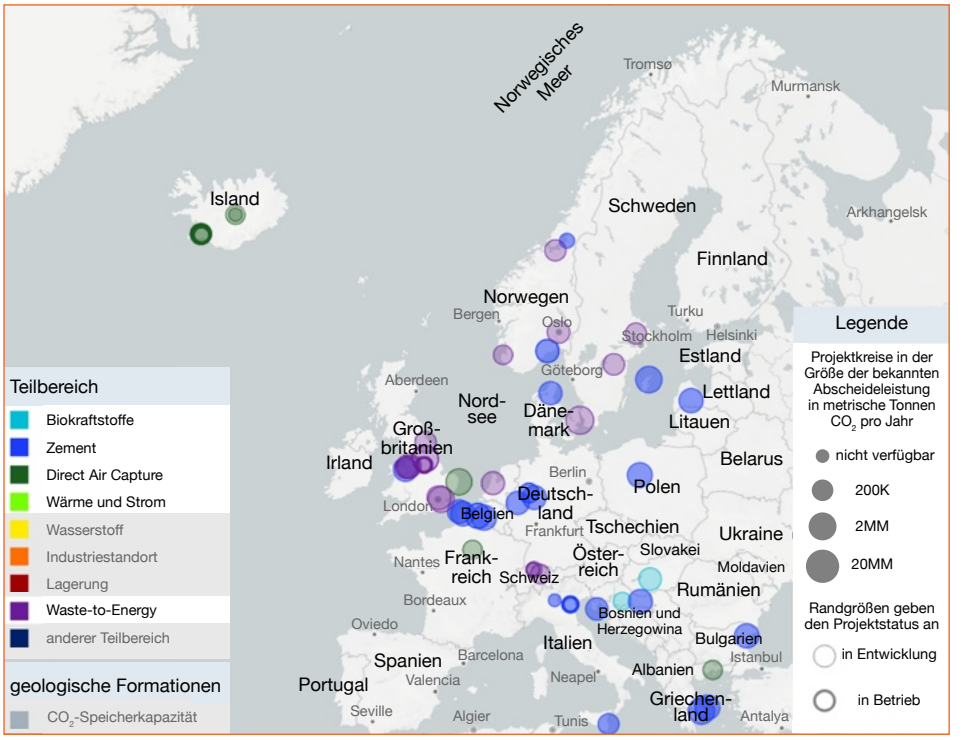


Bild 4: Überblick über die derzeitigen europäischen Projekte im Bereich Carbon Capture

Quelle: Clean Air Task Force; https://www.catf.us/ccsmapeurope, Stand 10/2024

Eine Integration von Oxyfuel Verfahren, in denen der Verbrennungsprozess mit reinem Sauerstoff vorgenommen wird, wird derzeit als alternativer Ansatz im Rahmen von Forschungsvorhaben geprüft. Der Vorteil wäre, dass das Reingas weitestgehend aus CO_2 und H_2O besteht. Die Anwendbarkeit dieser Technik ist aber zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht als flächendeckende Lösung für die CO_2-Abscheidung erkennbar und eine großtechnische Umsetzung im Bereich der Abfallverbrennung ist bislang noch nicht realisiert worden. Insofern konzentriert sich die nachfolgende Betrachtung auf die oben genannten Post Combustion-Verfahren.

Innerhalb dieser Verfahren ist zwischen unterschiedlichen technischen Reifegraden (engl.: Technology Readiness Level, kurz TRL) zu unterscheiden, wodurch die Auswahl möglicher einsetzbarer Verfahren begrenzt wird.

In Bild 5 ist eine Übersicht der Post Combustion Verfahren in Abhängigkeit ihres TRL-Grades dargestellt sowie eine Einordnung der generellen Eignung der jeweiligen Technologie für den Einsatz hinter Abfallverbrennungsanlagen (rote Umrandung).

Im Weiteren werden aus der Reihe der theoretisch geeigneten Verfahren vor allem diejenigen Verfahren mit einem TRL von › 8 betrachtet.

Damit reduziert sich die Anzahl der CO_2-Abscheideverfahren auf die nachgeschalteten, absorptiven Verfahren auf Basis von Aminen und Pottasche (HPC).

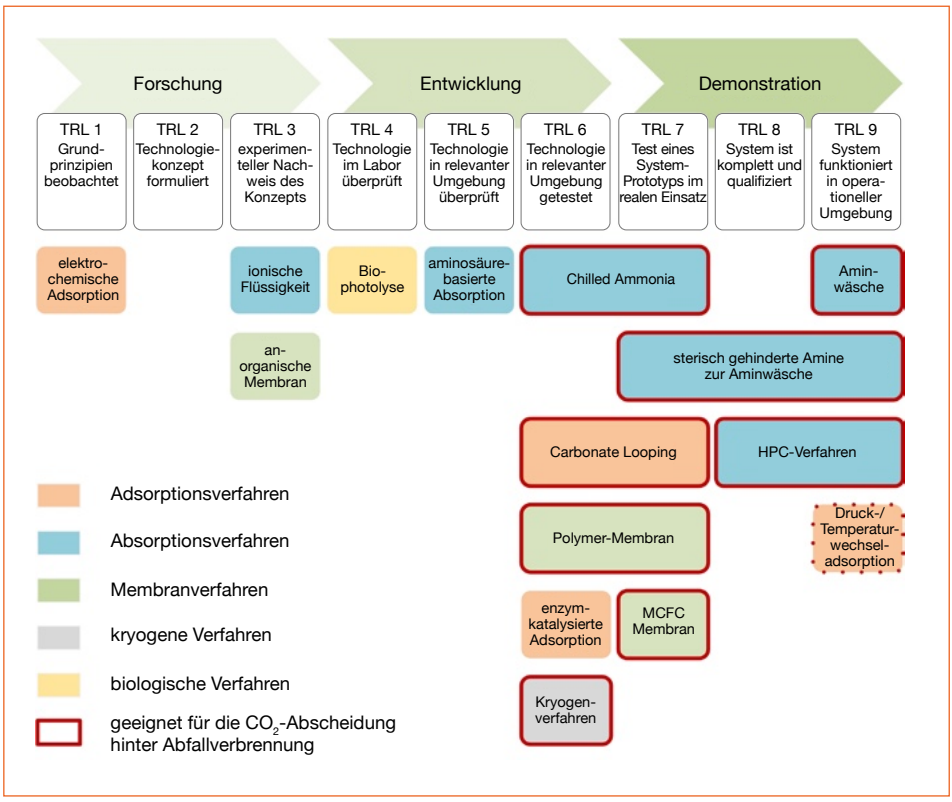


Bild 5: Übersicht über die Post-Combustion CO_2-Abscheideverfahren vor dem Hintergrund des Technology Readiness Level (TRL)

Beide Verfahren (Bild 6 und Bild 7) erfordern einen zweigeteilten Wäscherkreislauf, bei dem im ersten Schritt im Absorber das Abgas mit der Waschlösung in intensiven Kontakt gebracht wird, wobei das CO_2 durch das Waschmittel absorbiert wird, und bei dem in der zweiten Stufe, dem Desorber, in einem separaten Prozess das an Waschmittel gebundene CO_2 unter Wärmezufuhr desorbiert wird. Das dabei anfallende Gemisch aus CO_2 und H_2O wird nach diesem Abscheideprozess durch weitere Aufbereitungsschritte gereinigt und getrocknet, sodass ein je nach Anforderung aufgereinigter CO_2-Gasstrom erhalten wird. Dieser CO_2-Gasstrom ist in Abhängigkeit der Nachfolgeprozesse und des in diesem Rahmen erforderlichen Transportkonzepts zu verdichten. In der Regel erfolgt ein Transport in flüssiger Form, jedoch bei spezifisch sehr unterschiedlichen Druckniveaus.

Spezifische Unterschiede zwischen Amin-Wäsche und Pottasche-Verfahren

Die Amin-Wäsche weist primär einen hohen Wärmeverbrauch für die Desorption des abgeschiedenen CO_2 aus, was unmittelbar zu einer Reduzierung der an der TBA verfügbaren Wärmeleistung führt. Daneben ergeben sich im Vergleich zu dieser thermischen Leistung moderate elektrische Verbräuche durch Pumpen und Gebläse. Verfahren, die

auf der Aminwäsche beruhen sind damit primär wärmegeführt. Durch Weiterentwicklungen der eingesetzten Amine kann die erforderliche Wärme dabei um etwa 40 % reduziert werden. Gleichzeitig nimmt durch die Spezialisierung der Amine häufig die Empfindlichkeit gegenüber Störstoffen wie SO_x und NO_x im Abgas zu. Dadurch kann der Aufwand der Abgas-Vorbehandlung je nach TAB-Standort steigen, um unerwünschte Reaktionsprodukte im Prozess zu reduzieren. Außerdem sind die weiterentwickelten Amine in der Regel deutlich kostenintensiver und ihr Einsatz an Lizenzen gebunden.

Insgesamt stellt die Aminwäsche für den Einsatz hinter TAB eine erprobte und in anderen Anwendungen lange bekannte Technik dar. Die zum Einsatz kommenden Amine sind gut am Markt verfügbar. Deutliche Marktabhängigkeiten ergeben sich nur bei dem Einsatz spezifisch weiterentwickelter und auf dieser Grundlage patentierter Aminlösungen.

Herausforderungen beim Einsatz dieser Technik ergeben sich durch den Umgang mit dem Additiv selbst, dass entsprechende Gefahrstoffcharakteristika aufweisen kann und dem Umgang mit Produkten aus unerwünschten Nebenreaktionen sowie dem generellen Korrosionspotential.

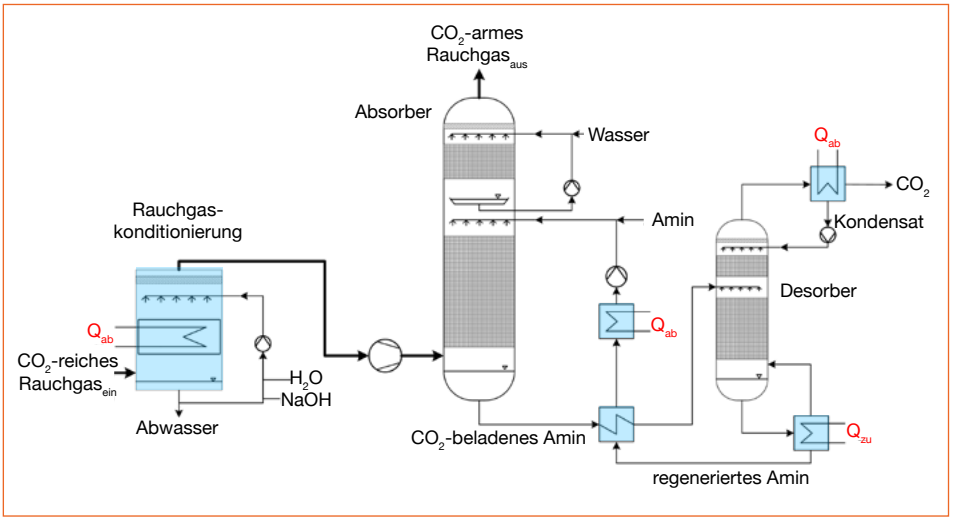


Bild 6: Aufbau der Amin-Wäsche mit Standardamin

Im Vergleich zur Amin-Wäsche sind die Pottascheverfahren (HPC) hingegen primär stromgeführt. Bei diesen HPC-Verfahren wird die Desorption des abgeschiedenen CO_2 nicht durch Wärmezufuhr, sondern durch eine Druckentspannung erreicht. Der dazu erforderliche Druck ist dabei durch den Einsatz geeigneter Verdichter auf der Abgasseite vor dem Wäscherkreislauf aufzubauen. Vergleichbar mit der Amin-Wäsche, je nach Systemanbieter, ist eine Abgaskonditionierung im Sinne einer Kühlung bis unter die Kondensationstemperatur.

Durch entsprechende Entspanner auf der gasseitigen Abströmseite der CO_2-Abscheidung kann ein Teil der Verdichtungsarbeit zurückgewonnen werden, wodurch der Wirkungsgrad des Prozesses verbessert werden kann.

Gleichzeitig gibt es Weiterentwicklungen des HPC-Verfahrens durch den Einsatz von Enzymen, die als Katalysator für die Abscheidereaktion dienen und dadurch die erforderliche Gasverdichtung reduzieren. Diese Maßnahme scheint vielversprechend um die erforderliche elektrische Leistung tatsächlich signifikant zu mindern. Gleichzeitig steig aber nach Angaben entsprechender Systementwickler die erforderliche thermisch Leistung für die Desorption, sodass durch die beschriebene Entwicklung eine Mischform aus Strom- und Wärmebedarf für die Abscheidung erreicht wird.

Die beschriebene Technik gilt wie auch die Aminwäsche als lange bekannte und etablierte Technik zur CO_2- und H_2S-Abscheidung.

Das HPC-Verfahren besitzt gegenüber der Amin-Wäsche Vorteile aufgrund einer besseren Handhabbarkeit des Additivs Pottasche (K_2CO_3), das nicht als Gefahrstoff gilt, sowie nach jetzigem Kenntnisstand weniger problematische Degradationsprodukte aufweist.

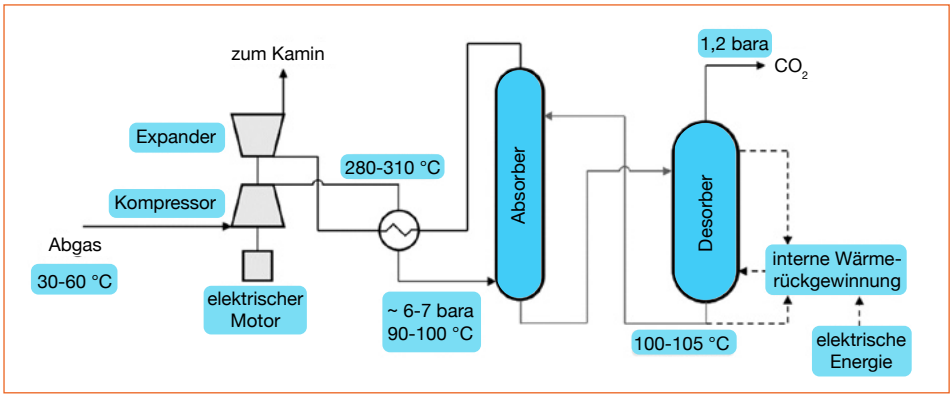


Bild 7: Aufbau des Pottasche-Verfahrens am Beispiel der Capsol-Technologie

Quelle: Marxer, D.: VBSA-Fachtagung, Carbon Capture aus Punktquellen mit Fokus auf Kehrrichtverwertungsanlagen, Olten, 06.12.2022.

Die sich an den Abscheideprozess anschließende Aufbereitung des CO_2-Stroms richtet sich insbesondere nach dem Transportsystem. Insbesondere die hohen Anforderungen im Bereich der pipelinegebundenen Transporte machen eine weitergehende Reinigung des CO_2 erforderlich. Diese Qualitätsanforderungen werden durch adsorptive Reinigungsstufen, aber vor allem durch die CO_2-Verflüssigung erreicht.

Dieser Verfahrensschritt ist wiederum vielfach durch das Transportkonzept vorbestimmt.

Die elektrische Leistung für die Verdichtung bis zur Verflüssigung ist abhängig von dem jeweiligen Transportkonzept und separat zu betrachten.

Auf Grund der mehrstufigen Verdichtung und der dabei erforderlichen Zwischenkühlung muss für diese Prozessschritte von einem elektrischen Aufwand von etwa 170 bis 240 kW/t CO_2 ausgegangen werden.

Neben den hier vorgestellten absorptiven Verfahren gibt es weiterentwickelte adsorptive Verfahren, die sich aber auf Grund des Gesamtaufbaus der Verfahren nur bedingt für eine Implementierung hinter TAB eignen. Dazu zählen vor allem das Carbonate Looping Verfahren.

Weitere Verfahren zur CO_2-Abscheidung, die nicht auf dem Absorptionsprinzip beruhen, befinden sich derzeit in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Sie sind aber allesamt noch nicht über den Versuchsstatus hinaus, sodass zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussage zu einer Alternative zu den hier vorgestellten Konzepten gesehen werden kann.

3. Einfluss und Auswirkungen einer CO_2-Abscheidung auf die TBA

Neben dem erforderlichen energetischen Aufwand um CO_2 aus dem Abgasstrom abzuscheiden, hat die Implementierung einer CO_2-Abscheidung weitere Auswirkungen auf die TAB Standorte, die jeweils individuell zu beurteilen sind. Zu diesen Auswirkungen zählen genehmigungsrechtliche, logistische, organisatorische wie auch öffentlich wirksame Aspekte.

Erfahrungen mit dem Anlagenbetrieb der ersten europäischen CO_2-Abscheidung hinter TAB an der AVR Duiven hat gezeigt, dass der Betriebsaufwand für die Abscheideanlage trotz weitgehender Automatisierung nicht ohne zusätzliches Personal zu bewältigen ist. Auch erweitert die Abscheide- und Aufbereitungstechnik, insbesondere durch die Verzahnung der Prozesse, die Aufgabenstellungen, die bislang nicht typisch für den TAB-Betrieb sind. Hier sind entsprechende Schulungen für das Anlagenpersonal erforderlich.

Von essenzieller Bedeutung für die Umsetzung einer CO_2-Abscheidung ist das Vorhandensein entsprechender Aufstellungsflächen auf dem Gelände der TAB. Eine typische Anlagengröße mit einer Abscheideleistung von etwa 16 t CO_2/h benötigt eine Aufstellungsfläche von etwa 40 m x 50 m. Diese Fläche sollte idealerweise in der Nähe der Abgasreinigung liegen, insbesondere wenn der bestehende Kamin für die Abgasableitung nach der CO_2-Abscheidung weiter verwendet werden soll. Die Aufstellung der Abscheideanlage selbst sollte dabei als Freiluftanlage vorgesehen werden, während die Verdichtungseinheiten aus Lärmschutzgründen in der Regel einzuhausen sind. Auf Grund des Alters vieler deutschen TAB-Standorte und der technischen Weiterentwicklung der Anlagen, vor allem im Bereich der Abgasreinigung, kann die Ausweisung entsprechender Aufstellungsflächen schwierig sein.

Da die Anlagen zur CO_2-Abscheidung im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens mit Öffentlichkeitsbeteiligung zu genehmigen sind, spielt auch die öffentliche Akzeptanz für die erfolgreiche Umsetzung eines solchen Projektes eine entscheidende Rolle. Die erforderlichen Additivmengen sowohl für die Abscheidung des CO_2, als auch für den Betrieb der möglichen Zwischenkühlkreisläufe der gestuften CO_2-Verdichtung und möglichen Wärmepumpenbetrieb können dazu führen, dass am TAB Standort zusätzliche Gefahrstoffmengen zu berücksichtigen sind. Das bedeutet, dass die Anlage möglicherweise, gemäß Störfallverordnung, als Störfallanlage einzustufen ist, was entsprechende Maßnahmen nach sich zieht.

Bilanzierungsbeispiel des Energiebedarfs und Reduzierung der Wärmeauskopplung

An dem folgenden Beispiel einer Abfallverbrennungsanlage mit einer jährlichen Verbrennungskapazität von 140.000 Tonnen Haus- und Gewerbeabfälle wird der Einfluss des Energiebedarfs zum Betrieb einer Amin-Wäsche auf die Energieinfrastruktur

verdeutlicht. Für die Energiebilanzierung wurde ein sterisch gehindertes Amin berücksichtigt. In Bild 8 beschreiben die orangefarbenen Balken die jährliche Wärmeauskopplung und die blaugefärbten Balken die elektrische Leistung. Das linke Balkenpaar beschreibt die Ist-Situation ohne eine Amin-Wäsche und wurde für den Vergleich mit 100 % angesetzt. Das zweite Balkenpaar beschreibt den Betrieb der Amin-Wäsche für einen ganzjährigen Betrieb mit einer CO_2-Abscheideleistung von 90 %. Dadurch wird die jährliche Wärmeauskopplungskapazität um 34 % reduziert und für die elektrische Energie bedeutet das, dass die Anlage kein Lieferant für elektrische Leistung mehr ist, sondern zum Abnehmer wird. Gegenüber dem Lieferantenstatus für elektrische Energie bedeutet das eine prozentuale Verschiebung um -111 %.

Um wärmeseitig die Verluste zu kompensieren, sind unter Berücksichtigung von Wärmepumpen, die Ab- und Kondensationswärmepotentiale bilanziert worden. Das dritte Balkenpaar beschreibt den Einsatz einer Kompressions-Wärmepumpe (WP), was folge dessen zu einem noch größeren Bezug an elektrischer Energie (-181 %), bei einer nahezu kompletten Substitution (-5 %) der ausgekoppelten Wärmeleistung führt. Setzt man stattdessen eine Absorptions-Wärmepumpe ein, reduziert sich der Bezug an elektrischer Energie (-111 %), jedoch verkleinert sich der Kompensationsanteil der Wärmeauskopplung und stellt gegenüber dem Ist-Zustand weiterhin eine Reduzierung von -13 % dar.

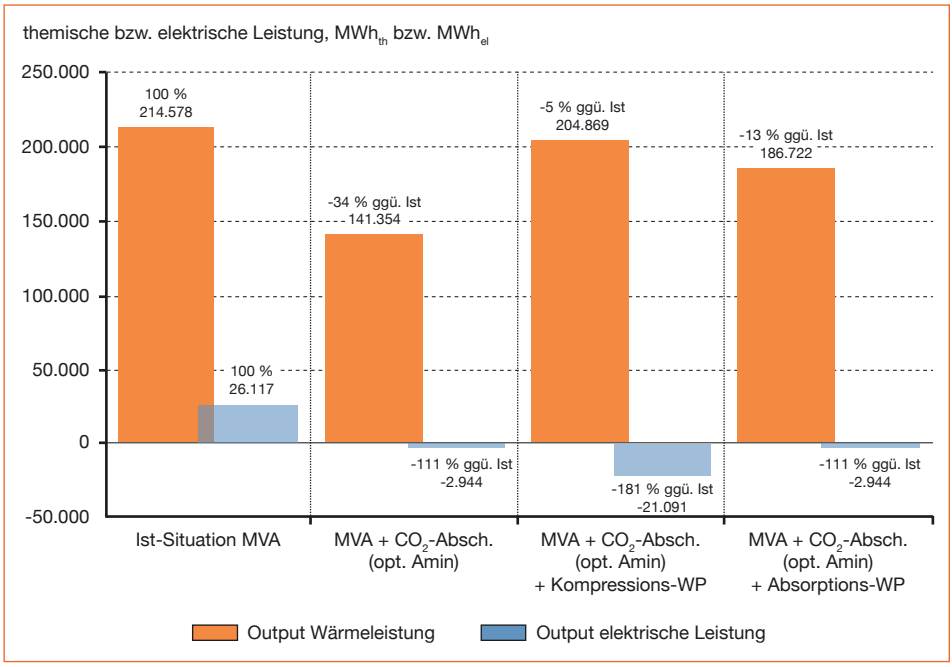


Bild 8: Auswirkungen der CO_2-Abscheidung durch Aminwäsche mit sterisch gehindertem Amin auf den Energieoutput der MVA sowie zusätzlicher Niedertemperaturwärmepumpe (WP)

Das Beispiel zeigt, dass unter Berücksichtigung der Abwärmepotentiale zu Lasten eines höheren elektrischen Stromverbrauchs die thermische Energie, die zum Betrieb der Amin-Wäsche benötigt wird, weitestgehend kompensiert werden kann. Die TAB-Betreiber werden dadurch zum Dauerbeziehern elektrischer Leistung im deutschen Netz.

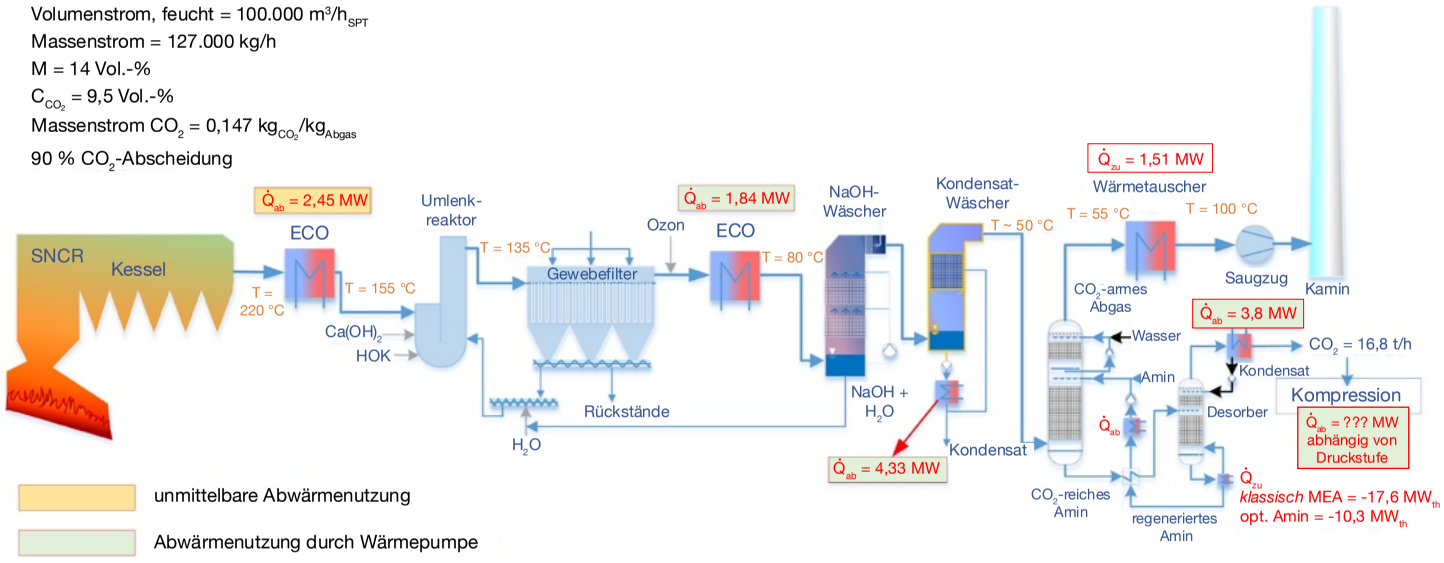


Bild 9: Übersicht zu Möglichkeiten der energetischen Optimierung in der Rauchgasreinigung bei Integration einer CO_2-Abscheidung (Amin-Wäsche)

4. Lösungsansätze für die Integration einer CO_2-Abscheidung

Die Integration von CO_2-Abscheideanlagen in bestehende Systeme erfordert eine im Detail individuell auf den Anlagenstandort der jeweiligen TAB und das gewählte Verfahren abgestimmten Aufbau bzw. Anpassung.

Grundsätzlich ist aber anzustreben, dass die Maßnahmen zur Abscheidung von CO_2 mit möglichen Energieoptimierungen der Gesamtanlage zu synchronisieren ist, um insgesamt die Versorgerrolle der TAB in Bezug auf die bereitgestellte Energie aus Abfallströmen so groß wie möglich zu halten.

Zu dieser energetischen Optimierung zählen vor allem auch Maßnahmen innerhalb des Abgasreinigungsverfahrens. So können durch nachgeschaltete Economizer zusätzliche Wärmemengen aus dem Abgasstrom ausgekoppelt werden, die vom Temperaturniveau häufig für die Einbindung in lokale Fernwärmenetze interessant sein können.

Weitere Niedertemperaturwärmequellen wie z.B. aus der Abgaskonditionierung durch Kondensation, lassen sich mit Hilfe von Wärmepumpen erschließen und zur Fernwärmeeinspeisung nutzen. Dabei kommen vorrangig elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen zum Einsatz, wenn das gewählte CO_2-Abscheideverfahren entsprechende Wärmeleistung benötigt und Niederdruckdampf demnach für einen Wärmepumpenbetrieb nicht zur Verfügung steht.

Ein weiteres Abwärmepotential bietet die CO_2-Verdichtung. Abhängig von der erforderlichen Druckstufe, auf die das CO_2 verdichtet werden muss, ist es hier sogar möglich durch den Einsatz von sogenannten feuchten Hochtemperaturverdichtern die Abwärme auf sehr hohem Temperaturniveau (› 110 °C) bereitzustellen. In diesem Fall würde das CO_2 vor der Verdichtung nicht vom Wasserdampfanteil getrennt, sondern dieser Prozessschritt der Verdichtung nachgeschaltet. Dadurch wäre ein direkter Einsatz der Abwärme z.B. im Bereich der Fernwärmenutzung möglich. Alternativ kann bei einem zunächst wasserfreien CO_2-Strom die Abwärme aus der Verdichtung, die auf einem niedrigeren Temperaturniveau vorliegt, durch Einsatz einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe genutzt werden. Die hier beschriebenen Möglichkeiten der energetischen Optimierung sind in Bild 9 zusammengefasst.

Die Summierung der dargestellten energetischen Optimierungsmaßnahmen aus Bild 9 zeigt, dass bei einer maximalen CO_2-Abscheidung von etwa 90 % die Wärmeleistung, die für den Betrieb der CO_2-Abscheidung mit einem optimierten Amin erforderlich ist, nahezu komplett bereitgestellt werden kann. Bei Einsatz einer klassischen Amin-Wäsche bleibt eine deutliche Lücke zwischen der für die CO_2-Abscheidung benötigten und der zusätzlich aus energetischen Optimierungen bereitgestellten Wärmeleistung.

Eine weitere Möglichkeit, keine Verluste bzw. Reduzierungen der Wärmeauskopplung mit Blick auf die Versorgerrolle der TAB durch eine CO_2-Abscheidung zu erlangen, besteht in einem rein organisatorischen Ansatz. Mit einer Beschränkung des CO_2-Abscheidebetriebes auf die heizarmen Sommermonate, in denen die TAB überschüssigen Mitteldruckdampf (MD-Dampf) verstromen würde, kann dieser MD-Dampf auch für die CO_2-Abscheidung eingesetzt werden, während in den Wintermonaten keine CO_2-Abscheidung erfolgt.

Dieser geteilte CO_2-Abscheidebetrieb reduziert natürlich die Gesamtmenge an abgeschiedenen CO_2, sodass in der Regel bei diesen Konzepten unter Berücksichtigung des spezifischen Wirkungsgrads des Abscheideverfahrens und der Anlagenlaufzeit nur der Fossilanteil der Emissionen abgeschieden werden kann. In diesem Fall entfällt der Vorteil der CO_2-Negativemissionen der TAB. Die Anlagen sind in einem solchen Fall auf den vollen Abgasvolumenstrom auszulegen, was die Gesamtkosten auf die Laufzeit bezogen, im Vergleich zu einem Ganzjahresbetrieb, deutlich steigert.

5. Zusammenfassung und Appell

Von Beginn an und über lange Jahrzehnte wurden die Abfallverbrennungsanlagen mit dem Ziel der sicheren und umweltfreundlichen Abfallentsorgung betrieben. Anfang der 2000er wurde der Begriff der *Thermischen Verwertung und des Recyclings* für die Abfallverbrennung geprägt, nicht zuletzt durch die Wertstoffgewinnung aus den Aschen, aber auch durch die immer weiterfassende Nutzung der bei der Verbrennung freiwerdenden Energie. Dabei lag nie der Fokus auf der Gewinnung elektrischer Energie, da die Dampfparameter keine hohen Wirkungsgrade versprechen. Aber die Nutzung als Wärmeenergie in Form von Prozess- und Fernwärme wurde immer attraktiver. Inzwischen leisten die deutschen TAB mit nahezu 17 % der Gesamtwärmeversorgung einen nicht mehr wegzudenkenden Anteil der kommunalen Wärmeplanung.

Neben der Kalk- und Zementindustrie zählen jedoch die CO_2-Emissionen der Abfallverbrennung zu den unvermeidbaren CO_2-Emissionen. Dadurch entsteht ein Zwang zur CO_2-Abscheidung hinter der Abfallverbrennung. Das politische Steuerungselement ist die Besteuerung der CO_2-Emissionen, die heute (2024) bei 45 EUR pro emittierter Tonne CO_2 liegt. Dieses Besteuerungsniveau rechtfertigt rein betriebswirtschaftlich noch nicht die Installation und den Betrieb eines CO_2-Abscheidesystems, da die Kosten hierfür um ein Vielfaches höher liegen. Das politische Ziel ist es jedoch, die Besteuerung in Zukunft anzuheben, um den Bau von CO_2-Minderungseinrichtungen zu forcieren. Die derzeit auf dem Markt zur Verfügung stehenden Technologien, die eine Investitionssicherheit bezüglich Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bieten, benötigen einen Großteil der bei der TAB anfallenden Energie. Dadurch werden die Betreiber von TAB in das Spannungsfeld getrieben, weiterhin Wärmeenergie bereitzustellen und gleichzeitig einen CO_2-freien bzw. -neutralen Betrieb zu gewährleisten.

Um dieses Geflecht und Spannungsfeld ein wenig zu entzerren, wurden Lösungsansätze aufgezeigt, die aber immer mit einem höheren elektrischen Energiebedarf verbunden sind. Dadurch werden die TAB zwangsläufig zu einem ganzjährigen Verbraucher an elektrischer Energie, die idealerweise klimaneutral aus dem deutschen Stromnetz zur Verfügung gestellt werden muss.

Die Besteuerung sollte jedoch zeitlich so moderat vorgenommen werden, bis die Infrastruktur der CO_2-Nutzung/-Verbringung und der Transport sichergestellt sind. Kein Anlagenbetreiber kann und wird in eine CO_2-Abscheidetechnologie investieren, solange dies nicht geklärt ist. Um Investitionssicherheiten zu schaffen, sollte es von politischer

Seite einen europäischen Masterplan geben, in dem die Rahmenbedingungen für die Umsetzung beschrieben und verabschiedet sind. Darüber hinaus muss auch eine politische Abstimmung zur Kostenverteilung erfolgen, denn diese Zusatzkosten können nicht alleine auf die Abfallentsorgungsgebühren umgelegt werden.

6. Quellen

[1] Clean Air Task Force; https://www.catf.us/ccsmapeurope, Stand 10/2024

[2] Destatis, BDEW; Stand 04/2024

[3] Marxer, D.; VBSA-Fachtagung, Carbon Capture aus Punktquellen mit Fokus auf Kehrrichtverwertungsanlagen, Olten, 06.12.2022.

[4] Wens, B.; 36. VDI-/ITAD-Fachkonferenz Thermische Abfallbehandlung, Würzburg, 09.10.2024.

Ansprechpartner



Professor Dr.-Ing. Rudi H. Karpf
ete.a Ingenieurgesellschaft
für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH
Geschäftsführender Gesellschafter
Hofgut Kolnhausen 12
35423 Lich, Deutschland
+49 6404 658 164
rudi.karpf@ete-a.de



Dipl.-Ing. (TH) Sophie Kreuz
ete.a Ingenieurgesellschaft
für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH
Projektingenieurin
Hofgut Kolnhausen 12
35423 Lich, Deutschland
+49 6404 6680 825
sophie.kreuz@ete-a.de

CO_2 Strategy of a Major Plant Operator

Jörn Jakob

EEW Energy from Waste GmbH has set itself the goal of becoming climate-neutral by 2045. With 17 sites in Germany and neighbouring countries, the company has an incineration capacity of around 5 million tonnes of waste per year. The recycling process generates 2,450,000 megawatt hours of electricity, which corresponds to the needs of around 720,000 households. In addition, 1,000,000 megawatt hours of district heating and around 3,050,000 megawatt hours of process steam are generated every year.

In order to reduce CO_2 emissions, the company is focussing on CO_2 capture technologies. The strategy includes the promotion of corresponding projects and the creation of the necessary economic, legal and infrastructural framework conditions.

The company is pursuing various technological approaches to CO_2 capture, including chemical absorption, in particular amine scrubbing. A mobile test plant for CO_2 capture in container size is to be tested at various locations in order to evaluate the technology under real operating conditions.

It is pursuing a comprehensive strategy for the development and implementation of efficient CO_2 capture technologies. Pilot projects and demonstration plants are a significant part of this strategy. Through the targeted use of these projects, the company is gaining valuable insights into the performance and economic efficiency of CO_2 capture technologies under real operating conditions.

CO_2-Strategie eines großen Anlagenbetreibers

Jörn Jakob

1. Vorstellung und Zielsetzung 19

2. CO_2-Abscheideverfahren 20

2.1. Technologische Routen der CO_2-Abscheidung 20

2.2. Post-Combustion-Verfahren 20

2.3. Aminwäsche 23

3. CO_2-Testanlage mit Kaliumcarbonat 23

4. Mobile Testanlage zur Aminwäsche 24

5. Skalierung und zukünftige Entwicklungen 25

1. Vorstellung und Zielsetzung

Die EEW Energy from Waste GmbH (EEW) hat sich das Ziel gesetzt, bis 2045 klimaneutral zu werden. Mit 17 Standorten in Deutschland und dem benachbarten Ausland verfügt das Unternehmen über eine Verbrennungskapazität von etwa 5 Millionen Tonnen Abfall pro Jahr. Aus der Verwertung werden 2.450.000 Megawattstunden Strom erzeugt, was dem Bedarf von etwa 720.000 Haushalten entspricht. Zusätzlich werden jährlich 1.000.000 Megawattstunden (MWh) Fernwärme erzeugt und etwa 3.050.000 Megawattstunden Prozessdampf, die zur Energieversorgung beitragen. Die thermische Abfallbehandlung ist ein unverzichtbarer Bestandteil der modernen Abfallwirtschaft. Daher ist die Implementierung von CO_2-Abscheidungstechnologien entscheidend.

In der Carbon-Management-Strategie werden die Emissionen aus der thermischen Abfallverwertung als unvermeidbar definiert. Um einen Beitrag zur Reduktion der CO_2-Emissionen zu leisten, muss das Kohlenstoffdioxid folglich abgeschieden werden. Ein möglichst schneller Hochlauf der CO_2-Abscheidetechnologien wird angestrebt. Dies umfasst die Förderung entsprechender Projekte und die Schaffung der notwendigen wirtschaftlichen, rechtlichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen. Ziel ist es, die CO_2-Emissionen so weit wie möglich zu reduzieren und gleichzeitig die thermische Abfallverwertung als wichtigen Bestandteil der klimaneutralen Wirtschaft zu unterstützen.

Um die Ziele der Carbon-Management-Strategie zu erreichen und das eigene Ziel der Unternehmensgruppe, bis spätestens 2045 klimaneutral zu sein, zu verwirklichen, ist eine Abscheidung von etwa 2,5 Millionen Tonnen CO_2 erforderlich, abhängig vom biogenen Anteil. Diese Bilanzierung darf deutschlandweit und auch unternehmensintern erfolgen.

Die Umsetzung dieser ambitionierten Ziele erfordert nicht nur erhebliche finanzielle Investitionen, sondern auch die Bewältigung zahlreicher technischer Herausforderungen. Dazu gehören die Entwicklung und Implementierung fortschrittlicher CO_2-Abscheidetechnologien, die Anpassung bestehender Infrastrukturen und die Sicherstellung der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Diese Maßnahmen sind notwendig, um die CO_2-Emissionen signifikant zu reduzieren und die thermische Abfallverwertung als integralen Bestandteil einer klimaneutralen Energie- und Kreislaufwirtschaft zu etablieren.

2. CO_2-Abscheideverfahren

2.1. Technologische Routen der CO_2-Abscheidung

Die technologischen Routen zur CO_2-Abscheidung umfassen verschiedene Verfahren, die jeweils wiederum unterschiedliche Ansätze zur Abscheidung des Kohlenstoffdioxids verfolgen. In folgende Verfahren kann unterschieden werden:

Post-Combustion: Diese Methode umfasst chemische Absorption, physikalische Absorption, Adsorption, kryogene Verfahren und Membrantechnologien. Ein gängiges Beispiel hierbei stellt die Aminwäsche dar, bei der Amine als Absorptionsmittel verwendet werden.

Pre-Combustion: Hierbei werden Brennstoffe in ein Synthesegas umgewandelt, das hauptsächlich aus CO und H_2 besteht. CO wird dann in CO_2 und H_2 umgewandelt, wobei das CO_2 anschließend abgeschieden wird.

Oxyfuel: Bei diesem Verfahren wird der Brennstoff in reinem Sauerstoff verbrannt, was zu einem Abgasstrom führt, der hauptsächlich aus CO_2 und H_2O besteht. CO_2 kann hierbei durch Kondensation des Wasserdampfs abgeschieden werden.

2.2. Post-Combustion-Verfahren

Das Post-Combustion-Verfahren zur CO_2-Abscheidung ist eine Methode, bei der CO_2 nach der Verbrennung von Brennstoffen aus dem Abgasstrom entfernt wird. Hierbei wird das Abgas durch eine Reihe von Prozessen geleitet, um das CO_2 zu isolieren und zu entfernen. Die wichtigsten Schritte und Technologien, die im Vortrag erwähnt werden, umfassen:

Chemische Absorption: Dies ist die am häufigsten verwendete Methode, bei der das CO_2 durch chemische Reaktionen mit Lösungsmitteln wie Aminen aus dem Abgas entfernt wird. Die Lösungsmittel binden das CO_2 und ermöglichen dessen Abscheidung.

Physikalische Absorption: Hierbei wird das CO_2 durch physikalische Wechselwirkungen mit Lösungsmitteln entfernt, ohne dass chemische Reaktionen erforderlich sind.

Adsorption: Diese Methode nutzt Materialien, die CO_2 an ihrer Oberfläche binden. Es gibt sowohl chemische als auch physikalische Adsorptionsverfahren.

Kryogen: Bei diesem Verfahren wird das CO_2 durch Abkühlung des Abgases auf sehr niedrige Temperaturen abgeschieden, wodurch das CO_2 kondensiert und entfernt werden kann.

Membranverfahren: Diese Methode nutzt spezielle Membranen, die CO_2 selektiv durchlassen und so vom restlichen Abgasstrom trennen.

Das Post-Combustion-Verfahren ist besonders vorteilhaft, da es in bestehenden Anlagen nachgerüstet werden kann und somit keine wesentlichen Änderungen an der Verbrennungstechnologie erforderlich.

2.3. Aminwäsche

EEW verfolgt derzeit eine Vielzahl technischer Ansätze zur CO_2-Abscheidung, wobei der Schwerpunkt auf der chemischen Absorption, insbesondere der Aminwäsche, liegt. Diese Methode hat sich aufgrund ihrer technischen Reife (TRL 8-9) und großtechnischen Verfügbarkeit als besonders vielversprechend erwiesen. Die Methode basiert auf der Verwendung von Aminen, die in wässriger Lösung vorliegen und das Kohlenstoffdioxid chemisch binden können.

In der Praxis wird das Rauchgas zunächst abgekühlt und dann in einen Absorber geleitet. In diesem strömt das Rauchgas von unten nach oben und trifft dabei im Gegenstrom auf das Amin. Das CO_2 im Rauchgas reagiert mit dem Amin und die entstehende Verbindung sammelt sich am Absorberboden. Das CO_2-reiche Amin wird anschließend in einen Desorber geleitet, wo es unter Zugabe von Dampf regeneriert wird. Dabei wird das CO_2 freigesetzt und das Amin kann erneut verwendet werden.

Ein wesentlicher Vorteil der Aminwäsche ist die Fähigkeit, große Mengen CO_2 aus Rauchgasen abzutrennen, die eine relativ geringe Konzentration aufweisen.

Ein bedeutender Nachteil ist der hohe Energiebedarf, insbesondere für die Regeneration des Absorptionsmittels. Dieser hohe Energieverbrauch kann die Betriebskosten erheblich erhöhen und die Energieeffizienz der Anlage verringern. Zudem ist die Anzahl der Lieferanten, die diese Technologie anbieten und bereits Umsetzungserfahrungen haben, begrenzt.

Eine weitere Herausforderung stellt die Inhomogenität des Rauchgases dar, die zu erheblichen Schwierigkeiten führen kann. Diese betreffen insbesondere die Emissionen, die Degeneration der Amine und die Qualität des abgeschiedenen CO_2. Hierbei sei noch mal auf die fehlenden Erfahrungen in der Umsetzung der CO_2-Abscheidung im nachgelagerten Verfahren einer thermischen Abfallverwertungsanlage hingewiesen.

3. CO_2-Testanlage mit Kaliumcarbonat

Aufgrund der Herausforderungen der Aminwäsche und um erste Erfahrungen zu sammeln, hat EEW eine Demonstrationsanlage zur CO_2-Abscheidung mittels Kaliumcarbonat nachgelagert der Abfallverwertung getestet. Diese Anlage ermöglichte es, die technischen, ökologischen und ökonomischen Aspekte der CO_2-Abscheidung zu untersuchen.

Mit der Anlage konnten mit einer Abscheiderate von über 90 % ein bis zwei Tonnen CO_2 pro Tag aus dem Rauchgasstrom der MVA entfernt werden. Obwohl das Verfahren einen ähnlichen Aufbau wie die Aminwäsche besitzt und ebenfalls ein Absorptionsmittel verwendet, gibt es wesentliche Unterschiede im Prozess. Zunächst wird das Rauchgas verdichtet und anschließend mit einer wässrigen Kaliumcarbonatlösung in Kontakt gebracht. In diesem Schritt wird das Kohlenstoffdioxid aus dem Rauchgas durch das Kaliumcarbonat absorbiert.

Der nächste Schritt findet im Desorber statt, in dem die mit CO_2 beladene Kaliumcarbonatlösung entspannt wird. Durch die Druckentspannung sowie der Dampfstrippung

trennt sich das CO_2 vom Absorptionsmittel. Im Vergleich zu der Aminwäsche, ist der thermische Energiebedarf des Verfahrens somit deutlich geringer. Ein weiterer Vorteil der Technologie ist die Möglichkeit der Wärmeauskopplung im Absorber, die die Gesamtwirtschaftlichkeit verbessert.

Der Prozess steht jedoch vor erheblichen Herausforderungen bei der Hochskalierung. Insbesondere die Kompression des gesamten Rauchgases stellt eine große technische Herausforderung dar. Zudem muss die Verfügbarkeit der Anlage gesteigert werden, um eine kontinuierliche und effiziente CO_2-Abscheidung zu gewährleisten.

4. Mobile Testanlage zur Aminwäsche

Aufbauend auf den Erfahrungen mit der Test-Anlage wurde eine mobile Testanlage zur CO_2-Abscheidung in Containergröße bestellt, die an verschiedenen Standorten in Zeiträumen von 6 bis 12 Monaten zum Einsatz kommen soll.

Die Testanlage basiert auf dem Verfahren der Aminwäsche und hat eine Abscheidekapazität von etwa 0,5 Tonnen CO_2 pro Tag. Die Anlage ist modular aufgebaut und verfügt über eine integrierte Gasvorbehandlung. Sie ist darauf ausgelegt, Prozessparameter zu variieren und die Langzeitstabilität sowie den Verbrauch von Aminen zu evaluieren.

Vorteile der mobilen Testanlage

Die Anlage zeichnet sich durch ihre hohe Flexibilität aus, wodurch sie an verschiedenen Standorten betrieben werden kann. Diese Vielseitigkeit ermöglicht es, die Technologie unter unterschiedlichen, teilweise herausfordernden Bedingungen, insbesondere bei variierenden Rauchgasparametern wie Temperatur, Druck, Feuchtigkeit und Schadstoffkonzentrationen, eingehend zu testen und zu bewerten. Durch diese Anpassungsfähigkeit kann die Aminwäsche-Technologie optimal an die spezifischen Anforderungen und Besonderheiten jedes einzelnen Standortes angepasst werden. Für ihre erfolgreiche Implementierung und Weiterentwicklung ist dies von entscheidender Relevanz.

Der Betrieb der Anlage an den Unternehmensstandorten liefert darüber hinaus wertvolle Praxiserfahrungen im Umgang mit der Technologie. Diese Erfahrungen bieten wichtige Einblicke in die Handhabung und das Verhalten der Aminwäsche unter realen Betriebsbedingungen. So entsteht eine fundierte Wissensbasis, die es ermöglicht, die Effizienz und Effektivität der Anlage zu steigern und kontinuierlich Verbesserungen vorzunehmen. Zudem trägt es zur internen Kompetenzentwicklung bei, da das Know-how im Umgang mit komplexen Gaswäschesystemen und deren technologischen Anforderungen erweitert wird.

Zusätzlich bietet die Anlage zahlreiche Möglichkeiten zur Schulung und Weiterbildung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vor Ort. Durch gezielte Trainings und praxisnahe Schulungen wird das Wissen über die Technologie nachhaltig gestärkt, was die Betriebssicherheit erhöht und den effizienten Umgang mit der Anlage gewährleistet. Diese Schulungen sind ebenfalls eine Gelegenheit, eng mit Aminlieferanten und Technologieanbietern zusammenzuarbeiten. Die enge Kooperation fördert den Wissenstransfer und ermöglicht die kontinuierliche Verbesserung der eingesetzten Materialien und Technologien.

Die Zusammenarbeit wird zusätzlich durch die Möglichkeit ergänzt, Erfahrungen und gewonnene Erkenntnisse direkt mit zuständigen Behörden zu teilen. Ein regelmäßiger Austausch unterstützt dabei, mögliche Genehmigungsrisiken frühzeitig zu erkennen und zu minimieren. So kann das Unternehmen von einem reibungsloseren Genehmigungsprozess profitieren, was die Implementierung der Technologie beschleunigen und vereinfachen kann.

5. Skalierung und zukünftige Entwicklungen

Die EEW verfolgt eine umfassende Strategie zur Entwicklung und Implementierung effizienter CO_2-Abscheidungstechnologien. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Strategie sind Pilotprojekte und Demonstrationsanlagen. Durch den gezielten Einsatz dieser Projekte gewinnt das Unternehmen wertvolle Einblicke in die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der CO_2-Abscheidungstechnologien unter realen Betriebsbedingungen. Die Anlagen dienen nicht nur der technischen Validierung, sondern bieten auch eine Grundlage, um das Know-how für die großtechnische Umsetzung der CO_2-Abscheidung zu entwickeln und zu verfeinern.

Ein weiterer Schwerpunkt der Strategie liegt auf dem Einsatz modularer Anlagen. Diese modular aufgebauten Systeme ermöglichen eine flexible und skalierbare Implementierung, die je nach Bedarf an verschiedenen Standorten realisiert und erweitert werden kann. Die Bauweise bietet die Möglichkeit, auf spezifische Anforderungen jedes Standorts einzugehen und die CO_2-Abscheidungstechnologie schrittweise auszubauen. So können die Anpassungsfähigkeit und Effizienz der Lösung erheblich gesteigert werden.

Darüber hinaus setzt das Unternehmen auf langfristige Partnerschaften mit Forschungseinrichtungen, Technologieanbietern und Industriepartnern. Diese Kooperationen ermöglichen es, die eingesetzten Technologien fortlaufend weiterzuentwickeln und an die neuesten wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisse anzupassen. Der kontinuierliche Austausch und die enge Zusammenarbeit fördern nicht nur Innovationen, sondern auch eine rasche Umsetzung neuer Erkenntnisse in die Praxis.

Um die Umsetzung dieser umfassenden Strategie zu unterstützen, sind gezielt nationale und europäische Förderprogramme notwendig, um die Entwicklung und Implementierung der CO_2-Abscheidungstechnologien voranzutreiben.

Ansprechpartner



Jörn Jakob
EEW Energy from Waste GmbH
Leiter Innovation/Projektentwicklung
Schöninger Str. 2-3
38350 Helmstedt, Deutschland
+49 160 126196 1
joern.jakob@eew-energyfromwaste.com

Abstract

Carbon Capture at Waste-to-Energy Plants: Technical Options, Economic Assessment and Greenhouse Gas Balance

Wolfram Dietz, Roland Schipf and Wolfgang Rommel

In order to stop global warming, a reduction of anthropogenic greenhouse gas emissions ultimately to net zero is essential. Even if all available reduction options are vigorously pursued, unavoidable residual fossil emissions will remain in some sectors. The waste sector is one of these sectors. The article addresses the technical options of CO_2 capture, the competition for the use of available heat and the economic and greenhouse gas effects.

Among the CO_2 separation technologies under consideration, amine scrubbing is the most advanced and commercially available. Other promising technologies such as potassium carbonate absorption, membrane separation and cryogenic processes are under development. Oxyfuel-based concepts may also be an option in the future.

The advantages of amine scrubbing technology are the good separation rate and its suitability even at low CO_2 partial pressures. Disadvantages include the steam requirement, the degradation of the sorbent, the toxicity and potential environmental impact of the sorbent and conversion products and the corrosion potential. Further developments are to be encouraged. The technology is currently in operation at two waste incineration plants in Europe. A customised heat integration is recommended for realisation projects.

If steam is required to operate a CO_2 capture system, usage competition can ensue. A load profile analysis is used to quantify the steam requirements of an amine scrubbing stage over time and the heat amounts that are still available for external purposes, in particular district heating. A model plant is used to illustrate this.

The economic effects of implementing an amine scrubbing stage are modelled. Under the conditions specified, the use of CCS or CCU is disadvantageous. Modified input parameters, however, could lead to an economic advantage.

An assessment of greenhouse gas emissions for the CCS case shows a significant improvement in the greenhouse gas balance and even negative emissions. With CCS, the waste incineration plant becomes a CO_2 sink.

Autorenverzeichnis

Baumann, Werner 603
Bergfeldt, Britta 559
Biermann, Joep 423
Brand, Tobias 473
Brell, Joos 405
Briese, Dirk 489
Buddenberg, Torsten 43
Degenhardt, Valerie 375
Dietz, Wolfram 27
Dreising, Tristan 559
Dubost, Camille 161
Eggen, Sigvart 581
Ellerkmann, Andreas 125
Engel, Waltraud 353
Filiz, Dina 521
Franck, Jörn 259
Garbev, Krassimir 603
Gehrmann, Hans-Joachim 559, 603
Georg, Sebastian 331
Geragthy, Matthew 81
Gierend, Christian 331
Grabe, Matthias 195
Grote, Florian 521
Grünewald, Tim 173
Haider, Ferdinand 423
Haupts, Christian 589
Häuser, Hendrik 441
Hauser, Manuela 603
Hennig, Malte 559
Hölzer, Kim Philipp 365

Huschka, Holger 148
Jakob, Jörn 19
Kaiser, Sven 473
Kaphahn, Isabel 631
Karpf, Rudi H. 3
Keune, Rainer 441
Kiene, Stefan 353
Klatte, Markus 571
Kraus, Timo 365
Krause, Wolfgang 173
Kreuz, Sophie 3
Krüger, Burkhard 503
Krüll, Ferdinand 503
Kühnbach, Stefan 521
Kumm, Susanne 353
Kummer, Ruedi 235
Lach, Christian 381
Lehmann, Eckhard 503
Lemke, Andreas 183
Lichtinger, Andreas 405
Litau, David 489
Loose, Florian 617
Mahl, Jonathan 603
Martin, Ulrich 375
Matthies, Kerstin 235
Merz, Daniela 603
Mollet, Léonie S. 209
Müller, Markus 405
Nachtsheim, Frank 315
Odenthal, Daniel 571

Pentz, Sebastian 423
Pöschko-Reinweber, Marieluise 145
Probst, Matthias 353
Quartier, Robin 140
Quicker, Peter 535, 631
Reeves, Anna 559
Reinmann, Jürgen 463
Rezania, Rusbeh 148
Richter, Frank 559
Riegel, Fabian 405
Ripatti, Juha 161
Rommel, Wolfgang 27
Scheithauer, Tobias 249
Schipf, Roland 27
Schlögel, Kai 631
Schneider, Dominik 405
Schneider, Mareike 81
Schneider, Uwe 331
Scholz, Steffen 289
Schütz, Jochen 275
Seitz, Mathias 535
Spliethoff, Bernd 389
Stadelmann, Caroline Alexandra 209
Stapf, Dieter 559, 603
Stark, Kirsten 631
Stauffenberg, Tim 183
Stefen, Inès 97
Stooß, Andrea 81
Straczewski, Grazyna 559
Tavakkol, Salar 559

Tharaldsen, Thomas 381
Theissen, Robert 219
Tomasi Morgano, Marco 571
Treder, Martin 109
Treubel, Jochen 473
Tulleken, Bob 381
Vogel, Julia 547
von Kories, Jürgen 259
von Raven, Robert 315
Warnecke, Ragnar 61
Wenk, Torsten 209
Wexler, Manuela 603
Zganiatz, Joel 365
Ziemann-Nöthe, Annette 503

Inserentenverzeichnis

Förderer

BSR

DOOSAN Lentjes

eew Energy from Waste

EnergieLink PLANT ENGINEERING & SOLUTIONS

INDAVER

Kanadevia INOVA

MARTIN

POWER Service Solutions

online cleaning technologies

HOK ACTIVATED LIGNITE

JFE Engineering Group Standardkessel Baumgarte JFE

tbfpartner

UHLIG WEL-COR | Boiler Solutions

Wir danken den Inserenten



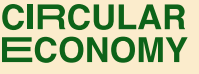










































































Bang&Clean Technologies AG

S. 239, 427

Bünzweg 15
5408 Othmarsingen, Schweiz
+41 56 46464 31
info@bang-clean.ch
www.bang-clean.ch

Brantner Digital Solutions GmbH

S. 334

Dr. Franz-Wilhelm-Straße 2a
3500 Krems an der Donau, Österreich
+43 59 444
office.waste@brantner.com
www.brantner.com

Berliner Stadtreinigungsbetriebe AöR

S. 6, 103

Ringbahnstraße 96
12103 Berlin, Deutschland
+49 30 7592 4900
service@bsr.de
www.bsr.de

Budak GmbH

S. 411

Otto Hahn Straße 7
50181 Bedburg, Deutschland
+49 2272 904 980
info@budak-gruppe.de
www.budak-gruppe.de

CheMin GmbH

S. 320, 410

Am Mittleren Moos 46 a
86167 Augsburg, Deutschland
+49 821 74839 30
info@chemin.de
www.chemin.de



DEKOMTE de Temple Kompensator-Technik GmbH S. 327

Walinusstraße 13
63500 Seligenstadt, Deutschland
+49 6182 21014
info@dekomte.com
www.dekomte.com



Deutscher Fachverlag GmbH | CIRCULAR ECONOMY S. 580

Mainzer Landstraße 251
60326 Frankfurt am Main, Deutschland
+49 69 7595 01
heidrun.dangl@dfv.de
www.dfv.de



Doosan Lentjes GmbH S. 31, 511

Daniel-Goldbach-Straße 19
40880 Ratingen, Deutschland
+49 2102 166 0
dl.info@doosan.com
www.doosanlentjes.com



Dornier Group GmbH S. 102, 208

Zimmerstraße 67/69
10117 Berlin, Deutschland
+49 30 253991 0
info@dornier-group.com
www.dornier-group.com



EEW Energy from Waste GmbH S. 22, 112

Schöninger Straße 2 – 3
38350 Helmstedt, Deutschland
+49 5351 18 0
info@eew-energyfromwaste.com
www.eew-energyfromwaste.com

EnergieLink GmbH S. 30, 142

Riedstrasse 6
8953 Dietikon, Schweiz
+41 56 51103 33
info@energielink.ch
www.energielink.ch

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG S. 527

Genthiner Straße 30 G
10785 Berlin, Deutschland
+49 30 250085 0
ESV@ESVmedien.de
www.muellundabfall.de

Explosion Power GmbH S. 321, 417

Niederlenzer Kirchweg 4
5600 Lenzburg, Schweiz
+41 79 78801 44
info@explosionpower.ch
www.explosionpower.ch

GABO IDM mbH S. 281, 335

Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen, Deutschland
+49 9131 873 50
vertrieb@gabo-idm.de
www.gabo-idm.de

Häuser & Co GmbH S. 284, 450

Vohwinkelstraße 107
47137 Duisburg, Deutschland
+49 203 606669 63
info@haeuser-co.de
www.haeuser-co.de

Indaver Deutschland GmbH

S. 87, 128

Waldstraße 11
64584 Biebesheim am Rhein, Deutschland
+49 6258 895 0
info@indaver.de
www.indaver.com/de

intelligentplant Engineering GmbH

S. 226, 308

Am Römerbrunnen 1
82229 Seefeld, Deutschland
+49 8152 39588 90
info@intelligentplant.de
www.intelligentplant.de

Iqony GmbH

S. 36, 285

Rüttenscheider Straße 1 – 3
45128 Essen, Deutschland
+49 201 801 01
info@iqony.energy
www.iqony.de

Kanadevia INOVA

S. 86, 238

Hardturmstrasse 127
8005 Zürich, Schweiz
+49 41 44277 1111
info@kanadevia-inova.com
www.kanadevia-inova.com

Lab GmbH

S. 94, 295

Hedelfinger Straße 137
70329 Stuttgart, Deutschland
+49 711 222 4935 0
lab@lab.fr
www.lab.fr/de

MARTIN GmbH
für Umwelt- und Energietechnik S. 294, 384

Leopoldstraße 246
80807 München, Deutschland
+49 89 35617 0
mail@martingmbh.de
www.martingmbh.de

Meeraner Dampfkesselbau GmbH S. 53, 251

Zwickauer Straße 94 – 98
08393 Meerane, Deutschland
+49 3764 53 0
info@mdkb.de
www.mdkb.de

Mokesa AG S. 242, 416

Freulerstrasse 10
4127 Birsfelden, Schweiz
+41 61 31999 70
info@mokesa.ch
www.mokesa.ch

MSV Mediaservice & Verlag GmbH | EU Recycling S. 588

Gottlieb-Haug-Straße 2
89143 Blaubeuren, Deutschland
+49 7344 9280 320
info@msvgmbh.eu
www.eu-recycling.com

MVV Umwelt GmbH S. 37, 113

Otto-Hahn-Strasse 1
68169 Mannheim, Deutschland
+49 621 290 4601
tina.mauer@mvv.de
www.mvv.de

Online Cleaning Technologies GmbH S. 326, 426

Leichtmetallstraße 16
42781 Haan, Deutschland
+49 2104 2889 52
info@online-cleaning.de
www.online-cleaning.de

Power Service Solutions GmbH S. 52, 222

Schifferstraße 80
47059 Duisburg, Deutschland
+49 203 8038 0
infobox@eumhi.com
power.mhi.com/regions/emea/

P-WAVE AG S. 309, 451

Gotthardstrasse 3
5630 Muri, Schweiz
+41 56 611 98 18
hello@p-wave.ch
www.p-wave.ch

REICON Wärmetechnik und Wasserchemie Leipzig GmbH S. 434

Lagerhofstraße 2
04103 Leipzig, Deutschland
+49 341 64912 0
info@reicon.de
www.reicon.de

RHOMBOS-VERLAG Bernhard Reiser S. 502

Postfach 670217
10207 Berlin, Deutschland
+49 30 2619461
verlag@rhombos.de
www.rhombos.de

Rheinbraun Brennstoff GmbH

S. 461, 526

Ludwigstraße
50226 Frechen, Deutschland
+49 2234 109 25020
hok@rwe.com
www.hok.de

Standardkessel Baumgarte Holding GmbH

S. 23, 395

Wissollstraße 19
45478 Mülheim an der Ruhr, Deutschland
+49 208 20768 0
info@sb-group.com
www.sb-group.com

TBF + Partner AG

S. 95, 223

Alsterarkaden 9
20354 Hamburg, Deutschland
+49 40 696 324330
tbfhh@tbf.ch
www.tbf.ch

TUBE-TEC Rohrverformungstechnik GmbH

S. 420

Hirtscheider Straße 13 –15
57647 Nistertal, Deutschland
+49 2661 9591 0
info@tube-tec.de
www.tube-tec.de

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51
16816 Nietwerder, Deutschland
+49 3391 4545 0
tkverlag@vivis.de
https://vivis.de

Uhlig Wel-Cor GmbH

S. 280, 403

lnnerstetal 16
38685 Langelsheim, Deutschland
+49 5326 501 0
info@uhlig.eu
www.uhlig.eu

Valmet GmbH

S. 80, 164

Marienburgstraße 35
64297 Darmstadt, Deutschland
+49 6151 7377 0
valmet.germany@valmet.com
www.valmet.com

VENTURO Ingenieurgesellschaft mbH

S. 192, 349

Curtiusstraße 15
12205 Berlin, Deutschland
+49 30 79781828
kontakt@venturo.de
www.venturo.de

Verlag 320°

S. 243

Brienner Straße 45 a-d
80333 München, Deutschland
+49 89 41325709
info@320grad.de
www.320grad.de