

**POSITIONSPAPIER**

# Abfallverbrennung in der Zukunft

Positionspapier der ProcessNet-Fachgruppe  
„Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“



# Impressum

## **Autoren:**

Prof. Michael Beckmann, TU Dresden

Dipl.-Ing. Philipp Danz, b&d Energie- und Umwelttechnik GmbH

Prof. Rüdiger Deike, Universität Duisburg-Essen

Prof. Christina Dornack, TU Dresden

Dr. Hans-Joachim Gehrman, KIT

Dipl.-Ing. Markus Gleis, Umweltbundesamt

Dr. Karl Hölemann, BASF SE

Prof. Rudi Karpf, ete.a Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH

Dr.-Ing. Christoph Pieper, TU Dresden

Prof. Peter Quicker, RWTH Aachen

Dipl.-Ing. Robert von Raven, VON RAVEN Ingenieurgesellschaft für Energie und Umweltverfahrenstechnik & Beratung mbH

Prof. Helmut Seifert, KIT

Dr. Franz-Georg Simon, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Die Autoren und Autorinnen möchten allen beteiligten Kollegen und Kolleginnen, die an diesem Papier mitgewirkt haben, recht herzlich danken.

## **Herausgeber**

ProcessNet-Fachgruppe „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“

## **Verantwortlich im Sinne des Presserechts**

DECHEMA e.V.

Dr. Kathrin Rübberdt

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Februar 2022

## **Bildnachweise**

Titel: MVA Rüdersdorf (© STEAG GmbH)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Executive Summary</b>	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>1 Abfallströme, gesetzliche und energiepolitische Rahmenbedingungen und Perspektiven</b>	<b>6</b>
1.1 Einleitung	6
1.2 Abfallströme	6
1.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU	8
1.4 Energiepolitische Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU	10
1.4.1 Allgemeines	10
1.4.2 Stand der Verfahrenstechnik und Bilanzierung im Allgemeinen	11
1.4.3 Wandel der Rahmenbedingungen	11
1.5 Entwicklungsmöglichkeiten – Szenarien zur Weiterentwicklung	12
1.5.1 Stärkung der Verbundwirtschaft und Modernisierung (Retrofits)	12
1.5.2 MHKW als Regelungseinheiten	13
1.6 Digitalisierung als Schlüsseltechnologie	14
1.6.1 Triebfeder der Digitalisierung in MHKW	14
1.6.2 Bestandsaufnahme aktueller Bestrebungen	15
1.6.3 Erfordernisse hinsichtlich der Hardware (Sensorik)	15
1.6.4 Roadmap für den Bereich Software	15
1.7 Fazit	16
<b>2 Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Thermische Hauptverfahren</b>	<b>17</b>
2.1 Einleitung	17
2.2 Verfahren und Anlagentechnik – Stand der Technik und Entwicklungspotenzial	17
2.2.1 Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren mit Rostsystemen	18
2.2.2 Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren mit Wirbelschichtsystemen	19
2.2.3 Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren mit Entwicklungspotential	19
2.3 In Entwicklung befindliche Verfahren für die thermische Abfallbehandlung	22
2.3.1 Pyrolyse	22
2.3.2 Vergasung	24
2.3.3 Plasmaverfahren	25
2.3.4 Verflüssigungsverfahren	25
2.3.5 Schlussfolgerung	26
2.4 Ausblick	27
<b>3 Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Abgasreinigung</b>	<b>28</b>
3.1 Einleitung	28
3.2 Überblick	28
3.3 Zukünftige Herausforderungen an Abgasreinigungsanlagen	31
3.4 Zusammenfassung	34
<b>4 Wertstoffrückgewinnung</b>	<b>35</b>
4.1 Einleitung	35
4.2 Wertstoffrückgewinnung aus Rostaschen	35
4.3 Rückgewinnung von Phosphor aus Aschen der Klärschlammverbrennung	39
4.4 Zusammenfassung	40
<b>5 Literatur</b>	<b>41</b>

## Executive Summary

Eine an einer zirkulären Wirtschaft orientierte Gesellschaft, welche mit Blick auf Maßnahmen gegen den Klimawandel und die begrenzte Verfügbarkeit von Rohstoffen ein wichtiges und erklärtes Ziel der Europäischen Kommission ist, wird ohne die thermische Abfallbehandlung nicht möglich sein.

Anstrengungen, um beispielsweise durch Änderungen bei der Materialauswahl oder dem Design der Produkte den Mehrweganteil zu steigern und die Wiederverwendbarkeit sowie die Zerlegbarkeit zu optimieren, sind notwendig. Sie tragen dazu bei, das Recycling der Produkte nachhaltig zu verbessern und somit den stofflich verwertbaren Anteil im Siedlungsabfall zu erhöhen. Gleichzeitig wird es auch zukünftig Abfallströme und Reststoffe geben, für welche eine stoffliche Kreislaufführung aus technischen, ökonomischen oder ökologischen Gründen nicht möglich ist.

Hier leistet die thermische Abfallbehandlung in einer zirkulären Wirtschaft einen wichtigen Beitrag, um mit etablierten thermischen Verfahren wirtschaftlich und emissionsarm die Lücke zwischen (direkter) stofflicher Verwertung, chemischem Recycling sowie dem Rohstoff- und Energiebedarf der Industrie zu schließen.

Die thermische Abfallbehandlung sorgt bereits heute in Form der Abfall- und Klärschlammverbrennungsanlagen gleichzeitig für:

- » eine sichere und nachhaltige Elimination von Umweltschadstoffen, z.B. POP<sup>1</sup>, aus dem angelieferten Abfall
- » einen aktiven Gesundheitsschutz, u.a. im Sinne der Hygienisierung, insbesondere bei zunehmender Urbanisierung und den steigenden Ansprüchen an eine umfassende Daseinsvorsorge (Siedlungsabfallhygiene)
- » die Vorbereitung zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus bis dahin nicht verwertbaren Fraktionen
- » kostengünstige und emissionsarme Wärme- oder Kältebereitstellung
- » Nutzung und Bereitstellung klimafreundlichen Stroms aus Reststoffen, die (aktuell) nicht stofflich verwertet werden können.

Schon jetzt ist die thermische Abfallbehandlung ein wichtiger Bestandteil zur Erreichung der Ziele des Green Deal der EU. Durch konsequente Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung wird sie in den nächsten Jahren, zusätzlich zur Bereitstellung von Energie und Wertstoffen, durch Kombination mit

- » weiter reduzierten Emissionswerten,
- » Kraft-Wärme-Kopplung,
- » CO<sub>2</sub>-Abscheidung,
- » Methanolsynthese (in Verbindung mit grünem Wasserstoff)

eine Kohlenstoffquelle der Zukunft sein. Sie wird somit dazu beitragen, auf primär fossile Kohlenstoffquellen schrittweise zu verzichten und Grundstoffe bereitzustellen für einen möglichst vollständig geschlossenen Rohstoffkreislauf.

Aus Abfall wird Rohstoff, aus „thermischer Abfallbehandlung“ wird „thermische Rohstoffgewinnung, welche

- » eine verringerte Abhängigkeit von (fossilen) Rohstoffen und deren Förderländern,
- » CO<sub>2</sub>-Neutralität,
- » eine nachhaltige Produktion und Industrie

ermöglicht und somit dazu beiträgt, auch zukünftig die Gesundheit, die Wirtschaftskraft und den heutigen Lebensstandard unserer Gesellschaft zu sichern.

<sup>1</sup> POP: Persistent Organic Pollutants

## Zusammenfassung

Für viele Materialien haben sich Kreisläufe etabliert, beispielsweise für Papier, Glas und zahlreiche Metalle. Dennoch verbleiben auch hier Reststoffe, die mit dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht weiter einer unmittelbaren stofflichen Nutzung zugeführt werden können. Im Zusammenhang mit dem Stoffkreislauf muss auch der Energiebedarf gesehen werden. Energie wird sowohl für Herstellungs- als auch für Rückgewinnungsprozesse benötigt.

Im Sinne der zirkulären Wirtschaft gehören Stoff und Energie untrennbar zusammen. Ziel muss es dabei sein, den Energiebedarf für die Herstellung und Rückgewinnung klimaneutral bereitzustellen. Es ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft die thermische Abfallbehandlung sowie weitere chemische, physikalische und biologische Verfahren je nach Komplexität der zu behandelnden Stoffströme entweder einzeln oder in Kombination für die Wertstoffrückgewinnung zum Einsatz kommen werden.

Die thermische Abfallbehandlung erfüllt in diesem Zusammenspiel gleich mehrere Aufgaben. Sie ist

- » die Umwandlungsstufe für die Zerstörung von umweltgefährdenden Stoffen unter Ausnutzung vorhandener Potenziale (Energiegewinnung, Wertstoffgewinnung),
- » das Verfahren zum Ausschleusen von Schadstoffen aus dem Stoffkreislauf
- » das Bindeglied zwischen Stoffumwandlungen und Energie.

Die ProcessNet-Fachgruppe „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“ (AuW) sieht sich seit ihrer Gründung dem Prinzip eines nachhaltigen Ressourcenschutzes verpflichtet. Ziel des vorliegenden Positionspapiers „Abfallverbrennung in der Zukunft“ ist es, frei von ökonomischen Interessen eine sachlich fundierte Basis zu schaffen für die im Zusammenhang mit dem Schlagwort „Circular economy“ anstehende Diskussion um die künftige Rolle der thermischen Abfallbehandlung.

Das Positionspapier widmet sich mit aktuellen Beiträgen detailliert folgenden Themen:

- » Abfallströme, gesetzliche und energiepolitische Rahmenbedingungen und Perspektiven
- » Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Thermische Hauptverfahren
- » Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Abgasreinigung
- » Wertstoffrückgewinnung

# 1 Abfallströme, gesetzliche und energiepolitische Rahmenbedingungen und Perspektiven

## 1.1 Einleitung

Das Prinzip der Nachhaltigkeit gilt heute als Handlungsprinzip für die Ressourcennutzung, die Stabilität und Regenerationsfähigkeit unseres Ökosystems sowie auch sozialer und gesellschaftlicher Prozesse. Für viele Materialien haben sich Kreisläufe etabliert, bspw. für Papier, Glas und zahlreiche Metalle. Dennoch verbleiben auch hier Reststoffe, die mit dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht weiter einer unmittelbaren stofflichen Nutzung zugeführt werden können.

Im Zusammenhang mit dem Stoffkreislauf muss auch der Energiebedarf gesehen werden. Energie wird sowohl für Herstellungs- als auch Rückgewinnungsprozesse benötigt. Im Sinne der zirkulären Wirtschaft gehören Stoff und Energie untrennbar zusammen. Ziel muss es dabei sein, den Energiebedarf für die Herstellung und Rückgewinnung klimaneutral bereitzustellen.

Die thermische Abfallbehandlung muss sich den jeweils anfallenden Stoffströmen und den energiepolitischen Rahmenbedingungen entsprechend anpassen und weiterentwickeln. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen flankieren den Prozess. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz

(KrWG) ist hierbei maßgebend für die Einstufung der Abfallverbrennung in den abfallwirtschaftlichen Kontext.

In den nachfolgenden Kapiteln werden daher ausgehend vom aktuellen Stand des Abfallaufkommens die gesetzlichen und die energiepolitischen Rahmenbedingungen sowie damit zusammenhängend das Entwicklungspotenzial skizziert.

## 1.2 Abfallströme

Eine vollständige Bilanzierung der in Deutschland anfallenden Abfallmengen ist nicht möglich, da statistisch nur andienungspflichtige Abfälle erfasst werden. Die Abschätzung der Gesamtmenge kann nur erfolgen, wenn die verfügbaren Informationen zu den vorhandenen Anlagenkapazitäten mit Daten zur Anlagenauslastung und zum Verbleib der erzeugten Stoffströme abgeglichen werden.

Ausgehend von den statistisch erfassten kommunalen Abfallmengen wurden in der Studie „Energieerzeugung aus Abfällen – Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030“ [1] unter Berücksichtigung der Importmengen sowie anderer bekannter Mengen (z.B. gefährliche Abfälle, mitverbrannter Klärschlamm etc.) die wenig öffentlich

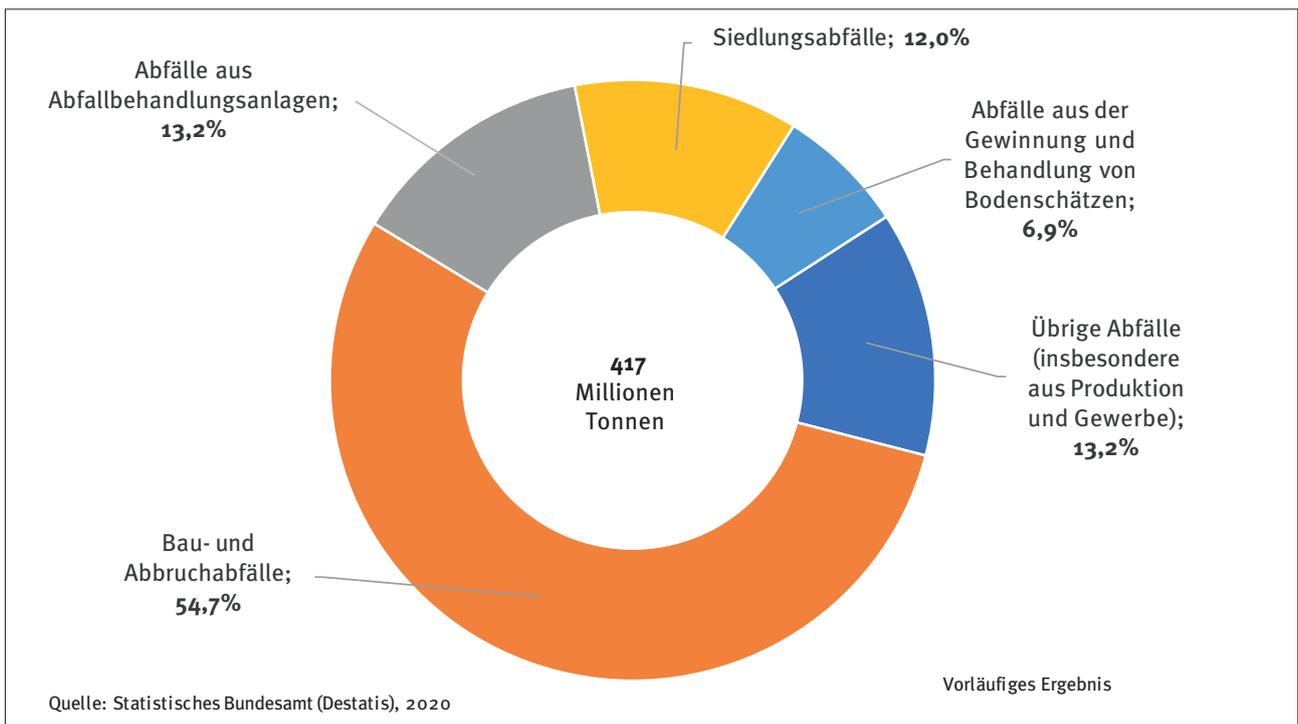


Abbildung 1: Abfallaufkommen 2018 in Deutschland

dokumentierten Abfallmengen aus Industrie und Gewerbe quantifiziert, die im Anlagenpark einer energetischen Verwertung zugeführt wurden.

Die Gesamtenergie (Strom, Wärme und Dampf), die von deutschen Abfallbehandlungsanlagen im Jahr 2015 bereitgestellt wurde, sowie die in der jeweiligen Anlagenkategorie behandelten Abfallmengen sind in Tabelle 1 dargestellt. Jährlich werden mehr als 570 PJ Brennstoffenergie, die aus rund 50 Mio. t Abfall in deutschen Abfallbehandlungsanlagen und Anlagen der Grundstoffindustrie und Energietechnik gewonnen werden, energetisch verwertet. Dies entspricht etwa 4,3 % des deutschen Primärenergiebedarfs. Insgesamt werden fast 320 PJ/a Endenergie bereitgestellt, rund 225 PJ/a Wärme und 90 PJ/a Strom. Daraus ergibt sich ein Anteil der abfallbasierten Energie in Deutschland von rund 3,7 % am Endenergiebedarf.

Den größten Anteil an der deutschen Energieversorgung aus Abfall haben die Siedlungsabfall-Verbrennungsanlagen (MVA), die rund ein Drittel der gesamten Energie aus Abfall liefern. Zusammen mit den Ersatzbrennstoff (EBS)-Kraftwerken steigt dieser Anteil auf fast 50 %. Auch Industriekraftwerke (Anlagen, die in erster Linie Reststoffe und Abfälle aus der Produktion einsetzen und dadurch gleichzeitig eine Versorgungsfunktion für das Unternehmen erfüllen) leisten einen wesentlichen Beitrag zur

Energieversorgung aus Abfällen, wobei die Datenlage in diesem Bereich jedoch sehr unzureichend ist.

Die Rolle der Zementwerke ist bemerkenswert. Trotz der relativ geringen Inputmengen von rund 3,2 Mio. t/a Abfall kann hier ein wesentlicher Beitrag zur Substitution fossiler Brennstoffe geleistet werden. Dies liegt daran, dass der Energiegehalt der Brennstoffe weitgehend direkt und (abgesehen von den Verlusten der Wärmeabstrahlung) ohne Verluste im Klinkerbrennprozess genutzt werden kann.

Darüber hinaus ist der Energiebeitrag der Verbrennung gefährlicher Abfälle trotz eines Durchsatzes von nur 1,3 Mio. t/a relativ hoch. Die meisten Anlagen exportieren Dampf an nahe gelegene (industrielle) Verbraucher und haben daher nur geringe Wirkungsgradverluste.

Der Beitrag biologischer Prozesse, d.h. der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) und der Bioabfallvergärung (Energieoutput von 5,85 PJ/a), ist relativ gering (< 6 PJ/a). Dies gilt mit ca. 0,6 PJ Gesamtenergie Output auch für MBA-Anlagen mit Gärstufe.

Es werden jährlich insgesamt gut 4 Mio. t Abfall in MBA-Anlagen behandelt, in MBA-Anlagen mit Vergärungsstufe etwa ein Drittel, also knapp 1,5 Mio. t. Der Gasertrag, bezogen auf den Anlageeintrag, dürfte jedoch deutlich

**Tabelle 1: Energie aus Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland im Jahr 2015 [1]**

	INPUT		ENERGIE OUTPUT			NUTZUNGSGRAD				
	Masse [t/a]	Energie [PJ/a]	Gesamt [PJ/a]	Wärme [PJ/a]	Strom [PJ/a]	n <sub>ges</sub>		n <sub>el</sub>		
						Brutto	Netto	Brutto	Netto	
<b>MVA</b>	20 005 469	205,05	109,53	79,77	29,76	53,4 %	44,6 %	14,5 %	11,1 %	
<b>EBS Kraftwerk</b>	5 714 042	69,79	44,37	31,96	12,42	63,6 %	60,1 %	17,8 %	14,7 %	
<b>Sonderabfall Verbrennung</b>	1 333 816	21,92	14,21	13,78	0,43	64,9 %	56,6 %	<sup>2)</sup>	<sup>2)</sup>	
<b>Altholzkraftwerk</b>	6 579 671	85,78	35,39	12,84	22,55	41,3 %				
<b>Klärschlamm Verbrennung</b>	957 932	<sup>1)</sup> 37,12	<sup>3)</sup> 0	0	0					
<b>Zementwerke</b>	3 222 000	59,40	41,58	41,58	0	70,0 %				
<b>Kohlekraftwerke</b>	1 509 407	11,41	6,05	2,28	3,76	53,0 %		33 %		
<b>Industrie Kraftwerke</b>	6 100 000	82,95	62,21	41,47	20,74	75,0 %		25 %		
<b>Bioabfallvergärung</b>	3 643 093		5,85	2,92	2,92					
<b>MBA (Vergärung)</b>	4 375 620	<sup>4)</sup> 0,86	<sup>4)</sup> 0,6	<sup>4)</sup> 0,3	<sup>4)</sup> 0,3					
<b>Σ</b>	<b>53 441 050</b>	<b>574,28</b>	<b>319,85</b>	<b>226,67</b>	<b>92,65</b>					
<b>Anmerkungen</b>										

<sup>1)</sup> voll getrocknet

<sup>2)</sup> aufgrund der geringen Strommengen wird hier keine Auslastung angegeben

<sup>3)</sup> wenn nur entwässertes Schlamm verwendet wird, kann kaum Energie zurückgewonnen werden

<sup>4)</sup> Ergänzung durch das Fachgebiet III 2.4 des Umweltbundesamtes auf Grundlage der Fachserie 19 des Statistischen Bundesamtes

geringer sein als in Bioabfallbehandlungsanlagen, da über 50 % vor der Vergärung als heizwertreiche Fraktionen abgetrennt werden.

In Summe ist bei der MBA allerdings zu beachten, dass über diesen Weg ca. 2 Mio. t heizwertreiche Fraktionen bzw. Ersatzbrennstoffe aus den dort behandelten Abfällen erzeugt werden, die über ihre Verbrennung oder Mitverbrennung in dafür geeigneten Anlagen einen Beitrag zur Bereitstellung von Wärme und Strom leisten.

Ein weiterer wichtiger Verwerter von Abfallströmen sind Kohlekraftwerke, die ca. 2,8 % bzw. 1,5 Mio. t/a nutzen. Mittelfristig wird diese Option mit dem Wegfall der Kohleverstromung entfallen und es müssten ggfs. Kapazitäten an anderer Stelle geschaffen werden.

Die Verbrennung von Klärschlamm kann nicht als energetische Verwertung betrachtet werden, da der Energiegehalt des entwässerten Schlamms (die Bilanzierung basiert auf diesem Zustand) nicht ausreicht, um einen Energieexport ohne zusätzliche Wärme zur Trocknung zu realisieren.

### Entwicklungen

Durch zunehmenden Druck auf Verwertungsquoten wird die Erkenntnis reifen, dass eine nachhaltige Steigerung des Recyclings mit einer Änderung der Produktion einhergehen muss, d.h. einer Steigerung der Wiederverwendbarkeit und des Mehrweganteils, einer Verbesserung der Zerlegbarkeit sowie dem Rückgang von Verbundwerkstoffen ohne funktionale Notwendigkeit. Durch diese Maßnahmen wird der Verwertungsanteil im Siedlungsabfall steigen und die thermisch zu behandelnde Siedlungsabfallmenge insgesamt und insbesondere der Anteil an nicht verwertbaren Sortierresten sinken (Umsetzungszeitraum 20 Jahre). Gleichzeitig werden die Abfallmengen durch verschiedene Faktoren steigen, so dass mit einem Rückgang der Abfallmengen mittelfristig nicht zu rechnen ist:

- » Durch Wegfall der Kohleverstromung werden derzeit bestehende Kapazitäten der Abfallmitverbrennung in einer Größenordnung von 1,5 Millionen t/a reduziert.
- » Seit etwa 50 Jahren werden im Baubereich zunehmend Verbundmaterialien eingesetzt (Isolierungen etc.), die derzeit beim Bauschuttrecycling als nicht verwertbare Sortierreste anfallen.
- » Die Altautoverwertung findet derzeit überwiegend im Ausland statt, da Fahrzeuge in aller Regel noch vor Ende ihrer technischen Lebensdauer dorthin verkauft werden. Mit zunehmender Marktsättigung bzw. dem Erstarken eigener Fertigung wird die Entsorgung von Altfahrzeugen im Inland zunehmen.

- » Es werden neue Materialien bzw. Werkstoffe eingesetzt, für die derzeit noch keine Recyclingverfahren existieren.
- » Aufgrund des Verbots der landwirtschaftlichen Verwertung (neue Klärschlammverordnung von 2017) fällt verstärkt Klärschlamm an.
- » Durch Restriktionen bei der landwirtschaftlichen Ausbringung steigt die Menge an Gärresten aus Biogasanlagen.

In einer für die Zukunft anzustrebenden Abfallbehandlung leistet die thermische Behandlung über die energetische Verwertung des Abfalls hinaus auch die Beiträge für ein Recycling von Wertstoffen. In diesen Zusammenhang sei als Beispiel die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm, die Rückgewinnung von Metallen aus Verbundmaterialien sowie die Abscheidung von CO<sub>2</sub> als Ausgangsstoff für weitere Synthesen genannt. Die thermische Abfallbehandlung ist damit integraler Bestandteil einer Kreislaufwirtschaft und ermöglicht darüber hinaus die Handhabung gefährlicher Abfälle. Es erfolgt eine Umwandlung gefährlicher und toxischer Komponenten in umweltverträgliche oder in stabilisierter Form ablagerbare Reaktionsprodukte (finale Senke).

### 1.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU

Die Abfallverbrennung bewegt sich bei den gesetzlichen Rahmenbedingungen in einem Spannungsfeld zwischen immissionsschutzrechtlichen Anforderungen an die Technologie und die Einbindung in den rechtlichen Rahmen der Kreislaufwirtschaft.

In beiden Rechtsbereichen dominiert inzwischen der europäische Rechtsrahmen, der noch durch nationale Regelungen ergänzt wird.

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ist hierbei auf nationaler Ebene maßgebend für die Einstufung der Abfallverbrennung in den abfallwirtschaftlichen Kontext.

Grundsätze und Pflichten der Erzeuger und Besitzer von Abfällen sowie der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (§§ 6–22 KrWG)

Produktverantwortung (§§ 23–27 KrWG)

Planungsverantwortung (§§ 28–44 KrWG)

Überwachung (§§ 47–55 KrWG)

Entsorgungsfachbetriebe (§§ 56–57 KrWG)

Betriebsorganisation, Betriebsbeauftragter für Abfall etc. (§§ 58–61 KrWG)

Die fünfstufige Abfallhierarchie fußt auf der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie (§ 6 Abs. 1 KrWG).



Abbildung 2: Bei der Abfallhierarchie muss grundsätzlich die abgebildete Rangfolge berücksichtigt werden.

Gemäß § 6 Abs. 2 KrWG soll dabei diejenige Maßnahme Vorrang haben, „die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet“. Für die Betrachtung der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zugrunde zu legen. Hierbei sind insbesondere zu berücksichtigen

1. die zu erwartenden Emissionen,
2. das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen,
3. die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie
4. die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen.

Die technische Möglichkeit, die wirtschaftliche Zumutbarkeit und die sozialen Folgen der Maßnahme sind zu beachten.

*Aber:* Auch im KrWG gibt es keine strikte Vorrangregel, sondern jeder einzelne Entsorgungsvorgang muss anhand der vorgenannten Kriterien gemäß § 6 Abs. 2 – einschließlich der wirtschaftlichen Zumutbarkeit – bewertet werden, so dass selbst bei Vorhandensein einer Recyclingmöglichkeit auch die energetische Verwertung oder gar Beseitigung erlaubt sein kann. Bei Gleichrang von mehreren Verwertungsmaßnahmen besteht für den Abfallerzeuger oder -besitzer ein Wahlrecht (§ 8 Abs. 1 Satz 2). Die Bundesregierung kann durch Rechtsverordnungen den Vorrang oder Gleichrang einer Verwertungsmaßnahme und Anforderungen an die Hochwertigkeit der Verwertung bestimmen.

Die europäischen BVT-Merkblätter (Best Available Technique Reference Documents – BREF) beschreiben die besten verfügbaren Techniken (BVT bzw. BAT Best Available Techniques) für einen umweltverträglichen und

emissionsarmen Betrieb von industriellen Prozessen, zu denen auch die thermischen und nichtthermischen Abfallbehandlungsanlagen zählen. Die Bedeutung der besten verfügbaren Techniken im Sinne der Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU (engl. Industrial Emissions Directive, IED) entspricht im deutschen Recht dem Stand der Technik.

Mit der Industrieemissionsrichtlinie hat das Thema der besten verfügbaren Techniken für die verschiedensten industriellen Produktionsprozesse und thermischen Prozesse der Wärme- und Stromerzeugung aus festen, flüssigen, gasförmigen Brennstoffen sowie der thermischen und sonstigen Behandlung von Abfällen eine neue Relevanz erhalten.

In Anhang I der IED werden industrielle Tätigkeiten aufgelistet, für die aufgrund der besonderen Umweltrelevanz spezielle Prinzipien und Betreiberpflichten u.a. eine Errichtung und ein Anlagenbetrieb nach den „besten verfügbaren Techniken“ gelten, wenn die im Anhang genannten Kapazitätsschwellen erreicht werden. Die betroffenen Abfallbehandlungsverfahren sind unter Nummer 5 des Anhang I der IED geführt.

Nahezu alle unter Nummer 5 gelisteten Verfahren und Aktivitäten fallen in den Regelungsumfang des BVT-Merkblattes „Abfallbehandlung“, in dem die unterschiedlichsten nicht thermischen Abfallbehandlungsverfahren erfasst sind. Ausgenommen sind Abfallverbrennungsanlagen der Nummer 5.2, für die ein eigenständiges BVT-Merkblatt existiert, und Anlagen und Aktivitäten, die in den Regelungsbereich der Richtlinie 1999/31/EG (EG Deponierichtlinie) fallen.

In diesem Zusammenhang sei auch auf den Durchführungsbeschluss (EU) 2019/2010 der Kommission vom 12. November 2019 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/ EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Abfallverbrennung verwiesen.

Die novellierte Fassung von beiden o.g. Merkblättern befindet sich inzwischen in der Umsetzung in deutsches Recht, wobei gerade die Themen Energieeffizienz und Ressourcennutzung in der Endfassung des BVT-Merkblattes „Abfallverbrennung“ als noch erweiterungsfähig zu betrachten sind.

Allerdings ergeben sich daraus Folgewirkungen wie die Diskussion hinsichtlich einer hochwertigen energetischen Verwertung und entsprechend verbindlicher Kriterien, da ein direkter Austausch von Primärenergieträgern wie Öl oder Kohle in der Regel nur bei der Mitverbrennung dargestellt werden kann. Für die Bewertung der Energieeffizienz bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen hat sich das R<sub>1</sub>-Kriterium<sup>2</sup> etabliert.

Der Betrieb thermischer Abfallbehandlungsanlagen stellt heute einen Wirtschaftszweig mit einer der vergleichsweise höchsten rechtlichen Regelungsdichten dar. Signifikant deutlich wird dies u.a. durch die Tatsache, dass sich aus den aktuell vorliegenden BVT-Merkblättern zu den Themen „Abfallbehandlung“ und „Abfallverbrennung“ kaum Handlungsbedarf für die in Deutschland geübte Praxis der Abfallentsorgung ergibt.

Die absehbaren Entwicklungen zielen auf eine weitere Absenkung der Emissionswerte, optimierte Energieausnutzung sowie die Öffnung hin zu technologisch nahestehenden Energiedienstleistungen, sofern die politischen Rahmenbedingungen hierfür geschaffen werden.

Um die Ressourceneffizienz der Abfallwirtschaft zu verbessern, wurden die Vorgaben für das Recycling verstärkt. Für Siedlungsabfälle musste bis 2020 insgesamt eine Recyclingquote von 65 % sowie für Bau- und Abbruchabfälle eine stoffliche Verwertungsquote von 70 % erreicht werden (§ 14 Abs. 2 und 3 KrWG). Die Anforderung wurde für Siedlungsabfälle mit 67% erfüllt und dürfte auch für Bau- und Abbruchabfälle weitestgehend erreicht sein.

Bis 2015 sollte zudem flächendeckend die getrennte Sammlung von Bioabfällen eingeführt werden (§ 11 Abs. 1 KrWG). Denn zum einen sind Bioabfälle werthaltige Stoffe, sei es im Rahmen der Gewinnung von Energie aus Biomasse, sei es für die Gewinnung von Kompost. Und insbesondere Kompost aus Bioabfällen gilt als einer der wertvollsten Wirtschaftsdünger. Zum anderen erfolgt bereits in vielen Gebieten Deutschlands eine getrennte Erfassung von Bioabfällen, so dass davon ausgegangen wird, dass die flächendeckende Erfassung und Sammlung bereits weitestgehend eingeführt ist.

Schließlich können verordnungsrechtliche Grundlagen für die Einführung einer einheitlichen Wertstofffassung (z.B. durch eine „Wertstofftonne“) zwecks gemeinsamer Erfassung von Verpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen getroffen werden (§ 10 Abs. 1 Nr. 3 KrWG und § 25 Abs. 2 Nr. 3 KrWG). Hier ist der Gesetzgeber allerdings mit einer bundesweiten Einführung der Wertstofftonne bisher gescheitert.

Hinsichtlich der Ressourcennutzung ringt die Abfallverbrennung noch um Anerkennung, so dass die Begrifflichkeit eines „Thermischen Recyclings“ für die Verwertung von Metallen aus der Verbrennungsgasche und -schlacke bisher eher als Provokation aufgefasst wird, wenngleich die Anerkennung für die Verwertungsquote auf europäischer Ebene bereits vorliegt.

## 1.4 Energiepolitische Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU

### 1.4.1 Allgemeines

Bedingt durch Erkenntnisfortschritte, technische Entwicklungen und politische sowie wirtschaftliche Rahmenbedingungen sind die Zielstellungen der thermischen Abfallbehandlung ständigen Änderungen und Anpassungen unterworfen. Während anfangs die Entsorgungsaufgabe zur Hygienisierung und Volumenreduktion sowie Verfügbarkeit im Zentrum standen, traten nach und nach die Nutzung des energetischen Potentials unter Einhaltung strengerer Emissionsrichtlinien in den Vordergrund. Heute gewinnen zunehmend auch Aspekte der Wertstoffrückgewinnung an Bedeutung.

Die Erzeugung von elektrischem Strom aus der freigesetzten thermischen Energie ist eine logische Konsequenz, da so zunächst der Anlageneigenbedarf gedeckt und später auch Überschüsse generiert werden konnten. Im Rahmen von stabilen Strompreisen und faktisch negativen Brennstoffkosten war ein Stromabsatz stets gewährleistet und trug zum Deckungsbeitrag der Anlagen bei. Daraus ergibt sich von selbst eine anlagenspezifische Optimierung der Stromerzeugungskomponente unter Beachtung der technischen und ökologischen Randbedingungen (bspw. hohe Auflagen bei der Rauchgasreinigung). Damit traten jedoch strukturpolitische Randbedingungen bei der Standortwahl in den Hintergrund, sodass in der Folge auch vor dem Hintergrund der Akzeptanz nicht das gesamte energetische Potential durch den KWK<sup>3</sup>-Ansatz nutzbar wurde.

2 In einer Anlage zur Verbrennung von Siedlungsabfällen mit R1-Energieeffizienz können Abfälle beseitigt und verwertet werden. Für feste Siedlungsabfälle gilt die Fiktion der energetischen Verwertung nach der Fußnote zu R1 ohne weiteren Nachweis der Substitution von Brennstoffen, wenn die Anlage zur Verbrennung fester Siedlungsabfälle das vorgegebene R1-Kriterium der Fußnote zu R1 erreicht hat.

Gem. Fußnote zu R1, Anh. II der AbfRL (RL 2008/98) fallen unter das Verwertungsverfahren R1 „Hauptverwendung als Brennstoff oder anderes Mittel der Energieerzeugung“ Verbrennungsanlagen, deren Zweck in der Behandlung fester Siedlungsabfälle besteht nur dann, wenn deren Energieeffizienz ausreichend ist (Energieeffizienzformel, kurz: R1-Formel). Die Regelung ist in das KrWG wortgleich übernommen worden.

Die Anwendung und Auslegung der R1-Energieeffizienzformel ist konkretisiert in den Leitlinien der Kommission mit dem Titel „Leitlinien zur Auslegung der R1-Energieeffizienzformel für Verbrennungsanlagen, deren Zweck in der Behandlung fester Siedlungsabfälle besteht, gemäß Anhang II der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle“ vom Juni 2011.

Siehe auch: LAGA M38 - Vollzugshinweise für die Anwendung der R1-Formel für die energetische Verwertung von Abfällen in Siedlungsabfallverbrennungsanlagen gemäß der EU-Abfallrahmenrichtlinie.

3 KWK: Kraft-Wärme-Kopplung

### 1.4.2 Stand der Verfahrenstechnik und Bilanzierung im Allgemeinen

Die Bewertung des energetischen Potentials ist eng mit der Frage der energetischen Bilanzierung verbunden. Werkzeuge zur Bewertung von Abfallbehandlungsanlagen wurden in der gleichnamigen Veröffentlichung der ProcessNet-Fachgruppe „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“ [2] bereits veröffentlicht und stellen eine wichtige Grundlage für die VDI-Richtlinien 3925 „Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren“ sowie für auf Messungen und Bilanzierung aufbauende Emissionsminderungsmaßnahmen, bspw. VDI 3460 – „Emissionsminderung Thermische Abfallbehandlung Grundlagen“, dar. In der Richtlinie 3460 wird der Stand der Technik für Bau und Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen mit starkem Bezug zur Emissionsminderung (Primär- und Sekundärmaßnahmen) vollumfänglich beschrieben.

Eine grundlegende bilanzielle Unterteilung kann bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen jedweder Ausprägung anhand Anlagengruppen des thermischen Hauptverfahrens (bspw. basierend auf Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse o.a.), der Abgasreinigung bzw. Reststoffaufbereitung (z.B. Schlacke) und Energieumwandlung (bspw. Dampfkraftsysteme, Synthesegas etc.) erfolgen. Die Anlagengruppen bestehen aus einzelnen Anlagenteilen (Wäscher, Wärmetauscher, Kessel usw.), die wiederum zu einer ganzen Anlage zusammengefügt

sind (vgl. Abbildung 3). Weitere Leitlinien für die Bilanzierung des thermischen Hauptverfahrens sind ebenfalls in der Richtlinie [3] zu finden.

### 1.4.3 Wandel der Rahmenbedingungen

Mit dem deutschen Rechtsrahmen (bspw. EEG, EnWG, KWKG usw.<sup>4</sup>) sowie dem Energiekonzept der Bundesregierung 2010 wandelten sich die Rahmenbedingungen auf dem Energiemarkt. Thermische Kraftwerke am Ende der Merit-Order-Kurve mussten immer flexibler und kostengünstiger werden, um am Markt bei wenigen, kurzfristigen Einsatzstunden im Jahr bestehen zu können. Davon waren zunächst Gas- bzw. GUD<sup>5</sup>-Kraftwerke betroffen. Es folgen entlang der Merit-Order aktuell die Stein- und dann die Braunkohlekraftwerke.

Die Rentabilität von Siedlungsabfall-Heizkraftwerken (MHKW – als Abfallverbrennungsanlagen mit Energieauskopplung) wird im Wesentlichen durch drei Faktoren bestimmt: Durch den Marktpreis für den Brennstoff, durch die Brennstoffqualität hinsichtlich der kalorischen Eigenschaften sowie der Schadstoffbefrachtung und durch die Erlöse für erzeugten Strom und Wärme. In allen drei Bereichen sind in den letzten Jahren volatile Tendenzen erkennbar, welche zum Teil für eine Verschärfung der wirtschaftlichen Situation in kommunalen, thermischen Kraftwerken sorgen. So sinken auf der einen Seite die erzielbaren Grenzerlöse im Energiemarkt, insbesondere für elektri-

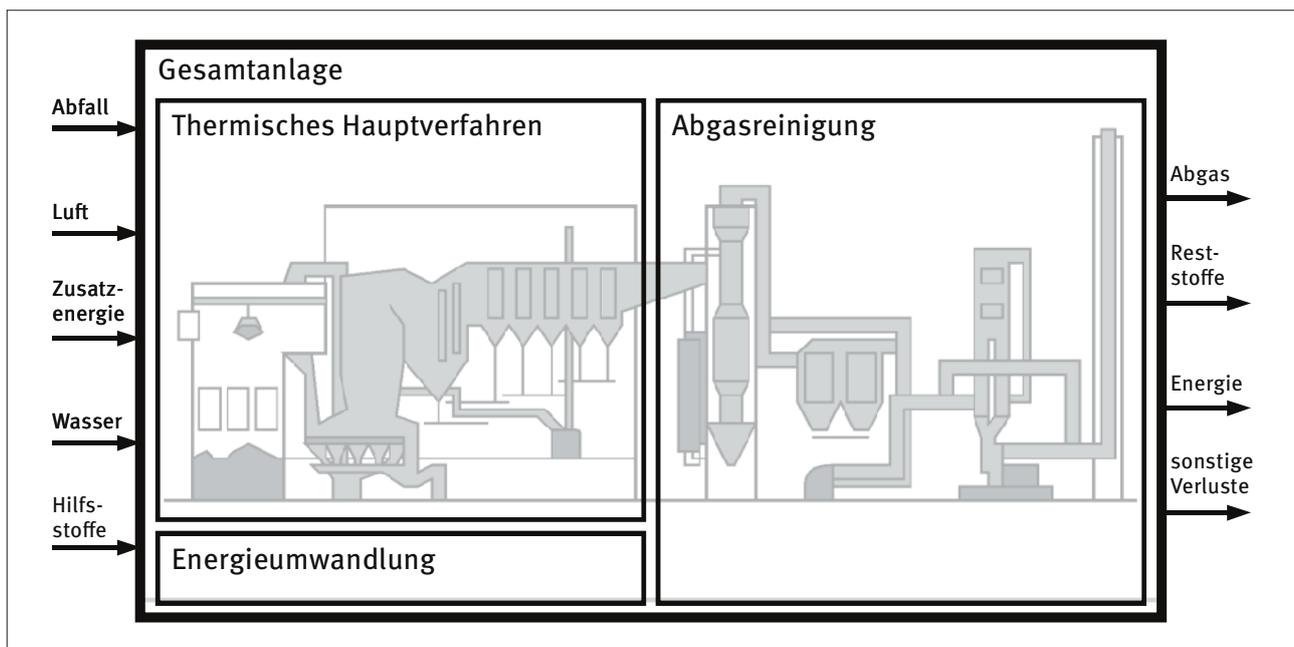


Abbildung 3: Übergeordnete Bilanzkreise für die Bilanzierung einer Siedlungsabfall-Verbrennungsanlage. Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme. [4]

<sup>4</sup> Eine vollständige Übersicht der Gesetze und Verordnungen im Energieversorgungssystem ist unter [5] verfügbar.

<sup>5</sup> GUD: Gas und Dampf

sche Energie, bedingt durch das derzeitige Strommarktdesign und die faktisch nicht vorhandenen Grenzkosten von Wind- und Solarenergiequellen. Auf der anderen Seite kommt hinzu, dass bei konstantem Angebot und wachsender Nachfrage die Preise für Biomasse, EBS und andere Brennstoffe stetig steigen. Für MHKW schwanken die Erlöse aus der Annahme von Abfällen und sind regional sehr differenziert. Daraus ergeben sich zeitweise sinkende Einnahmen auf der In- bzw. Outputseite (vgl. Abbildung 4), die bei Überlagerung erhebliche Probleme verursachen.

Unabhängig von der wirtschaftlichen Situation müssen thermische Abfallbehandlungsanlagen als ein zentraler Bestandteil eines integrierten Wertstoffrückgewinnungs- und Energiekonzeptes gesehen werden. Einerseits werden bei der Aufbereitung von Abfällen und Reststoffen immer Restfraktionen verbleiben, für die die thermische Abfallbehandlung der Schadstoffzerstörung dient oder eine letzte Senke darstellt. Andererseits können durch spezielle Technologien wie Pyrolyse-, Vergasungs- und spezielle Verbrennungsprozesse für ausgewählte Abfälle gezielt Wertstoffe zurückgewonnen und Energie bereitgestellt werden (bspw. Metallrückgewinnung, Bodenaufbereitung).

Aus diesen Zusammenhängen ergeben sich neue Herausforderungen für Abfallverbrennungsanlagen.

### 1.5 Entwicklungsmöglichkeiten – Szenarien zur Weiterentwicklung

Die zuvor dargestellten Rahmenbedingungen auf dem Energie- und Abfallmarkt (s.o.) sind mittelbare Folgen der deutschen Energiepolitik und führen zu Anpassungsbedarf bei MHKW. Weitere Änderungen der Rahmenbedingungen werden MHKW noch unmittelbarer treffen. Dazu gehört beispielsweise die Zielstellung der Defos-

silisierung des Energiesystems und der mengenbasierte Wertverlust elektrischer Energie durch wegfallende Grenzkosten der fluktuierenden erneuerbaren Energien (EE). Die Aufrechterhaltung eines stabilen Netzbetriebes kann hingegen an Bedeutung und an Wert gewinnen. Unter dieser Prämisse bleiben MHKW auch in Zukunft bestehen und könnten zukünftig netzdienliche Aufgaben übernehmen. Dabei sind Konzepte zu favorisieren, die das Grundlastverhalten des MHKW beibehalten und durch synergetische Erweiterungen (Batterien, Biogasanlagen, Verfahren zur Synthese chemischer Rohstoffe und Treibstoffe) ertragreicher machen. Im Fokus stehen Konzepte, die die Sektorenkopplung vorantreiben. Ein erster Schritt in diese Richtung kann mit einer Stärkung verbundwirtschaftlicher Konzepte und der damit verbundenen Effizienzsteigerungen gemacht werden. Mögliche Ansätze werden dafür nachfolgend vorgestellt.

#### 1.5.1 Stärkung der Verbundwirtschaft und Modernisierung (Retrofits)

Für die Verbesserung der Energieeffizienz durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist zunächst die Ermöglichung von (Wärme-)Verbundprojekten ein naheliegender Ansatz. Hierbei muss zwischen den Anforderungen industrieller und kommunaler Verbünde unterschieden werden.

In industriellen Komplexen wird der Wärmebedarf produktionsbedingt durch Dampf gedeckt. Höhere Temperaturen, ein durchgängiger Bedarf sowie entsprechende Verfügbarkeit kennzeichnen den Verbund.

In kommunalen Verbänden, d.h. schlussendlich dicht an Ballungsgebieten, schwankt der Wärmebedarf deutlich mit den Jahreszeiten. Die niedrige Grundlast im Sommer kann mitunter durch ein regionales MHKW allein gedeckt werden, während im Winter ggf. weitere Spitzenlastanla-

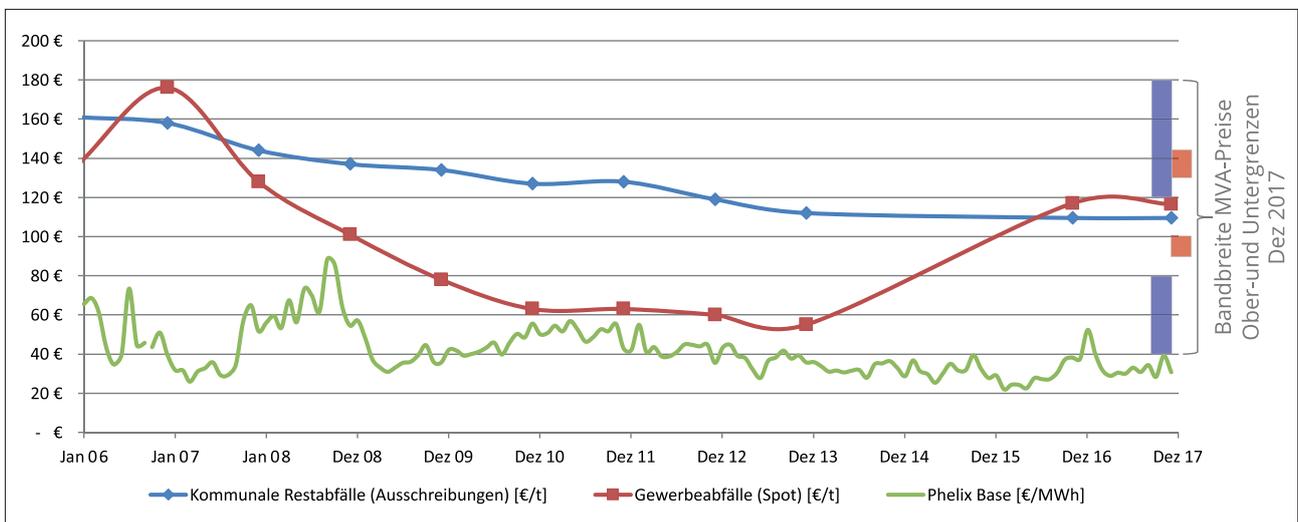


Abbildung 4: Preisentwicklung für Strom und Abfall [6], erweitert

gen notwendig bleiben. Andererseits kann je nach Netzparametern Wärme auf niedrigerem Temperaturniveau abgesetzt werden. Es bestehen weiterhin sehr hohe Anforderungen an die Einhaltung bzw. Übererfüllung von Emissionsrichtlinien (nicht nur in Bezug auf Schadstoffe, sondern bspw. auch olfaktorische Belastungen). Praktisch umgesetzte Beispiele sind die MHKW in Berlin Ruhleben, Wien Spittelau sowie die Energiezentrale Forsthaus in Bern.

### 1.5.2 MHKW als Regelungseinheiten

Als weitere Evolutionsstufe kann ein MHKW Regelungsaufgaben in dezentralen Netzen übernehmen, indem es als stabilisierende, träge Masse in regionalen Energieverbänden fungiert (vgl. Abbildung 5). Dieser Ansatz geht davon aus, dass zukünftig zur Reduktion des gesamten Netzausbaus lokale Netzverbände gestärkt werden und sich zunächst selbst stabil ausregeln. Übergeordnet findet weiterhin der energetische Ausgleich statt. Eine unmittelbar lastflexible Fahrweise ist aufgrund der bislang üblichen Auslegung auf die Entsorgungsaufgabe aber so gut wie unmöglich.

Für eine Flexibilisierung von Energiebereitstellung und -bedarf können MHKW als KWK-Anlagen jedoch erweitert werden.

Die Flexibilisierung durch Erweiterungsmaßnahmen ist in Abbildung 5 dargestellt. Unter der Prämisse, dass die Entsorgungsaufgabe bestehen bleibt und die Dimensionierung zukünftiger Anlagen auch keinen intermittierenden Betrieb vorsieht (bspw. durch größere Bunker

als Speichersysteme, mehrere Turbinen), lassen sich zur Netzstabilisierung

- » Batteriespeichersysteme,
- » Biogasanlagen (Flexibilität durch Wärmebedarf und Gasmotoren) oder
- » Power-to-X-Systeme

realisieren.

Damit kann Ausgleichsleistung für fluktuierende Wind- und Solarenergie bereitgestellt werden. Dies kann außerdem „anlagenschonend“ erfolgen, wenn die Prognosegenauigkeit des Energiebedarfs und der Erzeugung aus Sonne und Wind zumindest für einige Tage im Voraus verbessert und zugänglich wird.

Die Anlagenerweiterung bringt neben der Einsetzbarkeit für Regelungsaufgaben auch eine Erweiterung des herkömmlichen Geschäftsfelds mit sich. Je nach Ergänzung wird der Wärmeabsatz verstärkt (Power-to-Heat, besonders mit Wärmepumpen in kommunalen Verbänden), alternative Energiedienstleistung wie Nah- oder Fernkälte (Power-to-Cold) oder gar Rohstoffe (gereinigtes CO<sub>2</sub> für externe Synthesen aus Ab- oder Biogas, Wasserstoff aus Elektrolyse, Biomethan für Mobilität (s.a. Biomethanisierung von H<sub>2</sub>) u.a.) bereitgestellt.

Insbesondere die Rohstoffversorgung kann zukünftig synergetisch mit einer verstärkten Wertstoffrückgewinnung aus Aschen, Schlacken, industriellen oder gewerb-

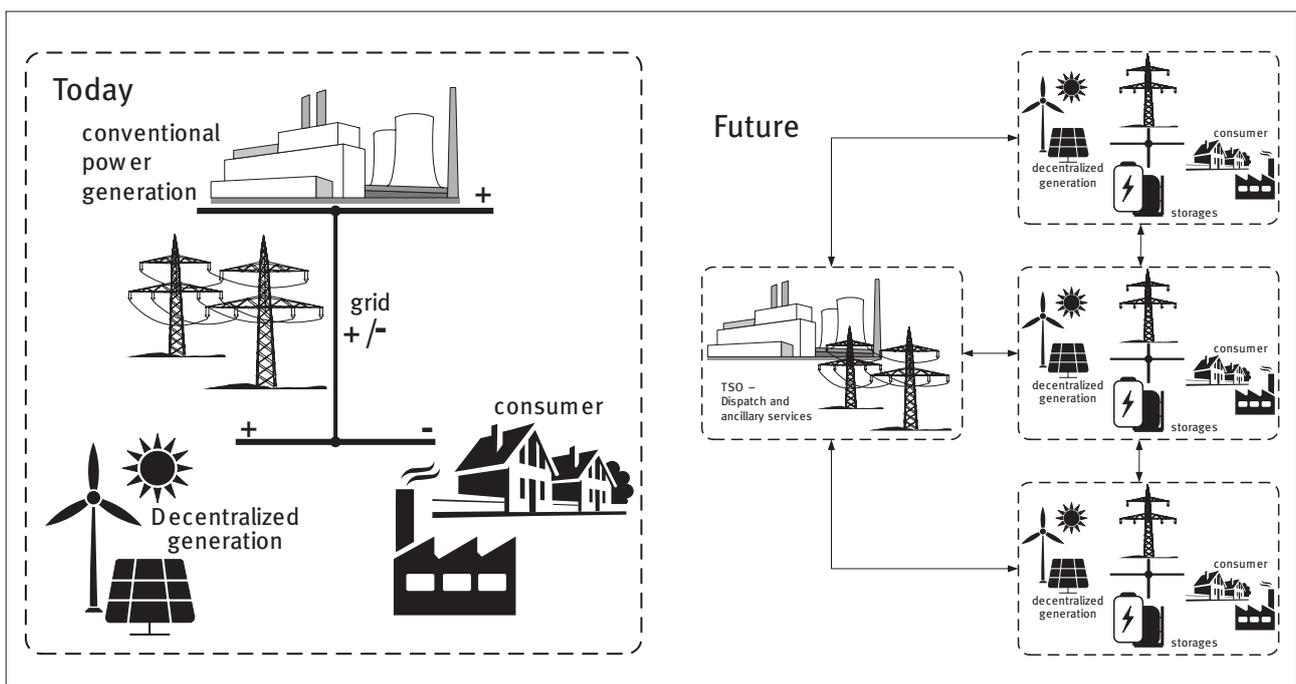


Abbildung 5: MHKW als Regelungselement in dezentralen Netzen [7]

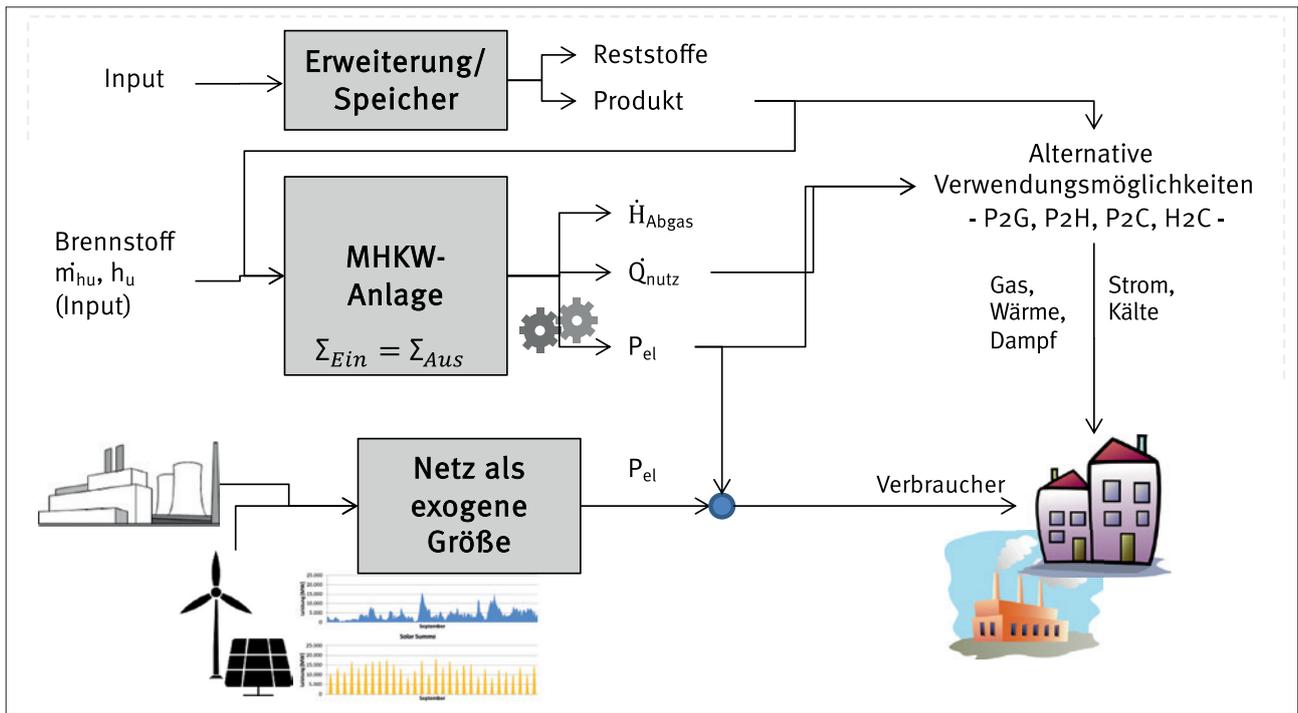


Abbildung 6: Erweiterungsmöglichkeiten für MKW zur Flexibilisierung und Geschäftsfelderweiterung [8]

lichen Reststoffen wirken. Bislang liegt ein Schwerpunkt auf vergleichsweise leicht abtrenn- und wiederverwertbaren Eisenmetallen.

### 1.6 Digitalisierung als Schlüsseltechnologie

Die Umsetzung der zuvor angesprochenen Entwicklungsmöglichkeiten von MKW erfährt durch den Einsatz zusätzlicher Werkzeuge und Methoden, die unter den Begriffen *Digitalisierung*<sup>6</sup> und *Industrie 4.0* zusammengefasst werden und über den vorhandenen Stand der Technik hinausgehen, einen enormen Auftrieb. Wesentliche Trigger für die Digitalisierung als „Enabling Technology“ sind v.a. das *Industrial Internet of Things (IIOT)*, *cyberphysische Systeme (CPS)* und die unter dem Begriff *künstliche Intelligenz (KI)* zusammengefassten Methoden. Damit eröffnen sich schon heute ganz konkrete Erweiterungsmöglichkeiten für MKW, worauf im Folgenden beispielhaft eingegangen sei. Das mit Digitalisierung und Industrie 4.0 verknüpfte Themenfeld der Cyber Security bleibt dabei zunächst unberücksichtigt.

#### 1.6.1 Triebfeder der Digitalisierung in MKW

Um thermische Abfallbehandlungsanlagen als einen zentralen Bestandteil übergeordneter Wertstoffrückge-

winnungs- und Energiekonzepte implementieren zu können, müssen volldigitalisierte Informationsschnittstellen zu sämtlichen Akteuren (Netzleitstelle, ggfs. externe Prozessanalyse, Zulieferer, Abnehmer, Instandhalter etc.) geschaffen werden. Die IT-gestützte Abstimmung anlagenübergreifender Komponenten zur Sicherstellung des Versorgungsauftrages und zur Erschließung ökonomischer und ökologischer Potentiale wirft hierbei konkrete Fragestellungen auf:

- » Wie ist der aktuelle Prozess-/Anlagenzustand (Status)?
- » Welche internen und externen Randbedingungen sind momentan bestimmend (Priorität)?
- » Werden konkrete betriebliche Zielstellungen gezielt verfolgt (Ziele)?
- » Liegen Abweichungen vom Sollwert vor (Störungen)?
- » Zeichnen sich planmäßige oder unplanmäßige Trends oder Ereignisse ab (Prognose)?

Zur kontinuierlichen und automatisierten Beantwortung dieser Fragen mit komplexen EDV-Werkzeugen ist die Integration von Industrie 4.0 in die in MKW vorhandenen Systeme notwendig. Dabei ist sowohl die Hardware- als auch die Softwareseite einzubeziehen. Damit ist eine

6 Technologie wird hier zunächst als „Lehre“ über gewisse Verfahren/Techniken/Prozesse verstanden. „Der Begriff Digitalisierung [...] [meint u.a.] die digitale Umwandlung und Darstellung bzw. Durchführung von Information und Kommunikation oder die digitale Modifikation von Instrumenten, Geräten [...]“. [9]. Digitalisierung ist somit ein übergeordneter Forschungszeitraum zur Umsetzung neuer Techniken auf digitaler Basis.

perspektivische Erweiterung des Dienstleistungsspektrums von MHKW zu gewährleisten.

### 1.6.2 Bestandsaufnahme aktueller Bestrebungen

Zunächst soll festgehalten werden, dass die Steuerung und Regelung von MHKW bereits jetzt einen hohen Digitalisierungsgrad aufweist. Den Kern des automatisierten Betriebes bildet das *Prozessleitsystem (PLS)*, das im Sinne eines sog. *Human Machine Interface (HMI)* als Schnittstelle zwischen dem Prozess und dem Prozessführer/Operator fungiert. Dazu verfügt der Prozess selbst über eine Reihe von zumeist kabelgebundenen Sensoren, die kontinuierliche Messsignale ins System liefern, und Aktoren, die als Stelleinrichtungen den Prozess beeinflussen. Zur Überwachung und Steuerung dienen dem Anlagenfahrer Prozessabbilder und Diagramme als Visualisierungshilfe.

Vor dem Hintergrund aktueller Zielstellungen und Randbedingungen ermöglicht die state-of-the-art Anlagen- und Prozesstechnik einen zuverlässigen Betrieb. Um jedoch zusätzliche Optimierungspotentiale hinsichtlich Emissionsreduzierung, Wirkungsgradsteigerung, Wirtschaftlichkeit usw. nutzbar zu machen, sind eine Reihe zusätzlicher Einzeloptimierungen, die sich z. T. auch gegenseitig beeinflussen, erforderlich. Eine solche Optimierung verschiedener *Clients* kann bisher nicht durch das PLS abgedeckt werden. Dazu bedarf es in der Erweiterung Hard- und Softwarelösungen, die v.a. in den Bereichen Sensorik, *Big Data Analyse*, digitaler Zwilling (*Digital Twin*) sowie *IIOT* anzusiedeln sind.

Zahlreiche Betreiber und Hersteller von Abfallverbrennungsanlagen haben dies im Kontext mit dem Zukunftsthema Digitalisierung erkannt und bereits beginnend in den 1990er/ 2000er Jahren Entwicklungen installiert und weiter vorangetrieben, um Verbesserungen in Teilaspekten zu erreichen. Zu nennen sind hier beispielsweise Feuerraumkameras, die die Temperaturverteilung auf dem Rost und im Feuerraum erfassen und zur Optimierung und Regelung der Verbrennungsführung beitragen [10]. Dazu zählen auch Wärmestromsensoren, die minimalinvasiv auf der Außenseite des Verdampfers als Messstellenraster angebracht werden und lokale Informationen zur Heizflächenverschmutzung liefern, welche wiederum zur Optimierung der Heizflächenreinigung herangezogen werden können [11]. Auch im Hinblick auf die Modellierung gab es Weiterentwicklungen, die zur Online-Brennstoffidentifikation, z. B. zur Ermittlung der Abfallzusammensetzung [12], und zu Prognosezwecken entwickelt wurden. Erste Ergebnisse münden in Assistenzsystemen, die ein leistungsfähiges Anlagenmonitoring ermöglichen und den Betreibern Handlungsempfehlungen zur Prozessoptimierung liefern.

Diese Beispiele machen exemplarisch deutlich, dass die Potentiale von Digitalisierung und Industrie 4.0 in MHKW frühzeitig erkannt wurden und auf dem Weg der Umsetzung sind. Für die Zukunft besteht die Herausforderung vor allem in der Vernetzung der o.g. Bestandteile und der weiteren Nutzbarmachung der vorhandenen Datenbasis im Sinne des sog. *Data Minings*. Dies gilt insbesondere mit der angestrebten Funktion als Regelungseinheit einer Verbundwirtschaft, das heißt, wenn sich also die bisherige Systemgrenze über den Bilanzkreis MHKW erweitert (s. Kapitel 1.4). Der aktuelle Stand im Bereich der Digitalisierung ist daher vorzeigbar, zur weiteren Entwicklung ist jedoch noch ein enormes Potenzial vorhanden, was noch nicht ausgeschöpft ist. Mit diesen Entwicklungen sind weitere ökologische und auch wirtschaftliche Verbesserungen verbunden.

### 1.6.3 Erfordernisse hinsichtlich der Hardware (Sensorik)

Wie auch in anderen Branchen (z. B. Automotive) sind leistungsfähige Sensoren eine wesentliche Säule des Fortschritts im Bereich von Digitalisierung und Industrie 4.0. Obwohl, wie oben skizziert, bereits jetzt schon eine Vielzahl an Sensoren in MHKW vorhanden sind, wird es im Zusammenhang mit der oben skizzierten Entwicklung zahlreiche weitere Innovationen bei Sensoren, einschließlich *Soft-Sensors*, geben.

Ein Beispiel hierfür ist die Online-Überwachung der lokalen Heizflächenverschmutzung, die einerseits die Anlageneffizienz beeinflusst (Wirkungsgradverschlechterung durch Beläge) und sich gleichzeitig auf den Betrieb und die Instandhaltung bzw. die Reisezeit (beschleunigter Materialverschleiß durch Wandabzehrungen) auswirkt. Mit Hilfe der bereits erwähnten Erfassung von Heizflächenverschmutzungen kann kurzfristig eine Wirkungsgraderhöhung erzielt werden. Mittel- und langfristig lassen sich mit einer vorausschauenden Instandhaltung (*Predictive Maintenance*) Materialkosten senken.

Gegenwärtig sind die Installationen und Verschaltungen von Sensoren i. d. R. mit hohem Materialaufwand, insbesondere Verkabelung, verbunden. Verbesserungspotential besteht hier in der drahtlosen Datenkommunikation und einer intelligenten Sensorvernetzung. Thermoelektrische Generatoren (TEG) ermöglichen dabei gerade bei Hochtemperaturanwendungen eine energieautarke Stromversorgung.

### 1.6.4 Roadmap für den Bereich Software

Verbindungselement zwischen dem Prozess und den Anforderungen an den zukunftsorientierten Betrieb von MHKW im Sinne der Digitalisierung und Industrie 4.0 bilden leistungsfähige Softwarebestandteile, die ein prozessbegleitendes *Online-Monitoring* sowie einen

*vorausschauenden Betrieb und eine vorausschauende Instandhaltung* ermöglichen. Die intelligente Vernetzung von Prozess und virtueller Welt erfolgt über das Internet als Dateninfrastruktur mittels *Industrial Internet Cloud Platforms*, die sowohl die drahtgebundene als auch die zuvor genannte drahtlose Kommunikation von Sensoren und Sensornetzwerken unterstützen.

Die Umsetzung von Digitalisierung und Industrie 4.0 in MHKW erfordert außerdem Algorithmen, die in der Lage sind, große Mengen an historischen und Echtzeit-Daten (*Big Data*) zu analysieren und zu bewerten. Eine zentrale Rolle spielen hierbei die unter dem Begriff der *künstlichen Intelligenz (KI)* subsummierten Methoden des Teilgebiets *maschinellen Lernens (ML)*. Ziel der statistikbasierten Verfahren ist es, aus bekannten Beispielen, den sog. Trainingsdaten, Muster und Gesetzmäßigkeiten automatisiert zu erkennen. Neben den klassischen Regressions- und Clustermethoden sind *künstliche neuronale Netze (KNN)* von besonderer Bedeutung für ML-Verfahren. Werden KNN mit zunehmend komplexer Architektur angewendet, spricht man auch vom tiefen Lernen bzw. *Deep Learning (DL)*.

Der Vorteil von KI-Methoden besteht darin, dass das einmal erlernte komplexe Betriebsverhalten eine nahezu Echtzeit-Prognose und -Optimierung für neue Betriebszustände ermöglicht. Bei unbekanntem Verhalten, z. B. bei anderen Einsatzstoffqualitäten, versagt die Methodik hingegen, da dieses nicht erlernt wurde.

Demgegenüber stehen *physikalisch-chemische Modelle*, die das Betriebsverhalten mittels Bilanzgleichungen, Transportansätzen, Reaktionsmechanismen und Kinetikansätzen usw. in Form eines sog. *digitalen Zwillings* weitestgehend genau abbilden. Allerdings verringert sich die Eignung zur Echtzeit-Prognose und -Optimierung mit zunehmendem Detaillierungsgrad - von statischen und dynamischen Online-Bilanzmodellen über Zellen- und Rührkesselmodelle zu 3D CFD-Modellen.

Als Lösungsansatz zur Verknüpfung der Vorteile von ML-Verfahren und digitalem Zwilling empfehlen sich *hybride Modelle*. Dazu werden zum KI-Training zusätzlich zu den Prozessdaten die Simulationsergebnisse des digitalen Zwillings als ergänzende Trainingsdaten für ein KNN herangezogen. Das Potential für solche Modelle scheint hoch, wobei bisher für MHKW kaum Erfahrung dazu vorliegt.

## 1.7 Fazit

Bedingt durch Erkenntnisfortschritte, technische Entwicklungen und politische sowie wirtschaftliche Rahmenbedingungen sind die Zielstellungen der thermischen Abfallbehandlung ständigen Änderungen und Anpassungen unterworfen. Während anfangs die Entsorgungsaufgabe zur Hygienisierung und Volumenreduktion sowie Verfügbarkeit im Zentrum standen, gewann nach und nach die Nutzung des energetischen Potentials unter Einhaltung strengerer Emissionsrichtlinien an Bedeutung. Die zuerst genannten Primäraufgaben blieben dabei als Pflicht erhalten und beschränken so einen flexibleren Einsatz der Anlagen. Zusätzlich gewinnen zunehmend auch Aspekte der Wertstoffrückgewinnung sowie die Netzintegration an Bedeutung. Dafür müssen die Voraussetzungen sowohl verfahrenstechnisch (weitere Anlagenkomponenten) als auch informationstechnisch (digitale Schnittstellen zur Überwachung und Steuerung, Zustandsbeschreibung und -projektion durch digitale Zwillinge) geschaffen werden. Diese Anpassungsoptionen bieten die Chancen, auch in zukünftig volatilen Marktbedingungen wirtschaftliche, ökologische und zuverlässige Entsorgungskapazitäten bereitzustellen.

## 2 Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Thermische Hauptverfahren

### 2.1 Einleitung

Unter thermischer Behandlung von Abfällen werden Verfahren zusammengefasst, die die verfahrenstechnischen Grundbausteine Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung in unterschiedlicher Weise in getrennten oder gemeinsamen Prozessschritten vorsehen. Für die Umsetzung dieser Prozesse stehen eine Vielzahl von Apparaten zur Verfügung (Brennkammern, Etagenöfen, Rostsysteme, beheizte Drehrohre usw.).

Beispielsweise kann in einem Drehrohr die thermische Zersetzung eines Feststoffes unter Sauerstoffabschluss von außen (Thermolyse oder Pyrolyse) erfolgen, ebenso kann ein Drehrohr für die Verbrennung von festen und pastösen Stoffen genutzt werden. Körnige, fluidisierbare Einsatzstoffe können in Wirbelschichten getrocknet werden, aber auch einen Pyrolyse-, Vergasungs- oder Verbrennungsprozess durchlaufen. Diese Beispiele zeigen, dass es nicht sinnvoll ist, bspw. von einem „Drehrohrverfahren“ zu sprechen, sondern bei der Beschreibung systematisch anhand der verfahrenstechnischen Grundbausteine vorzugehen.

Die Verfahren lassen sich prinzipiell in ein thermisches Hauptverfahren und weitere Verfahrensschritte zur Abgasreinigung, Energieumwandlung, Aschebehandlung, Erzeugung von Hilfsstoffen usw. aufteilen.

In der Regel kann der Umsatz von festen Einsatzstoffen (Restabfall) in mindestens zwei Teilschritten im thermi-

schen Hauptverfahren aufgeteilt werden. Der erste Teilschritt ist Feststoffumsatz und darauffolgend die weitere Behandlung der entstehenden Gase, Stäube usw. Dass bereits verschiedenste Verfahrenskombinationen praktisch getestet wurden, zeigt die Tabelle 2.

Die konventionelle thermische Behandlung von Abfall, oftmals auch als *klassische Abfallverbrennung* bezeichnet, ist gemäß der Einteilung in Tabelle 2 (A.) als ein Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren, z.B. mit einem Rostsystem in der ersten Einheit und einem Brennkammersystem in der zweiten Einheit, anzusehen. Sie hat sich als eine lang erprobte und bewährte Technik durchgesetzt. Die systematische Einordnung von Verfahren ist wichtig, um prozesstechnische Möglichkeiten besser erörtern und optimieren zu können und um Verfahren untereinander einem Vergleich überhaupt erst zugänglich zu machen.

### 2.2 Verfahren und Anlagentechnik – Stand der Technik und Entwicklungspotenzial

Üblicherweise sind die in Tabelle 2 aufgeführten Verfahren mit Wärmeauskopplung bzw. Dampferzeuger in einer zweiten Einheit ausgeführt. Die Verfahren werden in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Qualitäten der Abfälle oder der hergestellten Abfallfraktionen eingesetzt und werden nachfolgend beschrieben.

Werden die Verfahren (B.) bis (E.) aus Tabelle 2 zur Bereitstellung von Wärme bzw. Strom eingesetzt, stehen sie in unmittelbarer Konkurrenz zur klassischen Abfallver-

**Tabelle 2: Systematische Aufteilung für thermische Hauptverfahren [1]**

	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren
A.	Verbrennung <sup>1</sup>	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Abfallverbrennung) [2]
B.	Thermolyse <sup>2</sup>	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schwel-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU) [3]
C.	Vergasung <sup>3</sup>	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (weiterentwickelte klassische Abfallverbrennung) [4], [5]
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach Noell, Thermoselect-Verfahren usw.) [6]
E.	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach Lurgi) [7]

<sup>1</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge  
<sup>2</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge  
<sup>3</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsvorgänge

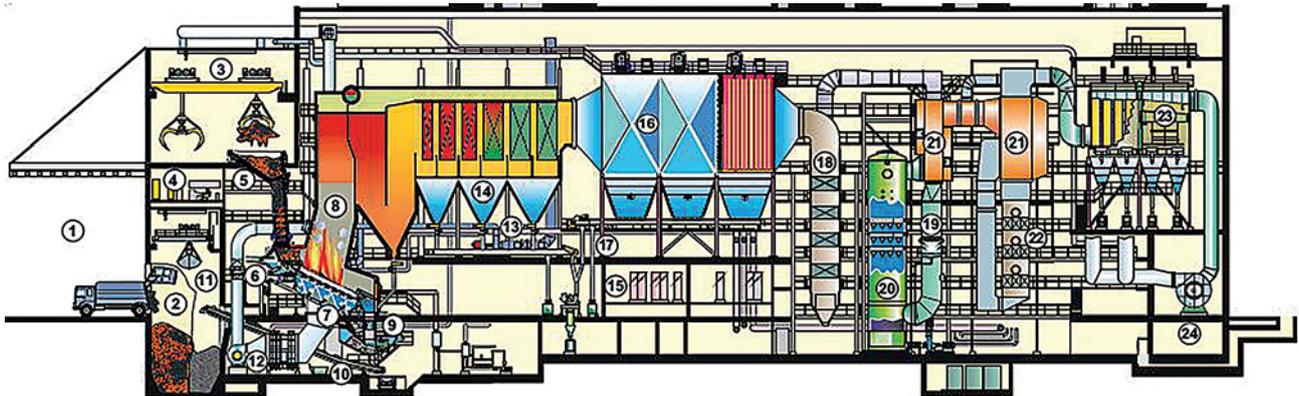


Abbildung 7: Längsschnitt einer Abfallverbrennungsanlage [8]

nung (A.) und müssen den zusätzlichen apparatetechnischen Aufwand entweder durch eine höhere Gesamteffizienz oder durch Vorteile in den festen Rückständen, z.B. geringere Elutionswerte, aufwiegen. Steht hingegen eine stoffliche Nutzung der Produkte, z.B. Verwertung eines Synthesegases oder eines Pyrolyseöls aus aufbereiteten Abfallfraktionen, aus den Verfahren (B.) bis (E.) im Vordergrund, dann stehen diese Verfahren in der wirtschaftlichen Konkurrenz zu Produkten aus der fossilen Wirtschaft, z.B. Naphtha für den Steamcracker oder Erdgas.

### 2.2.1 Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren mit Rostsystemen

Rostbasierte Verbrennungssysteme bieten den Vorteil, dass Haus- und Gewerbeabfall größtenteils ohne Vorbehandlung verbrannt werden können. Entsprechend der Anforderungen des Brennstoffs Abfall hat sich ein typisches Anlagendesign etabliert, für welches moderate Frischdampfparameter, ein hoher Luftüberschuss und eine aufwändige Abgasreinigungseinrichtung charakteristisch sind. Abbildung 7 zeigt im Längsschnitt beispielhaft eine solche Anlage.

In den letzten Jahren wurde bei den klassischen Verfahren mit Rostsystemen insbesondere die Abgasreinigungstechnik – *Sekundärmaßnahmen* – weiterentwickelt. Die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüsteten Anlagen erfüllen die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für das Einleiten und Deponieren von Schadstoffen in Luft, Wasser und Boden. Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung, Modellierung und Optimierung der Prozessführung – *Primärmaßnahmen* – des thermischen Hauptverfahrens. Hier zeigt sich, dass noch ein erhebliches Entwicklungspotential insbesondere im Bereich des Rostes und der Nachverbrennung vorhanden ist, um beispielsweise

- » die Abgasmassenströme zu verkleinern, was sich auf die nachgeschalteten Abgasreinigungsanlagen und die Emissionsfrachten auswirkt,

- » die Energienutzung zu verbessern,
- » die Reststoffeigenschaften zu beeinflussen,
- » Korrosionen zu vermindern und
- » Durchsatz sowie Verfügbarkeit zu erhöhen.

Diesbezüglich sind bei den klassischen Verfahren mit Rostsystemen – u.a. auch durch die *neuen, in Entwicklung befindlichen* Verfahren (vgl. Kapitel 2.3) mit ausgelöst – bereits erhebliche Entwicklungsschritte durchgeführt worden. Erwähnt seien hier beispielsweise Optimierung der Feuerraumgestaltung ([9], [2], [10], [11]), Abgasrückführung ([12], [13]), Sauerstoffanreicherung der Primärluft [27, 35], wassergekühlte Rostelemente [10], Weiterentwicklung der Regelung (z.B. Infrarot (IR)-Kamera) ([14], [15], [16], [17] usw.)

Darüber hinaus wurden im Pilotmaßstab für künftige Entwicklungen auch neue, veränderte Prozessführungen mit Rostsystemen erprobt, z.B. durch eine gestufte Verbrennung auf dem Rost

- » die Vergasung mit Luft auf dem Rost und damit zusammenhängend
- » die eigenständige Nachverbrennung der erzeugten Gase [18], [5].

Die mit den vorstehend genannten Zielstellungen angestrebten Verbesserungen treten dabei noch deutlicher hervor. Im Folgenden werden zunächst kurz allgemeine Gesichtspunkte der Prozessführung in Rostsystemen erläutert. Danach werden Beispiele von Prozessführungen an bereits in der Praxis umgesetzten Anlagen und Ergebnisse aus Versuchen in Industrie- und Pilotanlagen sowie im Technikums- und Labormaßstab vorgestellt.

Es gibt eine Vielzahl von Rosttechnologien zur Verbrennung von Siedlungsabfall, beispielhaft seien hier Vorschubrost, Rückschubrost und Walzenrost aufgeführt, die jeweils auch in unterschiedlichen Ausführungen zum Einsatz kommen.

### 2.2.2 Verbrennungs-Nachverbrenungsverfahren mit Wirbelschichtsystemen

Die Wirbelschichtfeuerung ist das übliche Verfahren zur Verbrennung von Klärschlamm, das vermehrt auch für speziell aufbereitete Ersatzbrennstoffe eingesetzt wird. Da eine Wirbelschicht nur Stoffe mit begrenzter Größe und Dichte in der Schwebelage halten kann, müssen Metalle und Steine weitgehend aus dem Brennstoff entfernt werden, da sie auch die Förder- und Austragsysteme beschädigen.

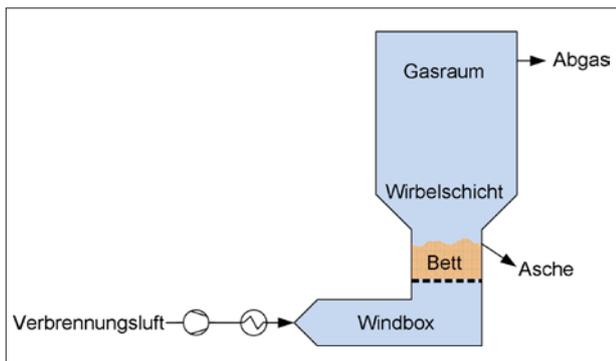


Abbildung 8: Prinzipschaltung Wirbelschicht [19]

Der vorgetrocknete Klärschlamm wird aus einiger Höhe über Wurfbeschickung oder auch eine Förderschnecke von der Seite aus in die Wirbelschicht aufgegeben. Bei der Wirbelschichtverbrennung ist z.B. in dem Boden des Ofens ein Düsenboden eingebaut. Durch diesen wird die Primärluft zugeführt, die das Bettmaterial aus beispielsweise Quarzsand und den Brennstoff fluidisiert und in der Schwebelage hält. Die gute Durchmischung von Brennstoff und Luft haben zur Folge, dass eine recht gleichmäßige optimale Verbrennung in dem Wirbelbett eingestellt werden kann und Strahlenbildung, z. B. durch unverbrannte Luft oder Kohlenmonoxid, vermieden werden.

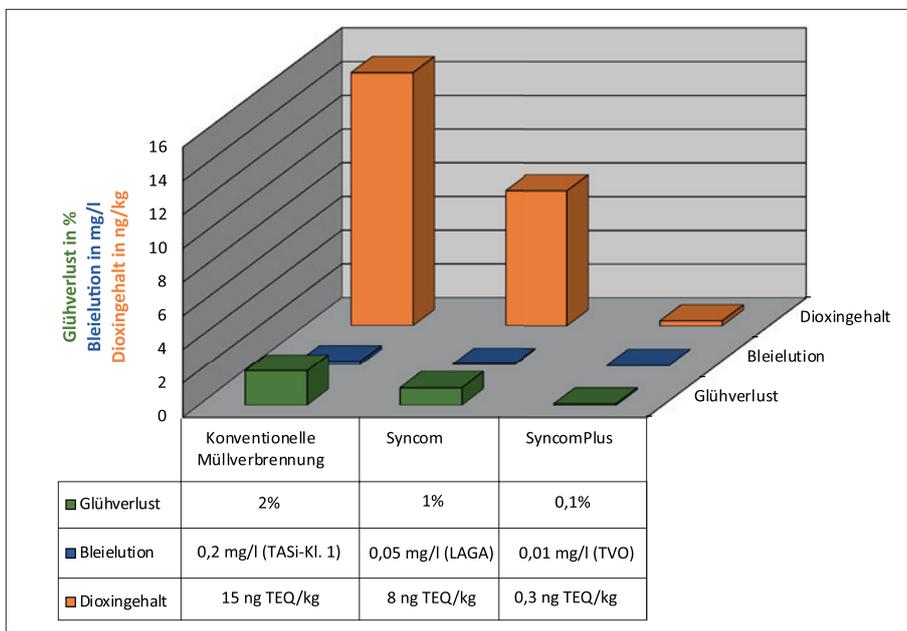


Abbildung 9: Qualität von Rostasche der konventionellen Müllverbrennung, SYNCOM- und SYNCOMPlus-Granulat – beispielhafte Darstellung mit typischen Werten ohne Alterung [21]

Zur Ausführung kommt die Wirbelschichtfeuerung einerseits als stationäre Wirbelschicht, bei der das Bettmaterial im Feuerraum verbleibt. Im Gegensatz dazu wird andererseits bei der zirkulierenden Wirbelschicht das Bettmaterial mit dem Abgas aus dem Feuerraum abgetragen, über nachgeschaltete Abscheider von Asche und Verunreinigungen gereinigt und dem Feuerraum nach einer ggf. gewünschten Kühlung wieder zugeführt.

### 2.2.3 Verbrennungs-Nachverbrenungsverfahren mit Entwicklungspotential

Die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüsteten Anlagen bei Rost- und Wirbelschichtsystemen erfüllen die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für das Einleiten und Deponieren von Schadstoffen in Luft, Wasser und Boden. Dies wird auch durch den weit entwickelten aktuellen Stand der Technik in der Abgasreinigung gewährleistet (siehe auch Kapitel 2 „Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Abgasreinigung“).

Für innovative Entwicklungen in der Prozessführung – sogenannte *Primärmaßnahmen* – des thermischen Hauptverfahrens seien hier einige Beispiele genannt, die bereits Industriereife haben und großtechnisch – im Gegensatz zu Pilot- oder Versuchsanlagen – umgesetzt wurden.

#### 2.2.3.1 Sauerstoffanreicherung der Primärluft

Beim sogenannten Syncom-Verfahren wird der O<sub>2</sub>-Gehalt in der Primärluft durch Zugabe von Sauerstoffgas künstlich erhöht, so dass bei nahezu gleichem O<sub>2</sub>-Haushalt in der Brennkammer die Gesamtabgasmenge reduziert ist.

Die Temperaturen im Brennbett sind gegenüber der konventionellen Feuerung deutlich höher. Dies führt zu einer teilweisen Sinterung der Asche. Der Ausbrand der Asche und die Elution von Schwermetallen werden dadurch signifikant verbessert (vgl. Abbildung 9).

Durch die Sauerstoffanreicherung werden in Kombination mit einer Abgasrezirkulation die Abgasmengen um 35 % gegenüber einer konventionellen Abfallverbrennung verringert. Ohne Abgasrezirkulation beträgt die Minderung des Abgasvolumen-

stroms etwa 20%, dies bedingt eine niedrigere Flugaschemenge und niedrigere Emissionsfrachten der Anlage. [20]

Seit 2004/2005 befinden sich 2 Anlagen mit dem Syncomverfahren im kommerziellen Betrieb.

In einer Weiterentwicklung wird beim SyncomPlus-Verfahren durch eine Abtrennung aller nicht vollständig gesinterten Rostaschebestandteile sowie deren Rückführung in die Feuerung anstatt Asche ein vollständig gesintertes Produkt erzeugt. Das SyncomPlus-Granulat ist weitgehend frei von unverbranntem Kohlenstoff ( $TOC < 0,1\%$ ), der Schwermetallgehalt des Eluats liegt unterhalb der Grenzwerte für Trinkwasser [21]. Das Verfahren wurde in großtechnischen Anlagen im Pilotversuch erprobt und die Werte aus Abbildung 9 nachgewiesen, bislang befindet sich keine Anlage mit dem Verfahren durchgehend in Betrieb. Allerdings zeigt sich, dass mit entsprechendem Aufwand die Ökoeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen signifikant verbessert werden kann.

### 2.2.3.2 Stickoxid-Reduktion durch Primärmaßnahmen

Durch Primärmaßnahmen lassen sich sehr effizient Stickoxid ( $NO_x$ )-Emissionen mindern und gleichzeitig der Wirkungsgrad der Anlage steigern. Das VLN-Verfahren (Very Low  $NO_x$ ) basiert auf dem Absaugen überschüssiger Verbrennungsgase oberhalb des hinteren Rostbereichs in Kombination mit reduzierten Sekundärluftdrücken. Hierdurch werden im unteren Feuerraum der Sauerstoffüberschuss reduziert und die Temperaturen erhöht. Dies führt zu einer Förderung der chemischen Reaktionen, die das aus dem Brennstoff gebildete  $NO_x$  wieder zum Teil zu Stickstoff abbauen.

Das abgesaugte VLN-Gas wird als Mischgas im oberen Bereich des Feuerraums wieder zugeführt. Hierdurch wird eine optimale Durchmischung der Abgase mit dem auf dieser Ebene optional zugeführten Ammoniak oder Harnstoff (SNCR) gewährleistet [22].

Damit sind höhere Leistungsdichten, also kompaktere Kraftwerke, möglich, die gleichzeitig unter Berücksichtigung der spezifischen Kosten emissionsärmer betrieben werden können.

Allgemein kann über eine gestufte Verbrennung, teilweise unterstützt durch den Einsatz von Rauchgasrezirkulation, eine deutliche  $NO_x$ -Reduzierung erreicht werden, mit der allerdings in der Regel der Grenzwert nicht sicher unterschritten werden kann.

### 2.2.3.3 Korrosion

Die oben beschriebenen Maßnahmen zu Effizienzsteigerungen der Anlagen werden zum Teil über eine Absenkung des Sauerstoffüberschusses der Verbrennung erreicht. Die klassische MVA wird normalerweise bei moderaten  $O_2$ -Gehalten und Abgastemperaturen betrieben, um Korrosion, bedingt durch nicht beeinflussbare Konzentrationen von Chlor, Schwefel sowie ihrer Verbindungen im Abgasstrom, entgegenzuwirken. Zusätzlich dazu lässt sich durch eine angepasste Fahrweise an die Verschmutzung der Heizflächen, beispielsweise mit einem Bruttowärmeregler, die Anlage automatisch dem Verschmutzungsverhalten angepasst fahren. Dies wirkt sich positiv auf Reisezeit und Korrosion aus, da nicht wie beim Dampfmengenregler bei verschmutztem Kessel die Bruttowärme erhöht wird, was noch mehr Verschmut-

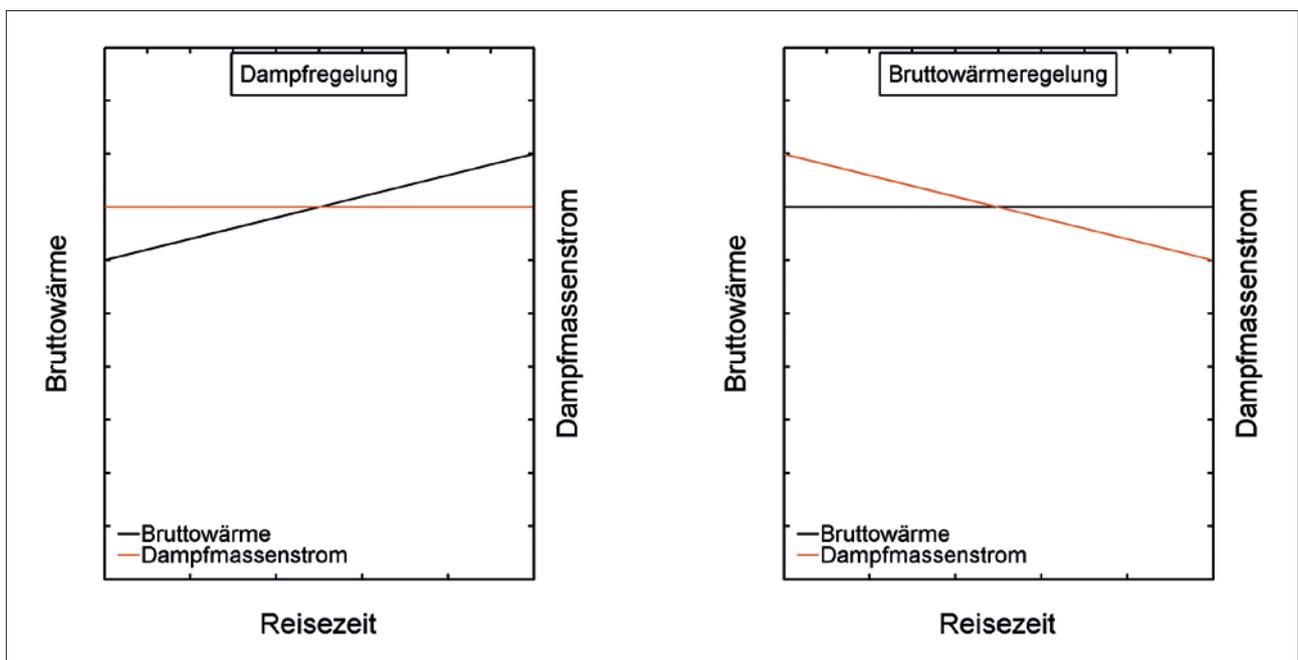


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Dampfregelung (links) und der Bruttowärmeregulierung (rechts) über die Reisezeit [25]

zung bewirkt und erhöhte Abgastemperaturen nach sich zieht, die laut Fingern'schen Korrosionsdiagramm eine erhöhte Korrosionsneigung bedeuten [23] (siehe auch: VGB-Merkblatt M215)

Üblicherweise wird für die Feuerungsregelung einer Abfallverbrennungsanlage die zu produzierende Dampfmenge als Sollwert vorgegeben. Die über den Brennstoff eingebrachte Bruttowärme steigt bei konstantem Dampfsollwert über die Reisezeit der Anlage an, da wie oben beschrieben die Verschmutzung der Wärmeübertragerflächen mit der Zeit den Wirkungsgrad des Kessels reduziert (Abbildung 10, links).

Bei der Bruttowärmeregulierung hingegen wird die mithilfe der Online-Bilanzierung ermittelte, eingebrachte Bruttowärme über die Reisezeit konstant gehalten. Dies führt dazu, dass zu Beginn der Reisezeit bei sauberem Kessel eine höhere Dampfmenge gefahren wird als am Ende der Reisezeit bei verschmutztem Kessel (Abbildung 10, rechts). Die produzierte Dampfmenge über die Reisezeit bleibt theoretisch gleich und ist im realen Anlagenbetrieb eher etwas höher [30].

Die Fahrweise mit Bruttowärmeregler führt daher zu einem schonenderen Anlagenbetrieb und erhöht die gesamte Lebensdauer der Anlage.

Des Weiteren wurde in den letzten Jahren durch Weiterentwicklung, der Feuerführung, der Feuerfestzustellungen und dem Einsatz von Beschichtungen (z.B. Cladding, Vernickelung) bis in den konvektiven Teil des Kessels unkontrollierter Korrosion massiv entgegengewirkt.

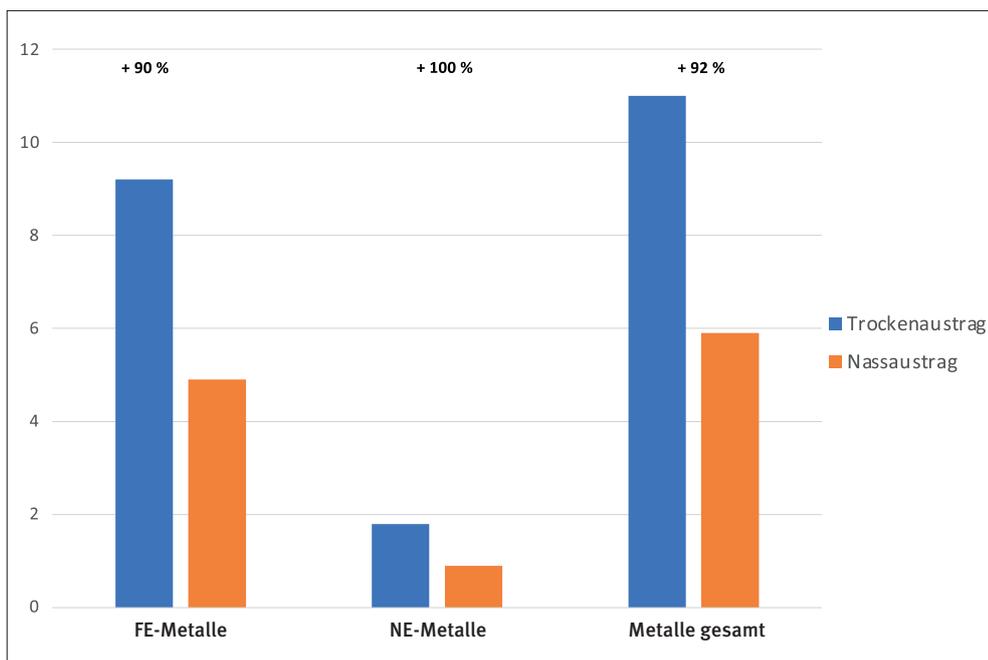


Abbildung 11: Rückgewinnungsrate Nass-Trocken [25]

#### 2.2.3.4 Innovatives Potenzial von trockenen Ascheaustragsystemen

Der Begriff „Trockenentäschung“ beschreibt zunächst, dass das Entäschungssystem weitestgehend wasserfrei betrieben wird. Nachfolgend soll zusammenfassend auf das innovative Potential der Trockenentäschung in der MVA eingegangen werden.

Vorteile der Trockenentäschung finden sich vor allem bei der nachträglichen Aufbereitung. Die Trockenasche ist ein Schüttgut, das sich gut fraktionieren lässt und auch im industriellen Maßstab auf unter 0,3 mm gesiebt werden kann. Die interpartikulären Kräfte zwischen Metallen und mineralischen Bestandteilen sind gering, so dass eine Abtrennung leichtfällt. Dadurch, dass keine schockartige Abkühlung und Unterbindung der Oxidationsprozesse stattfinden, ist der organische Anteil der Trockenasche (TOC) meist geringer als bei nassentäschenden Anlagen. Ein wesentlicher ökonomischer Vorteil liegt in der geringeren Schüttdichte der trockenen Asche, da kein Wasser enthalten ist. Dies kann Logistik- und Entsorgungskosten stark senken.

Nachteilig ist die Staubbildung während des Entäschungsvorgangs und beim späteren Umschlag der Asche. Deshalb muss Trockenasche in geschlossenen Systemen geführt werden. [24] Hierdurch steigt der Anlagenaufwand und somit die Fixkosten entsprechender Anlagen.

Seit 2008 wird die Aufbereitung von trocken ausgetragener Rostasche bis 5 mm im Rahmen eines sogenannten Leuchtturmprojekts in der Schweiz an der Kehrichtverwertung Zürcher Oberland (KEZO) Hinwil erfolgreich betrieben. Die Technik hierfür wurde maßgeblich durch die Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR) unter Beteiligung von Anlagenbauern entwickelt. Die durch diese Anlage gewonnenen Erfahrungen fließen direkt in die Neuanlage der ZAV Recycling AG ein. 2013 begann der Bau der weltweit ersten Trockenaschenaufbereitungsanlage für die gesamte Rostasche im industriellen Maßstab am Standort Hinwil. Im Endausbau werden dort 200.000 t trocken ausgetragene Rostaschen pro Jahr aufbereitet mit dem

Ziel einer maximalen Rückgewinnung von Fe- sowie NE-Leichtmetalle und NE-Schwermetalle und der Erzeugung von Produkten maximaler Qualität. Dazu soll die trocken ausgetragene Asche aller Siedlungsabfall-Verbrennungsanlagen aus dem Kanton Zürich zentral in Hinwil behandelt werden.

Der oben angesprochene Vorteil des trockenen Austrags im Vergleich zum Nassaustrag von Rostaschen bei der Rückgewinnung von Metallen wird in Abbildung 11 deutlich.

Mögliche Konzentrationen von Metallen in der Rostasche und in der nachgeschalteten Aufbereitung, die in der Anlage des Zweckverbands Kehrriechtverwertung Zürcher Oberland (KEZO) Hinwil erreicht wurden, sind in Abbildung 12 für Kupfer und in Abbildung 13 für Aluminium dargestellt.

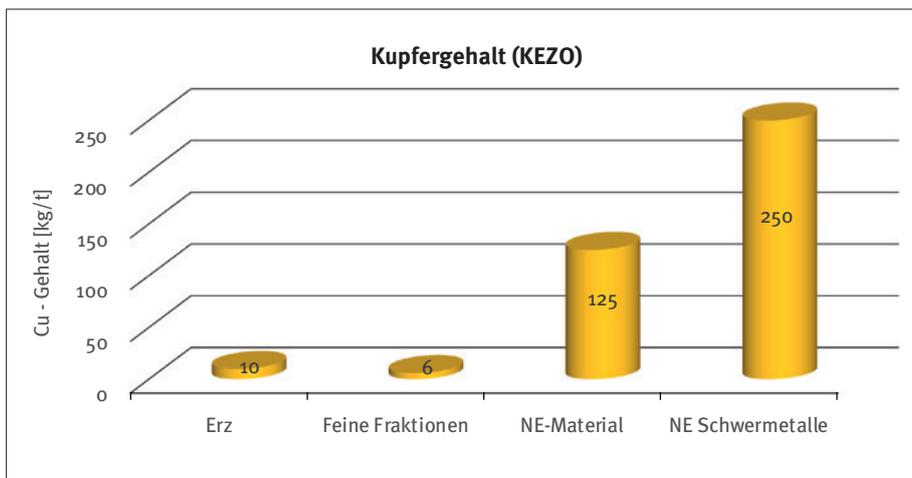


Abbildung 12: Rückgewinnung von Kupfer aus Trockenasche [26]

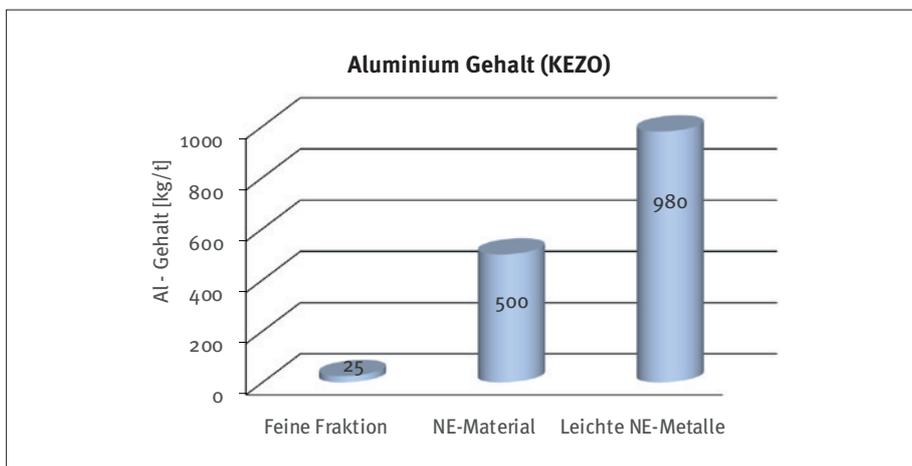


Abbildung 13: Rückgewinnung von Aluminium aus Trockenasche [26]

## 2.3 In Entwicklung befindliche Verfahren für die thermische Abfallbehandlung

Mit Bezug auf die Abfallhierarchie, nach der Abfälle zunächst zu vermeiden, für eine Wiedernutzung zu prüfen, dem Recycling zuzuführen oder, wenn nicht vermeidbar, zu deponieren sind, werden die „in Entwicklung befindlichen Verfahren“ meist im Zusammenhang mit dem (chemischen) Recycling (Stufe 3 der Abfallhierarchie) in Verbindung gebracht. Betrachtet man gemäß Tabelle 2 die Verbrennung vereinfacht als Reihenschaltung der Grundbausteine Trocknung, Entgasung und Vergasung mit anschließendem vollständigen Umsatz unverbrannter Bestandteile wie z.B. flüchtige Bestandteile und Koks aus den vorherigen Stufen, dann umfassen die „in Entwicklung befindlichen Verfahren“ die Kombination aus ein oder mehreren Grundbausteinen wie z.B. Pyrolyse oder Vergasung. Das Ziel dieser Verfahren ist entweder die stoffliche Nutzung eines oder mehrerer Produkte aus der Pyrolyse bzw. Vergasung oder die anschließende energetische Nutzung durch Verbrennen der Zwischenprodukte.

Im letzteren Fall spielen meist Überlegungen zu einer höheren Gesamteffizienz im Vergleich zur direkten Verbrennung der Abfälle eine Rolle.

Im Folgenden werden die Einzelvorgänge definiert, Beispiele für die Verschaltung gegeben sowie auch auf Plasmaverfahren und die Verflüssigung eingegangen. Weiterführende Angaben zu diesen alternativen bzw. in Entwicklung befindlichen Verfahren sind in der umfangreichen Studie [27] zu finden.

Die bisher gesammelten Erfahrungen aus dem Einsatz „in Entwicklung befindlicher Verfahren“ im Vergleich zur Abfallverbrennung werden unter „9.5 Schlussfolgerungen“ diskutiert.

### 2.3.1 Pyrolyse

Der Begriff Pyrolyse bezeichnet die thermochemische Zersetzung organischer Materialien mittels externer Wärmezufuhr unter Abwesenheit von (externem) Sauerstoff und sonstigen Oxidations- oder Reaktionsmit-

teln. In der Praxis lässt sich allerdings die Zufuhr geringer Mengen an Sauerstoff oder Luft zusammen mit den Einsatzstoffen meist nicht vermeiden.

Eine generelle prozessbedingte Herausforderung in der Pyrolyse sind (unabhängig vom Einsatzstoff) die kondensierbaren Gase, die es entweder erforderlich machen, Produktgas führende Anlagenkomponenten dauerhaft zu beheizen oder durch gezieltes Abkühlen das gebildete Kondensat unmittelbar nach dem Reaktor systematisch abzutrennen (z.B. durch Quenchen mit Wasser). Dabei ist es von Vorteil, staubförmige Bestandteile im Pyrolysegas vor dem Abkühlen weitestgehend aus dem Gas zu entfernen, da es sonst zu Vermischungen von Feststoffen und Kondensaten kommen kann, die zu Verbackungen und unerwünschten Ablagerungen an Wänden und Rohrleitungen führen können.

Ein weiteres, von erfahrenen Betreibern als kritisch eingestuftes Problem, das jedoch mit entsprechendem Aufwand zu lösen ist, ist die Abdichtung des Reaktors – insbesondere Drehöfen –, um die Bildung explosiver Mischungen im Reaktor oder eine toxische Kontamination der Umgebungsluft zu verhindern. Pyrolyseverfahren werden für spezielle Abfallfraktionen in der Regel zwischen 230 °C und maximal 650 °C gefahren [29].

Aufgrund der technischen Randbedingungen, beispielsweise in Drehrohröfen, werden die Abfälle nicht wie bei Abfallverbrennungsanlagen mit Rosttechnologie über einen Stößel zugeführt, sondern in der Regel über eine Schnecke. Die Schneckenförderung hat den Vorteil, dass sie „stopft“ und damit die Abdichtung zur Umgebung gewährleistet. Allerdings müssen die Abfälle entsprechend aufbereitet werden, um förderfähig zu sein. Dies geschieht in der Regel über eine ein-, maximal zweistufige Zerkleinerung, z.B. in Form eines Schredders. In Pyrolyseverfahren werden daher eher bereits mindestens mechanisch aufbereitete Abfälle (Ersatz- oder Substitutbrennstoffe) eingesetzt.

#### **Pyrolyse als Teilschritt von Verbrennungs- und Schmelzverfahren**

Das Prinzip dieses Verfahrenstyps besteht aus einer Pyrolyse gekoppelt mit einer Verbrennung der Pyrolysegase zusammen mit dem verbliebenen Koks. Mit dieser zweistufigen Verbrennung gemäß Tabelle 2 Fall (B.) lassen sich durch geringere Luftüberschüsse (Gesamtluftzahl geringer als bei der klassischen Abfallverbrennung Tabelle 2, Fall A.) gewöhnlich höhere Oxidationstemperaturen in der Verbrennungsstufe erreichen, die zu einem Schmelzen der anorganischen Abfallkomponenten führen.

Der Vorteil dieser Hochtemperaturverfahren besteht in den hohen Schlackequitäten. Das verglaste Produkt

verfügt über hervorragende (geringe) Elutionswerte und kann daher einer hochwertigen nachfolgenden Nutzung zugeführt werden.

Nachteilig sind der für gewöhnlich hohe Energieaufwand, z.T. durch zusätzlichen Einsatz von fossilen Energien, und die Komplexität der Verfahren. Aufgrund der hohen Kosten ist ein wirtschaftlicher Einsatz dieser Verfahren (auch bedingt durch die geringere Gesamtverfügbarkeit im Vergleich zu Abfallverbrennungsanlagen) unter den gegenwärtigen Marktbedingungen (Stand 2020) im europäischen Raum nicht möglich, in Japan hingegen werden diese Anlagen aufgrund anderer Randbedingungen betrieben.

#### **Eigenständige Pyrolyse**

Bei diesem Verfahrenstyp wird ein Teil des Produktgases (meist das Permanentgas, d.h. die nicht kondensierbaren Bestandteile) für gewöhnlich zur Deckung des internen Energiebedarfs der Pyrolyse genutzt, das Produkt der Karbonisierung, der Pyrolysereststoff<sup>7</sup>, wird jedoch nicht immer verwendet.

In dem BREF-Dokument zur Abfallverbrennung wird der Bereich der Pyrolyse oder Vergasung in Kapitel 5.1, Nr. 24 behandelt. Dort heißt es, dass lediglich Verfahren, die a) „eine Vergasung oder Pyrolyse mit einer nachfolgenden Verbrennung mit Energierückgewinnung und Rauchgasbehandlung kombinieren [...]“ und/oder b) „die nicht verbrannten Stoffe (fest, flüssig oder gasförmig) zurückgewinnen oder wiederverwenden“, dem Stand der Technik entsprechen.

Deshalb sollte der Betrieb einer eigenständigen Pyrolysezukünftig unbedingt die Nutzung und Verwertung der Pyrolysereststoffe einschließen.

#### **Pyrolyse als vorgelagertes Verfahren**

Wird die Pyrolyse als vorgelagertes Verfahren bzw. zur Vorbehandlung eingesetzt, werden die erzeugten Gas- und Koksfraktionen direkt in dem nachfolgenden Prozess verwertet (z.B. in Zement- bzw. Kalköfen oder in Kraftwerken). Auf diese Weise werden die organischen Anteile des Abfalls vollständig genutzt und, ein geeignetes Verarbeitungskonzept vorausgesetzt, metallische Bestandteile des Abfalls aus dem Pyrolysereststoff in hoher Qualität zurückgewonnen. Der mit der komplexen Reinigung des Pyrolysegas verbundenen Aufwand lässt sich vermeiden, wenn das Gas in einem nachfolgenden industriellen Verbrennungsprozess direkt genutzt wird.

Die „Homogenisierung“ des Brennstoffes Abfall durch Umwandlung zu Koks und Gas ermöglicht in der Regel eine Nutzung im nachfolgenden Verfahren, die deutlich effektiver als für unverarbeiteten Abfall ist. Für

<sup>7</sup> Zu verstehen als Stoffgemisch aus Kohlenstoff (Pyrolysekoks) sowie Inertmaterialien (Asche, Sand, Glas, Metall etc.)

den Ersatz fossiler Energieträger könnte eine solche thermochemische Vorbehandlung durch Pyrolyse sogar zwingend erforderlich sein, wobei der Abfall für die Pyrolyse mindestens mechanisch durch einen Schredder vorbehandelt werden muss. Bei dem Einsatz der Pyrolyse als vorgelagertes Verfahren bzw. zur Vorbehandlung handelt es sich somit um eine interessante Option, den Energiegehalt von Abfällen für verschiedene industrielle Anwendungen besser zugänglich zu machen.

### 2.3.2 Vergasung

Vergasungsverfahren dienen zur Umwandlung fester oder flüssiger Materialien in ein Gas mit hohem Heizwert, das im Vergleich zum ursprünglichen Feststoff besser (verfahrenstechnisch leichter) nutzbar ist. Dazu wird der Brennstoff mit dem Vergasungsmittel (Luft, Sauerstoff, Wasserstoff) bei Temperaturen von über 600 °C umgesetzt.

Bei Vergasungsverfahren mit anschließender stofflicher Nutzung des Synthesegases ist die Reinigung des erzeugten Gases die größte Herausforderung. Wird der Vergasungsvorgang allotherm betrieben (z.B. Vergasung mit Wasserdampf), muss zusätzlich von außen Wärme zugeführt werden, was den Prozess zusätzlich technisch erschwert.

#### Vergasung als Teilschritt einer gestuften Verbrennung

Hierbei handelt es sich um Verfahren mit einer unterstöchiometrischen Behandlung als ersten Schritt (Tabelle 2, Fall (C.)), dem sich unmittelbar die Verbrennung des erzeugten Gases anschließt. In diesen Fällen ist die Vergasung integraler Bestandteil des gestuften und insgesamt überstöchiometrischen Verbrennungsverfahrens und daher keine „echte“ Vergasung.

Trotzdem wird dieser Verfahrenstyp oft als Vergasung bezeichnet, was eher Marketingzwecken dient. In einigen Ländern werden in Entwicklung befindliche thermische Abfallbehandlungsanlagen (z.B. durch Renewables Obligation Certificates (ROCs) in Großbritannien) gefördert.

Bei dem Verfahren gibt es einige technische Vorteile, insbesondere die geringeren Investitionskosten aufgrund der im Vergleich zur Abfallverbrennung einfacheren Technologie, die Möglichkeit der Reduktion von Stickoxiden durch stufenweise Verbrennung und der geringe Wärmeverlust mit dem Abgas aufgrund des verringerten Abgasstroms.

Allerdings geht die einfachere Technologie zu Lasten der Flexibilität und des Betriebsmanagements. Anlagen, in denen die Vergasung nur der erste Schritt eines gestuften Verbrennungsverfahrens ist, sind als Verbrennungsanlagen zu betrachten. Es handelt sich daher nicht um alternative thermische Verfahren.

#### Vergasung als Teilschritt von Verbrennungs-/Schmelzverfahren

Dieser Verfahrenstyp zeichnet sich dadurch aus, dass auf die anfängliche Vergasung entweder im gleichen oder in einem nachfolgenden Reaktor eine Hochtemperaturverbrennung folgt, bei der entweder die gesamten anorganischen Abfallbestandteile oder nur die Flugasche eingeschmolzen und verglast werden.

Grundsätzlich gilt hier das Gleiche wie für Schmelzverfahren mit einer Pyrolysestufe vor der Hochtemperaturverbrennung. Der Vorteil bzw. zusätzliche Nutzen liegt in der hohen erreichbaren Schlackequalität (geringe Eluierbarkeit). Nachteile sind der meist hohe Energiebedarf und die Komplexität der Anlage.

Schmelzverfahren mit einer Vergasung im ersten Schritt einer thermochemischen Behandlung sind kostspielig und werden nur eingesetzt, wenn besondere (gesetzliche) Bestimmungen und Anforderungen vorliegen, so z.B. in Japan, wo das Einschmelzen der bei der Abfallbehandlung erzeugten Aschen gesetzlich vorgeschrieben wurde. Solange derartige Regelungen jedoch nicht bestehen, werden sich diese Verfahren wirtschaftlich im Vergleich zur Abfallverbrennung nicht durchsetzen.

#### Vergasung zur Herstellung von Synthesegas

Verfahren dieser Art standen und stehen immer noch im Zentrum des Interesses von Entwicklern und Forschern (Tabelle 2, Fall (E.)). Das Ziel besteht dabei in der Erzeugung eines hochwertigen Brenngases aus Abfall, das anschließend – nach entsprechender Aufbereitung – zur Erzeugung von mechanischer Energie in Motoren und Turbinen, als abfallbasierter Brennstoff oder sogar in Brennstoffzellen eingesetzt werden kann. Diskutiert wird auch eine Rückführung in die chemische Produktion.

Da Abfall ein äußerst heterogenes und komplexes Einsatzmaterial ist, erfordern diese Verfahren eine höchst aufwändige Anlagentechnik. Der Anspruch, Gase hoher Qualität zu erzeugen, bedingt häufig die Verwendung von Sauerstoff oder Dampf als Vergasungsmittel anstelle von Luft, was den Aufwand beispielsweise durch eine vorgeschaltete Luftzerlegung weiter erhöht.

Die größte Herausforderung besteht generell in der Gasreinigung. Staub und Teere müssen aus dem Produktgas entfernt werden, bevor es der beabsichtigten hochwertigen Nutzung zugeführt werden kann. Dies erfordert mehrstufige Gasreinigungsverfahren, bei denen sowohl Rückstände als auch Abwasser entstehen können. Die Nutzung der Gase in Verbrennungsmotoren verursacht a) Probleme, wie z.B. hohe Emissionen stabiler Gasbestandteile (CO, CH<sub>4</sub>, Benzol), die im Motor nicht vollständig oxidieren, oder b) die Neubildung von Schadstoffen wie Formaldehyd.

Erfahrungen aus Japan oder Deutschland zeigen, dass die Erzeugung, Konditionierung und hochwertige Nutzung von Produktgasen aus der Abfallvergasung technisch machbar und ein längerer Betrieb derartiger Anlagen möglich sind. Allerdings führen die komplexen Bedingungen zu hohen Investitionskosten mit einem entsprechend hohen Aufwand für Betrieb und Wartung. Unter den gegebenen Bedingungen (Stand 2020) ist dieses Verfahrenskonzept daher unwirtschaftlich.

### **Vergasung als vorgelagertes Verfahren**

Ähnlich wie die Pyrolyse können auch Vergasungsverfahren zur Überführung des Energiegehalts aus Abfällen mittels thermochemischer Umwandlung in ein Produkt (Gas, Koks) eingesetzt werden, das in industriellen Prozessen leichter handzuhaben ist als heterogene feste Abfälle und sich somit eignet, fossile Brennstoffe zu ersetzen.

Durch Kombination der Vergasung mit einem nachfolgenden industriellen Verfahren lassen sich deutlich einfachere Konzepte verwirklichen, die robuster sind als Verfahren zur Erzeugung eines hochwertigen Produktgases. Insbesondere kann dann auf eine komplexe Gasreinigung verzichtet werden. Ein Beispiel für die Kombination von Vergasung mit einem Folgeprozess ist das „EuPhoRe-Verfahren“, aus dem ein nährstoffhaltiges phosphatangereichertes Produkt aus Klärschlamm gewonnen wird [<https://www.euphore.de>].

Wie bei der Pyrolyse sind vorgelagerte Vergasungsverfahren eine interessante Option, insbesondere für spezielle Fraktionen, z.B. mit einem geringen Heizwert oder hohem Asche- oder Chlorgehalt, erscheinen sie sehr vielversprechend. Die Behandlung von unbehandeltem festen Siedlungsabfall ist aufgrund der technischen Komplexität jedoch nicht möglich.

### **2.3.3 Plasmaverfahren**

Bei der Plasmabehandlung handelt es sich um ein Verfahren mit direkter Wärmeübertragung durch ionisiertes Gas. Ein Prozessgas (entweder oxidierend oder inert) wird durch Zufuhr einer hohen spezifischen thermischen, elektrischen oder elektromagnetischen Energiemenge ionisiert. Das Plasma wird in Plasmabrennern durch Anlegen einer Spannung zwischen zwei Elektroden und Lichtbogenentladung erzeugt.

Plasmaverfahren wurden in der Abfallwirtschaft entwickelt, um kritische Abfallfraktionen (z.B. Asbest) zu verglasen. Zahlreiche Unternehmen versuchen derzeit, Plasmaverfahren zur Behandlung von Abfall zu etablieren. Verfahrenskonzepte umfassen sowohl die Plasmabehandlung des gesamten Abfalls als auch die thermische Behandlung kritischer Fraktionen, wie Flugasche, Filterstaub oder das erzeugte Produktgas.

Verfahren dieser Art zeichnen sich durch sehr hohe Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten aus. Die Technologie ist vergleichsweise stör anfällig. Elektroden haben eine kurze Lebensdauer und auch das elektronische System zur Plasmaerzeugung ist anfällig.

Bisher hat noch kein Plasmaverfahren seine technische Reife im industriellen Dauerbetrieb unter Beweis stellen können. Würde die erforderliche technische Reife jedoch erreicht, könnte das Plasmaverfahren für die Behandlung bestimmter problematischer Abfallfraktionen interessant sein. Dies wird allerdings nur der Fall sein, wenn eine solche Behandlung gesetzlich gefordert würde. Andernfalls werden die hohen Ausgaben eine Etablierung im Markt verhindern.

Es ist – auch aufgrund des hohen Energiebedarfs, der technischen Anfälligkeit und der hohen Verfahrenskosten – unwahrscheinlich, dass Plasmaverfahren für die industrielle Behandlung von festem Siedlungsabfall eingesetzt werden.

### **2.3.4 Verflüssigungsverfahren**

Verflüssigungsverfahren dienen der Herstellung einer kohlenwasserstoffreichen flüssigen Produktfraktion, die als Brennstoff eingesetzt werden kann. Die Betriebstemperaturen dieser Verfahren liegen zwischen 300 und 400°C. Katalysatoren in der öligen Phase sollen die Umwandlungsrate und Produktqualität verbessern.

Die Zersetzungstemperatur der meisten Kunststoffe liegt im Bereich der Betriebstemperaturen von Verflüssigungsverfahren. Daher ist eine Zersetzung von Kunststofffraktionen mittels Verflüssigung grundsätzlich möglich.

Die Umwandlung anderer Abfallanteile, wie z.B. Papier oder Biomasse, zu hochwertigen Produktölen ist nicht sinnvoll. Insbesondere biogene Materialien sind aufgrund ihres hohen Sauerstoffgehalts in der Weiternutzung der flüssigen Produkte problematisch. Um eine Qualität der Öle wie aus Raffinerieprozessen von Rohöl zu erreichen, muss mindestens ein hydrierender Verfahrensschritt angeschlossen werden.

Die Wirkung und Funktion von Katalysatoren und deren Stabilität bei kontinuierlichem Betrieb sind insbesondere durch die Heteroatome wie Schwefel, Chlor und Stickstoff noch ungeklärt. Auch ist offen, welche Produktqualitäten mit Verflüssigungsverfahren erzielt werden können. Schon eine Bilanzierung hinsichtlich Masse und Energie ist aufgrund der Nutzung von Ölen zum Anfahrvorgang eine Herausforderung.

Verschiedene Pilotanlagen haben bereits Produktöle im Kampagnenbetrieb hergestellt. Die Qualität dieser Öle reicht allerdings für die Direktvermarktung als Brennstoff

nicht aus. Um die notwendigen Produkteigenschaften zu erzielen, ist eine Nachbehandlung, z.B. eine Hydrierung in Raffinerien, erforderlich.

Auch wenn sich Verflüssigungsverfahren in Zukunft als technisch machbar erweisen sollten, beispielsweise in Kombination mit geeigneten Nachbehandlungsverfahren, kommt eine direkte Verflüssigung von festem Siedlungsabfall nicht infrage. Lediglich die Behandlung von aufbereiteten Kunststofffraktionen, überwiegend aus einem Material, erscheint möglich. Es bleibt abzuwarten, ob die relativ geringe Produktqualität diesen Aufwand rechtfertigt.

### 2.3.5 Schlussfolgerung

Versuche, wiederverwendbare Stoffe aus Abfall zurückzugewinnen, sind so alt wie die Abfallwirtschaft selbst. Faszinierend ist insbesondere die Idee, Energieträger höheren Werts und höherer Qualität und, falls möglich, sogar normgerechte Brennstoffe zu erzeugen.

Tatsache bleibt jedoch, dass bisher in der Geschichte der Abfallwirtschaft – angefangen bei ersten Versuchen Ende des 19. Jahrhunderts bis heute – sogenannte in Entwicklung befindliche thermische Verfahren dauerhaft nur als unabhängige Abfallbehandlungsverfahren eingesetzt werden konnten, wenn dies durch besondere politische oder gesellschaftliche Vorgaben ermöglicht wurde (wie z.B. gesetzliche Bestimmungen für Hochtemperaturverfahren in Japan oder die geförderte Pyrolyse-pilotanlage in Burgau, Deutschland).

Von den vielen betrachteten Varianten in Entwicklung befindlicher thermischer Abfallbehandlungsverfahren sind derzeit nur Vorbehandlungsverfahren in Kombination mit anderen thermischen Verfahren (Kraftwerke, Zement- oder Kalkwerke), bei denen die erzeugten Produkte (Gas, evtl. Koks) unter optimierten Bedingungen (höherer elektrischer Wirkungsgrad des Kraftwerks) direkt weiterverwendet werden können, sinnvoll und eine in Teilen wirtschaftliche Alternative zur thermischen Abfallbehandlung.

Interessant sind auch Verfahren, die eine Behandlung spezieller Fraktionen, wie z.B. hochtoxischer oder chlorkontaminierter Substanzen, oder Materialien mit geringem Heizwert, wie z.B. kontaminierte Erde, die sich nicht für die autotherme Verbrennung eignen, ermöglichen. Auch für das chemische Recycling von Kunststoffabfallfraktionen könnten einige der beschriebenen Verfahren mit mechanischer Vorbehandlung, Sortierung, Pyrolyse und anschließender Gasaufbereitung vielversprechend sein. In besonderen Fällen rechtfertigt die ökologische Notwendigkeit einer hochwertigen Behandlung problematischer Abfallmaterialien eine kostenintensive Behandlung einschließlich energieintensiver Plasmaverfahren.

Eigenständige Verfahren, bei denen die Produkte nicht vollständig inertisiert werden, sind eher problematisch. Die Erzeugung nicht marktfähiger Pyrolysekoks beispielsweise führt zu zusätzlichen Folgekosten für die Produktentsorgung. Unter solchen Bedingungen scheint ein wirtschaftlicher Betrieb kaum möglich. Entsprechend dem aktuell gültigen BREF-Dokument zur Abfallverbrennung sind Verfahren nur die ‚beste verfügbare Technik‘, wenn sie „mit einer nachfolgenden Verbrennungsstufe mit Energierückgewinnung“ kombiniert werden oder wenn „die nicht verbrannten Stoffe zurückgewonnen oder wiederverwendet werden“ [28].

Besonders wenn Verfahren sehr einfach ausgelegt sind (z.B. Tieftemperaturpyrolyse oder direkte Verflüssigung), erfordert die Konditionierung der Produkte einen beträchtlichen Aufwand, sei es die Konditionierung des Gases nach der Pyrolyse/Vergasung oder die Raffinierung des Brennstoffes nach der Verflüssigung. Der vermeintliche Vorteil eines einfachen Verfahrens geht dann zu Lasten einer höheren Komplexität der Produktbehandlung. Entsprechend ist die Nachbehandlung der Schwachpunkt dieser Verfahren. In einigen Fällen wird sie während der Entwicklung sogar komplett ignoriert.

Alle hier untersuchten in Entwicklung befindlichen thermischen Verfahren erfordern einen höheren Behandlungsaufwand als die klassische rostgestützte Abfallverbrennung. Generell ist eine gründliche Vorbehandlung der Einsatzstoffe nötig. Zumindest ist es notwendig, den Abfall zu zerkleinern und oft auch zu pulverisieren und Metalle und inerte Stoffe abzutrennen. Einige Verfahren erfordern sogar die vorherige Trocknung oder Pelletierung der Einsatzstoffe. Die wenigen japanischen Schmelzverfahren, die ohne eine Abfallkonditionierung auskommen, sind betrieblich äußerst anspruchsvoll.

Wie Beispiele aus Japan oder Deutschland zeigen, führt auch eine Betriebserfahrung von mehreren Jahren nicht zu einer nennenswerten Verringerung des hohen Aufwands für den Betrieb komplexer Anlagen. Vor diesem Hintergrund scheint das Argument vertretbar, dass in Entwicklung befindliche Technologien zur thermischen Abfallbehandlung der klassischen Abfallverbrennung derzeit nicht ebenbürtig sind, weil Betriebserfahrungen fehlen und weitere Optimierungen erforderlich sind. Die „fehlende Ebenbürtigkeit“ drückt sich beispielsweise durch den „Technology Readiness Level“ (TRL) von 6 bis 7 aus, der für Demonstrationsanlagen (Prototyp im Einsatz) steht. Abfallverbrennungsanlagen nach dem Stand der Technik liegen beim maximalen Wert von 9 (System geprüft).

Abbildung 14 zeigt den Versuch, die hier untersuchten Verfahrensvarianten im Hinblick auf den technischen und finanziellen Aufwand und die möglichen Vorteile zu klassifizieren. Ein solcher Vorteil ist beispielsweise die

Möglichkeit, bestimmte Produktqualitäten zu erreichen oder strenge gesetzliche Anforderungen zu erfüllen.

Sehr vorteilhaft in diesem Sinn sind Schmelz- und Plasmaprozeduren. Sie sind jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden und können nur realisiert werden, wenn dies gesetzlich gefordert wird.

Auch vorgelagerte Anlagen erscheinen sehr vorteilhaft, da sie die effiziente Rezyklierung von Materialien und/oder die energetische Nutzung teilweise problematischer Fraktionen ermöglichen. Teilen sich diese vorgelagerten Anlagen die erforderliche Infrastruktur mit der Hauptanlage, ist eine Realisierung der Verfahren bei relativ geringen Kosten möglich.

Auch gestufte Verbrennungsverfahren mit Teilvergastungsstufen sind relativ preiswert, da sie oft auf einfacheren technischen Lösungen basieren als die konventionellen Abfallverbrennungsanlagen.

Die gestrichelte horizontale Linie im Diagramm symbolisiert die Mindestanforderungen, die für eine Implementierung im großen Maßstab erforderlich sind. Die wesentlichen Kriterien sind die Gesetzmäßigkeit (im Falle eigenständiger Anlagen zur Gaserzeugung ohne Koks-

rezyklierung ist diese nicht gegeben) und Produktqualität (im Falle von Verflüssigungsverfahren ohne Nachbehandlung noch nicht nachgewiesen).

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Abfallverbrennung für die Behandlung von Reststoffen Stand der Technik ist. Keines der sogenannten in Entwicklung befindlichen Verfahren hat bisher für gemischten Restabfall eine vergleichbare Leistung und Flexibilität unter vergleichbaren wirtschaftlichen und gesetzlichen Bedingungen erzielt.

## 2.4 Ausblick

Niedrige Emissionen, hohe Verfügbarkeiten und hohe energetische Wirkungsgrade sind heute bei der Neuauslegung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen Stand der Technik. Bestandsanlagen wurden in den letzten Jahren und werden weiterhin so modernisiert oder ersetzt, dass alle Emissionsrichtlinien eingehalten werden. In Zukunft wird die thermische Abfallbehandlung aber nicht nur energieeffizient und schadstoffarm zu betreiben sein. Sie wird darüber hinaus eine wichtige Position in der Kreislaufwirtschaft zur weitgehenden Rückgewinnung von Ressourcen spielen (siehe hierzu Kapitel 4 „Wertstoffrückgewinnung“).

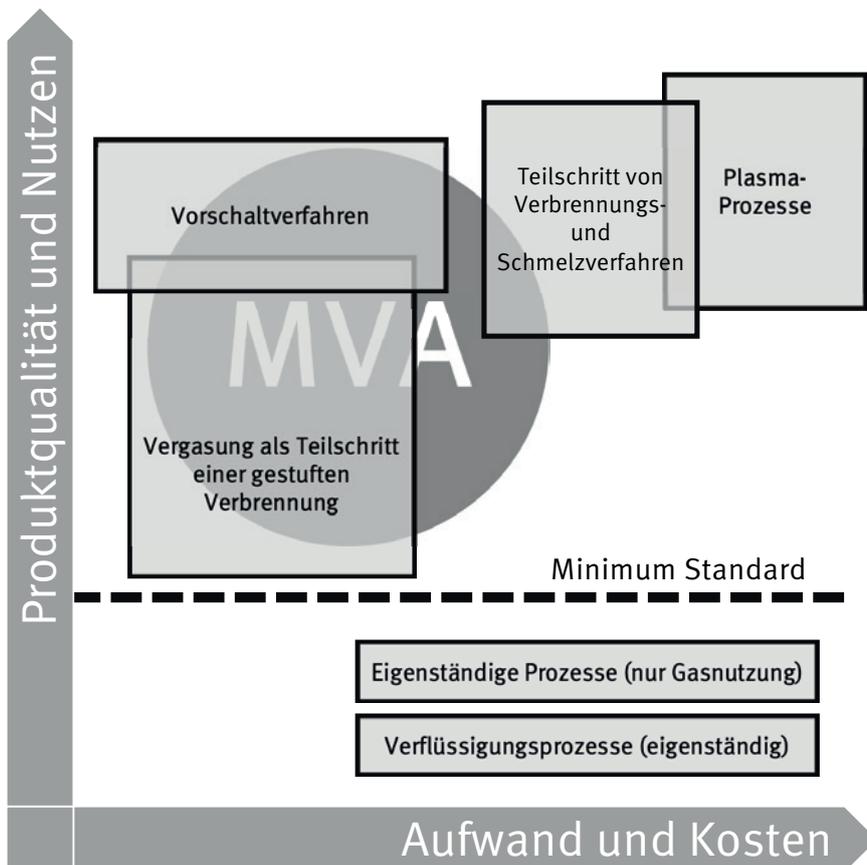


Abbildung 14: In Entwicklung befindliche thermische Verfahren – Versuch einer Klassifikation hinsichtlich Aufwand und Nutzen, basierend auf [27]

# 3 Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Abgasreinigung

## 3.1 Einleitung

Die Abgasreinigung hinter Abfallverbrennungsanlagen nahm ihre Anfänge mit dem vermehrten Bau solcher Anlagen und der in den 1960er Jahren zunehmenden Luftverschmutzung. Die anwachsenden Umweltbelastungen veranlassten den Gesetzgeber, erste Emissionsgrenzwerte zur Reinhaltung der Luft zu erlassen. Durch nicht abreiende Umweltskandale und immer bessere Analytik und Messtechnik wurden die Emissionsgrenzwerte stetig reduziert. Die Folge hieraus waren eine fortdauernde Anpassung und Weiterentwicklung der erforderlichen Prozessstufen in der Abgasreinigung. Das furte dazu, dass selbst unter anspruchsvollen Bedingungen eines inhomogenen Brennstoffs (Abfall) niedrigste Emissionen erreicht werden und die Abfallverbrennung heute nicht mehr im Fokus einer Umweltbelastung steht. Die Notwendigkeit der Abgasreinigung wird heute von niemand mehr in Frage gestellt und ist zu einer akzeptierten Selbstverständlichkeit geworden.

Die Motivation heutiger Entwicklungen liegt neben einer effizienten Schadgasabscheidung in Themen wie Energieeffizienz, Minimierung der Einsatzstoffe bis hin zur Wertstoffgewinnung aus der Abgasreinigung. Hierin

werden auch die zukünftigen Herausforderungen gesehen, hauptsächlich bei der Standortwahl für Neuanlagen zur Nutzung von Synergien. Dies wird insbesondere für die Planungen von den prophezeiten Mega-Citys Berücksichtigung finden müssen.

## 3.2 Überblick

Die Abgasreinigung in modernen Abfallverbrennungsanlagen hat heute einen sehr hohen technischen Standard erreicht und erlaubt es, die ohnehin sehr niedrigen gesetzlichen Grenzwerte zum Teil um ein Vielfaches zu unterschreiten. Es haben sich verschiedene Verfahren etabliert, die nach dem zentralen Prozess zur Abscheidung von sauren Gasen in trockene, konditioniert trockene und nasse Verfahren eingeteilt werden. Da der Brennstoff Abfall in seiner Zusammensetzung sehr inhomogen ist und zeitlichen Schwankungen unterliegt, sind die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen im Konzentrationsniveau ebenfalls sehr unterschiedlich. Dies ist möglicherweise einer der Gründe, warum die gesetzlichen Emissionsanforderungen bei der Abfallverbrennung im Vergleich zu den übrigen Verbrennungs- und Feuerungsanlagen am strengsten sind. Die stetige Reduzierung der Emissionsgrenzwerte in den vergangenen Jahrzehnten furte dazu,

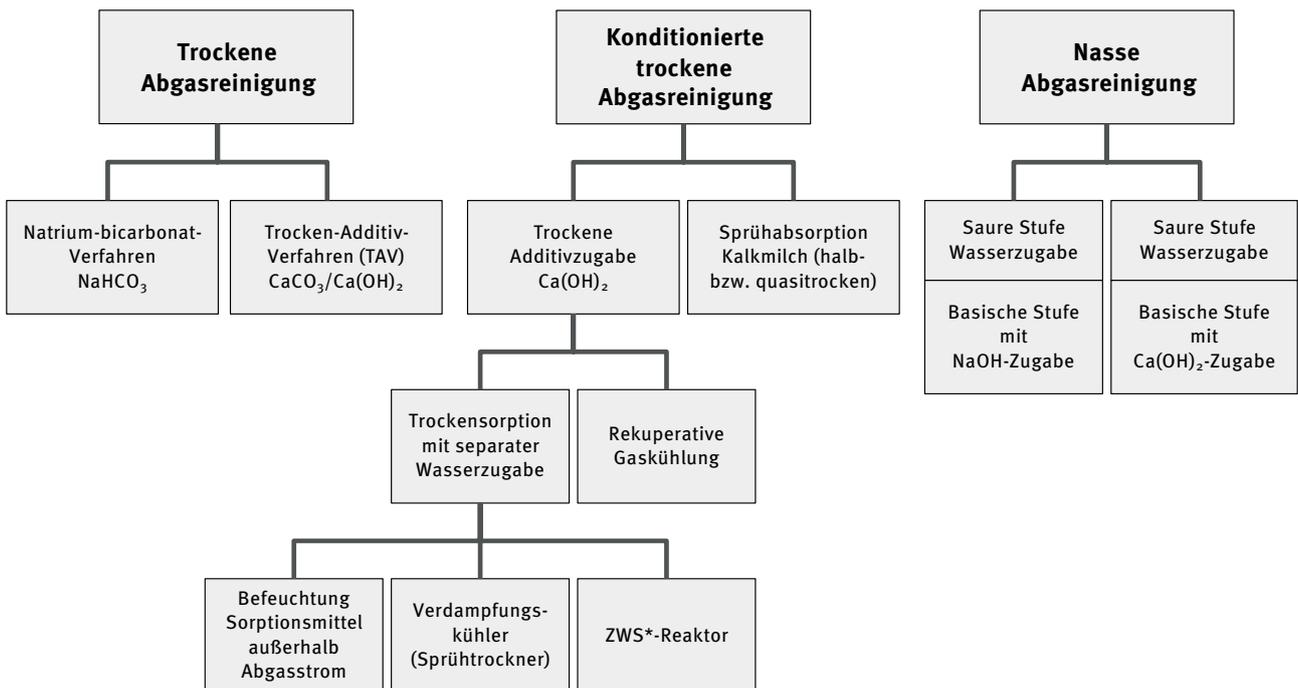


Abbildung 15: Einteilung der Abgasreinigungsverfahren zur Abscheidung von HCl, SOx und HF (\* Zirkulierende Wirbelschicht) [1]

dass eine Vielzahl von leistungsfähigen Abscheideverfahren entwickelt wurden und eingesetzt werden.

Die Abgase hinter Abfallverbrennungsanlagen enthalten zum einen Partikel, die in Form von Flugstaub aus der Feuerung und dem Kessel ausgetragen werden, und zum anderen gasförmige Bestandteile, die bei der Verbrennung freigesetzt werden und zum Teil untereinander reagieren und Verbindungen eingehen.

Die Abreinigung der Partikel erfolgt vorwiegend mit filternden Abscheidern an einem Gewebe (Gewebefilter) oder mit elektrostatischen Abscheidern (Elektrofilter) durch Erzeugung eines elektrischen Feldes und die Ionisation des Staubes. Der Einsatz von Flieh- und Schwerkraftabscheidern dient heute meist nur einer verfahrensbedingten Staubvorabscheidung. Die gasförmigen Bestandteile werden durch Adsorption an einer Feststoffoberfläche oder durch Absorption in einer Flüssigkeit abgeschieden. Hierfür werden unterschiedliche chemisch und/oder physikalisch wirkende Sorptionsmittel eingesetzt. Die über die chemische Reaktion gebildeten Umsetzungsprodukte fallen größtenteils als gelöste oder trockene Salze an.

Grundsätzlich können die in der Praxis eingesetzten Abgasreinigungssysteme zur Abscheidung saurer Schadgasbestandteile (SO<sub>3</sub>, HCl, HF, SO<sub>2</sub>) in trockene, konditioniert trockene und nasse Verfahren eingeteilt werden.

Die trockenen und konditioniert trockenen Verfahren sind meist einstufige Systeme, die aus einer Konditionierungsstufe bzw. einem Reaktionsraum (Reaktor),

Sorptionsmittelzugabe und einem Staubabscheider, in der Regel einem Gewebefilter, bestehen.

Die nassen Abgasreinigungsverfahren zur Minderung der sauren Schadgasbestandteile basieren auf einer Gas-Flüssigkeits-Reaktion. In Abhängigkeit der abzuscheidenden Gasmoleküle und dem eingesetzten Absorbens basiert die Abscheidung auf einer physikalischen und/oder chemischen Absorption. Zum Einsatz kommen Wäscher verschiedenster Bauarten, z. B. Füllkörperwäscher, Sprühwäscher und Venturiwäscher.

Abbildung 15 gibt einen Überblick zur Einteilung und Benennung der einzelnen Verfahren zur Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile.

Mit welcher Reinigungsstufe bzw. welchem Verfahren die vom Gesetzgeber definierten Schadgasbestandteile grundsätzlich abgeschieden werden können, ist der Verfahrensmatrix in Tabelle 3 zu entnehmen.

Hieraus wird ersichtlich, dass es eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Abscheidung desselben Schadstoffes gibt. Es gibt simultane Verfahren, wie z.B. die Trockensorptionsverfahren mit Kalkhydrat (Ca(OH)<sub>2</sub>) oder Natriumhydrogencarbonat (NaHCO<sub>3</sub>), die neben der Abscheidung der sauren Schadgasbestandteile HCl, HF und SO<sub>2</sub> unter Verwendung von Aktiv-Koks/Kohle auch gleichzeitig Schwermetalle und Dioxine/Furane an einem Sorptionsfilter (Gewebefilter) zurückhalten [2].

Bei den trockenen Verfahren besteht keine Möglichkeit zur selektiven Abscheidung und somit auch keine Op-

**Tabelle 3: Verfahrensmatrix zur Abscheidung verschiedener Luftschadstoffe [2]**

Komponente	E-Filter <sup>1)</sup>	Gewebefilter <sup>1)</sup>	Sorptionsfilter	Fest-/Wanderbett-Filter	Wäscher	SNCR	SCR
Staub	X	X	X		{X}		
HCl			X	{X}	X		
HF			X	{X}	X		
SO <sub>2</sub>			X	X	X		
NO <sub>x</sub>				X	{X}	X	X
Hg		X	X	X	X		
Cd, Tl	{X}	{X}	X	X	{X}		
Sb ..... Sn	{X}	{X}	X	X	{X}		
As ..... Cr	{X}	{X}	X	X	{X}		
PCDD/PCDF	{X}	{X}	X	X	X		X
NH <sub>3</sub>				X	X		X
X geeignet	(x) bedingt geeignet	{x} staubgebundene	<sup>1)</sup> reine Staubabscheider				

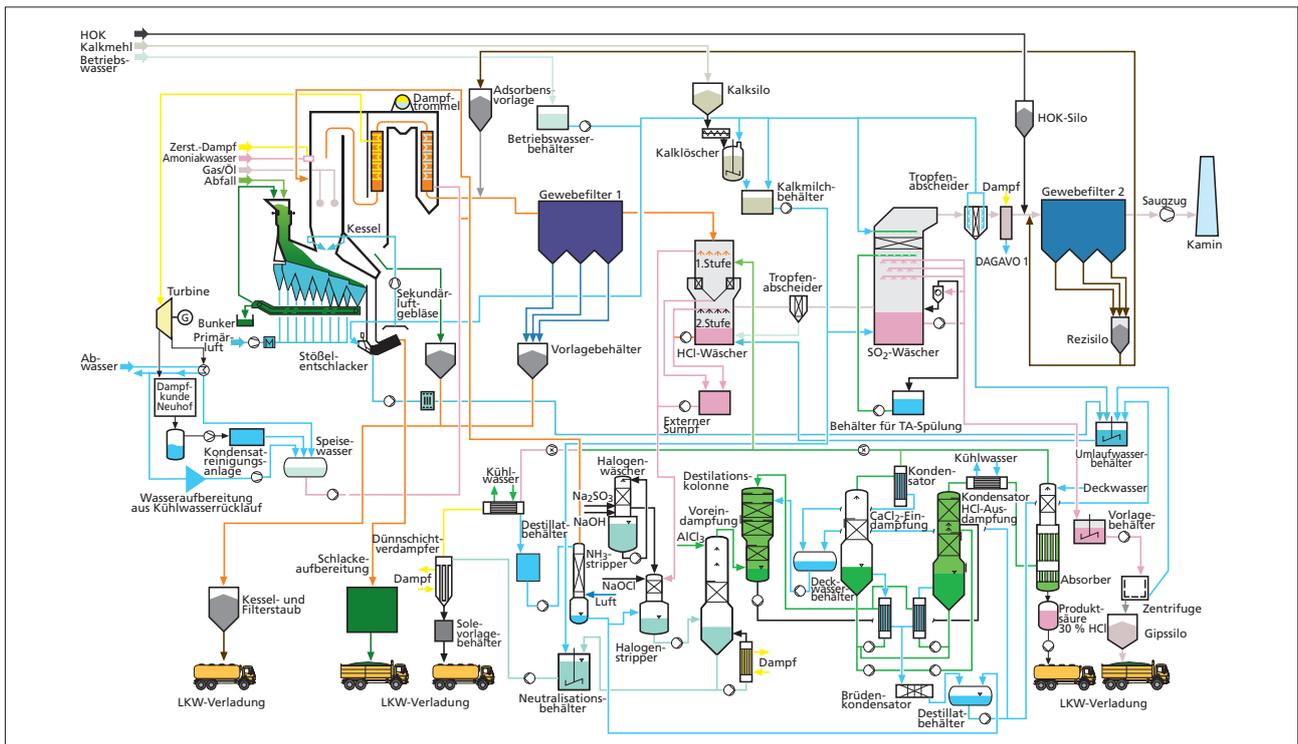


Abbildung 16: Abgasreinigung gemäß 17. BImSchV mit Wertstoffgewinnung [3]

tion zur Wertstoffrückgewinnung aus den Reaktionsprodukten, wie dies beim Einsatz eines nassen Verfahrens grundsätzlich möglich ist. Der Nachteil von nassen Verfahren ist jedoch, dass durch die hohen selektiven Abscheideleistungen zwar eine effiziente Reinigung sichergestellt werden kann, für die Vielzahl der Schadstoffbestandteile aber mehrere Verfahrensstufen notwendig werden. Dies spiegelt sich in einem höheren investiven und betrieblichen (z.B. hoher Druckverlust) Aufwand wider, wie beispielhaft in Abbildung 16 zu erkennen ist.

In den 1990er Jahren wurden einige Abgasreinigungssysteme mit selektiven Reinigungsstufen erweitert, so dass möglichst viele Wertstoffe und wenige Reststoffe aus der Abgasbehandlung entstehen. Da sich jedoch sehr schnell herausstellte, dass es für die gewonnenen Wertstoffe aus der Abgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen keinen Abnehmer-Markt in Deutschland gab und außerdem der Energie- und anlagentechnische Aufwand zur Herstellung sehr hoch war, hatten diese er-

weiterten Verfahrensstufen keine Zukunft. Im gleichen Zeitraum dieses Erkenntnisgewinns erlebte die Abfallverbrennung eine Metamorphose von der reinen Abfallbeseitigung hin zur energetischen Abfallverwertung. Die Energieeffizienz stand ab jetzt im Fokus und spiegelte sich in den neuen und umgebauten Anlagen entsprechend wider. Über den auf EU-Ebene eingeführten „politischen“ Energie-Effizienz-Faktor „R1“<sup>8</sup> werden bis heute die Energieeffizienz der Abfallverbrennungsanlagen bewertet und eine entsprechende Einteilung in Entsorger- und/oder Verwerter-Status vorgenommen. Der Verwerter-Status einer Verbrennungsanlage zur Behandlung fester Siedlungsabfälle liegt vor, wenn deren R1-Faktor mindestens 0,60 bzw. 0,65 beträgt (Genehmigung vor 01.01.2009 bzw. nach dem 31.12.2008).

Die letzte vorgenommene Emissions-Grenzwertverschärfung wurde in der Novellierung der 17. BImSchV vom Mai 2013 vollzogen. Angesichts der insgesamt gestiegenen Feinstaub-Immissionen sowie der Stickoxide-

8 In einer Anlage zur Verbrennung von Siedlungsabfällen mit R1-Energieeffizienz können Abfälle beseitigt und verwertet werden. Für feste Siedlungsabfälle gilt die Fiktion der energetischen Verwertung nach der Fußnote zu R1 ohne weiteren Nachweis der Substitution von Brennstoffen, wenn die Anlage zur Verbrennung fester Siedlungsabfälle das vorgegebene R1-Kriterium der Fußnote zu R1 erreicht hat.

Gem. Fußnotenote zu R1, Anh. II der AbfRL (RL 2008/98) fallen unter das Verwertungsverfahren R1 „Hauptverwendung als Brennstoff oder anderes Mittel der Energieerzeugung“ Verbrennungsanlagen, deren Zweck in der Behandlung fester Siedlungsabfälle besteht nur dann, wenn deren Energieeffizienz ausreichend ist (Energieeffizienzformel, kurz: R1-Formel). Die Regelung ist in das KrWG wortgleich übernommen worden.

Die Anwendung und Auslegung der R1-Energieeffizienzformel ist konkretisiert in den Leitlinien der Kommission mit dem Titel „Leitlinien zur Auslegung der R1-Energieeffizienzformel für Verbrennungsanlagen, deren Zweck in der Behandlung fester Siedlungsabfälle besteht, gemäß Anhang II der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle“ vom Juni 2011.

Siehe auch: LAGA M38 - Vollzugsanweisung für die Anwendung der R1-Formel für die energetische Verwertung von Abfällen in Siedlungsabfallverbrennungsanlagen gemäß der EU-Abfallrahmenrichtlinie.

Emissionen wurden diese Werte entsprechend reduziert, bei gleichzeitiger erstmaliger Einführung eines Ammoniak-Emissionsgrenzwertes. Des Weiteren wurde der Emissionswert für Quecksilber im Rahmen des internationalen Quecksilberminderungsstrategie (United Nations Environment Programme, Dokument UNEP(DTIE)/Hg/CONF/4, Anhang II) verschärft, basierend auf der Minamata Folgekonferenz am 10.-11. Oktober 2013.

Der jüngste Gesetzgebungsvorgang ist die Novellierung des BVT-Merkblatts, der mit der Vorlage des Final Draft am 14. Dezember 2018 durch das Sevilla-Büro verabschiedet wurde. Am 3. Dezember 2019 ist das Waste Incineration BREF im EU-Amtsblatt veröffentlicht worden. Der Zeitraum für die nationale Umsetzung inkl. Übergangsfristen beträgt vier Jahren. Das bedeutet für die Bundesrepublik Deutschland, dass die 17. BImSchV bis spätestens Dezember 2023 novelliert sein muss.

### 3.3 Zukünftige Herausforderungen an Abgasreinigungsanlagen

Die heutigen Abgasreinigungssysteme sind in der Regel Unikate, deren Aufbau sehr häufig die Entwicklung der Emissionsgrenzwerte widerspiegelt, und die die Grenzwerte gesichert einhalten. Über die größtenteils kontinuierliche Emissionswertüberwachung ist gewährleistet, dass alle sich heute in Betrieb befindlichen Anlagen die Emissionsgrenzwerte sicher analysieren.

Eine bereits in der Vergangenheit bestehende, aber auch zukünftige Herausforderung an die Abgasreinigungsverfahren wird eine gesteigerte Energieeffizienz sein. Eine sehr umfangreiche und detaillierte Untersuchung von Karpf [2] zur Netto-Emissionsbilanz in Abhängigkeit des Energieaufwands zeigt, dass der notwendige Energieeinsatz für ein mehrstufiges Abgasreinigungssystem mit niedrigsten Emissionen nicht zwingend höher sein muss als bei einstufigen Verfahren. Das heutige und auch zukünftige Know-how effizienter Anlagen liegt nicht zwingend in der Neuentwicklung von Prozessen, sondern mehr in der intelligenten Verschaltung bewährter Verfahrensstufen. Ein Beispiel hierfür ist die Anlage Delfzijl (NL) (siehe Abbildung 17).

Die Abgasreinigung in Delfzijl basiert auf einem zwei-stufigen Verfahren zur Erreichung niedrigster Emissionswerte, wie sie in Tabelle 4 dargestellt sind. Die erste Stufe besteht aus einer reinen Trockensorption mit Gewebefilter, in dem bei einer Kesselaustrittstemperatur von ca. 230 °C Natriumhydrogencarbonat zur Hauptabscheidung der sauren Schadgasbestandteile eingeblasen wird. Unmittelbar nach der Trockensorptionsstufe erfolgt in einer SCR-Anlage die Abscheidung der Stickoxide ohne Wiederaufheizung und zusätzlichem Energieeinsatz bei ca. 230 °C. Die zweite Stufe besteht aus einer weiteren Trockensorptionsstufe mit Gewebefilter, jedoch basierend auf Normalkalkhydrat mit Dosierung von Herdofenkoks (HOK). Die Aufgabe dieser zweiten Stufe besteht

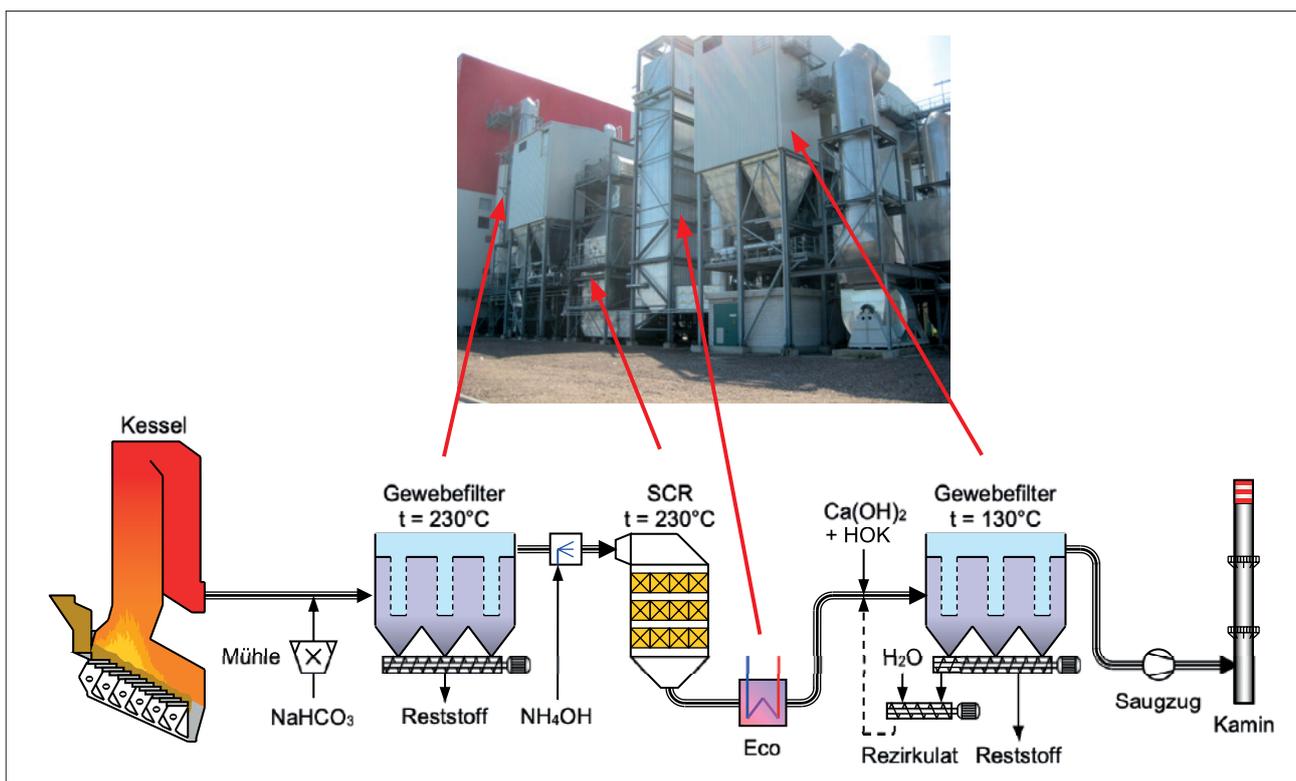


Abbildung 17: Abgasreinigung der Abfallverbrennungsanlage Delfzijl (NL) [4]

Tabelle 4: Emissionswerte der Anlage Delfzijl vom Jahr 2012 [4]

		Messwert hi. Bicarbonat Stufe	Messwert hinter Katalysator	Messwert Schornstein	Genehmigungs- wert
Staub	mg/m <sup>3</sup>	< 1	< 1	< 1	10
C <sub>ges</sub>	mg/m <sup>3</sup>			< 0,5	10
HCl	mg/m <sup>3</sup>	< 115	< 115	< 1	5
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	< 30	< 30	< 5	25
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	350	< 70	< 70	70
Hg	mg/m <sup>3</sup>			< 0,005	0,02
CO	mg/m <sup>3</sup>			< 10	50
NH <sub>3</sub>	mg/m <sup>3</sup>			< 2	5
Rauchgastemp.	°C	230	230	135	

im Wesentlichen darin, die Schwermetalle, insbesondere das Quecksilber sowie die Dioxine und Furane, durch Adsorption an Aktivkoks zu reduzieren. Des Weiteren erfolgt hier die Restabscheidung der sauren Schadgasbestandteile. Damit diese Abscheidung effektiv ist, wird das Abgas über einen ECO (Economiser, d.h. Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung) auf eine Temperatur von ca.

130 °C abgekühlt. Das bietet neben den günstigen Abscheidebedingungen eine erhebliche energetische Wirkungsgradverbesserung der Gesamtanlage. Die hierbei rückgewonnene Wärmeenergie beträgt 4.500 kW.

Das bedeutet, dass für zukünftige Standortüberlegungen und -planungen die Anlagen dort platziert werden müs-

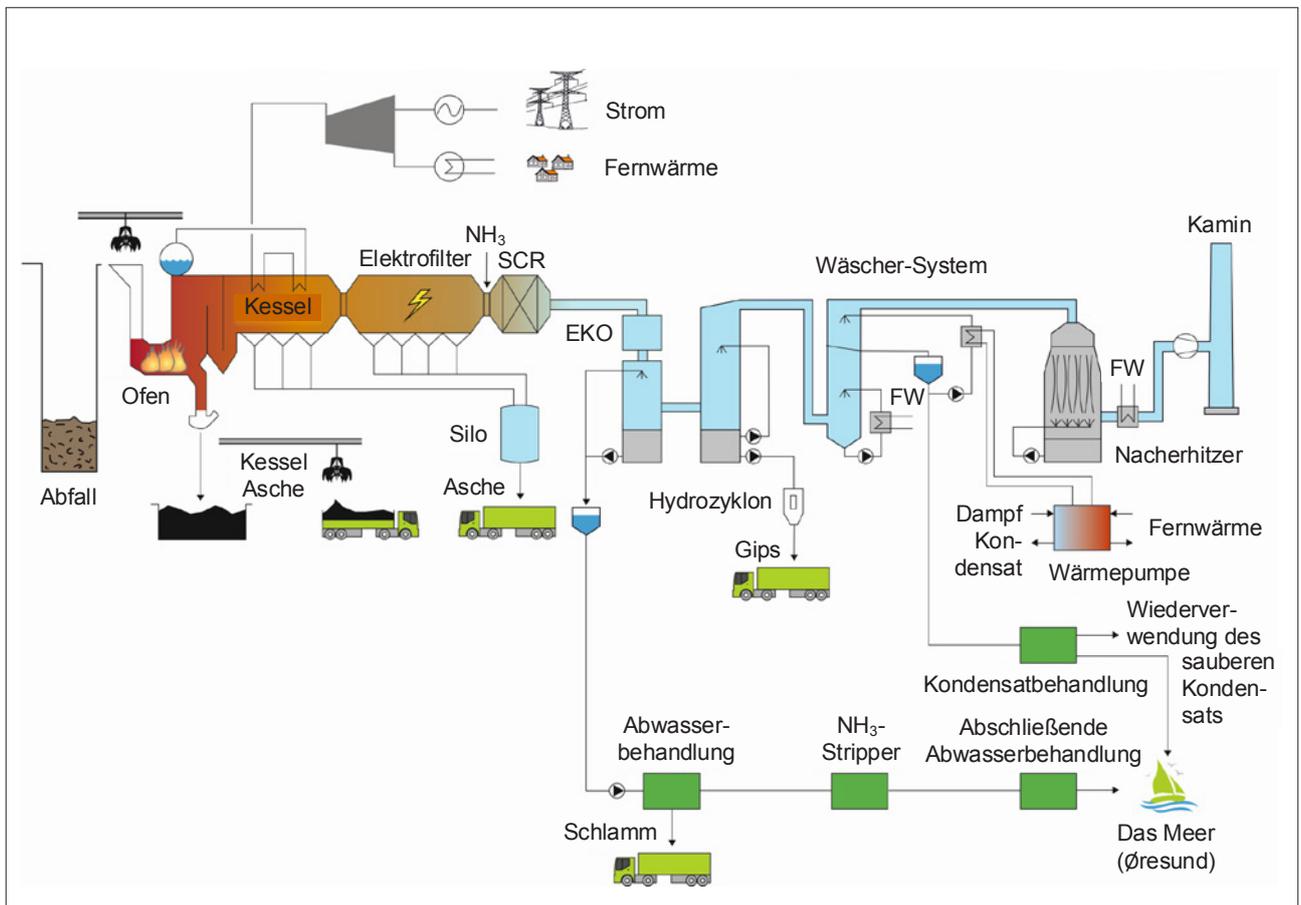


Abbildung 18: Abgasreinigung der Abfallverbrennungsanlage Kopenhagen, Dänemark [5]

sen, wo eine entsprechende Infrastruktur zur Energienutzung (z.B. Fernwärme) vorhanden ist. Durch die sehr effiziente mehrstufige Abgasreinigung stellen die Anlagen keine Umweltbelastung dar, selbst inmitten von Städten und Metropolen. Alternativ sind auch Standortmodelle möglich, wie sie jüngst in der dänischen Hauptstadt Kopenhagen umgesetzt wurden. Dort wurde die komplette Anlagengestaltung an die parallele Nutzung einer Freizeitanlage, inkl. Energienutzung, angepasst. Auch dort werden über eine effiziente mehrstufige Abgasreinigung (siehe Abbildung 18) kleinste Emissionswerte – bei maximaler Energienutzung – sichergestellt, sodass dies keine Umweltbelastung darstellt.

Die intelligente Verschaltung von Prozessstufen zur Energieoptimierung besitzt meist auch den Vorteil, dass die Prozessbedingungen und somit die Abscheideeffizienz und der Betriebsmittelaufwand bestmöglich sind.

Nichtsdestotrotz gibt es auch Neu- und Weiterentwicklungen, wie z.B. die Neuentwicklung von DeNOx-Katalysatoren, die als Niedertemperatur-Katalysatoren erstmals in Temperaturbereiche < 150 °C vorstoßen und damit ein vorgeschaltetes, kalkbasiertes Trockensorptionsverfahren ohne zusätzliche Aufheizung ermöglichen, was bislang

eine Domäne der mit Natriumbicarbonat betriebenen Verfahren war.

Neben der Energieeffizienz deuten aktuelle Diskussionen auf eine Renaissance der Wertstoffgewinnung aus dem Abgas hin, jedoch diesmal nicht auf die Gewinnung von z.B. Gips oder Salzsäure fokussiert, sondern auf die Überführung des Verbrennungsprodukts CO<sub>2</sub> zurück in den Kohlenstoffkreislauf, beispielsweise – nach einer CO<sub>2</sub>-Gaswäsche und einer anschließenden Umwandlung – in Form von Methanol. Ausgelöst werden solche Überlegungen durch politische Zielsetzungen zum Klimaschutz und der Dekarbonisierung unserer zukünftigen Energieversorgung.

Für einige Standorte von Abfallverbrennungsanlagen, die aufgrund ihrer umliegenden Infrastruktur keinerlei Möglichkeiten zur weitergehenden Energienutzung besitzen, kann die Methanol-Synthese eine sinnvolle Lösung darstellen. Die für die Methanol-Synthese und Wasserstoff-Elektrolyse benötigte Energie könnte dann zum Teil durch überschüssige thermische und elektrische Energie aus der Abfallverbrennung bereitgestellt werden (vgl. Abbildung 19). Eine alleinige Deckung des elektrischen Energiebedarfs für die Wasserstoff-Elek-

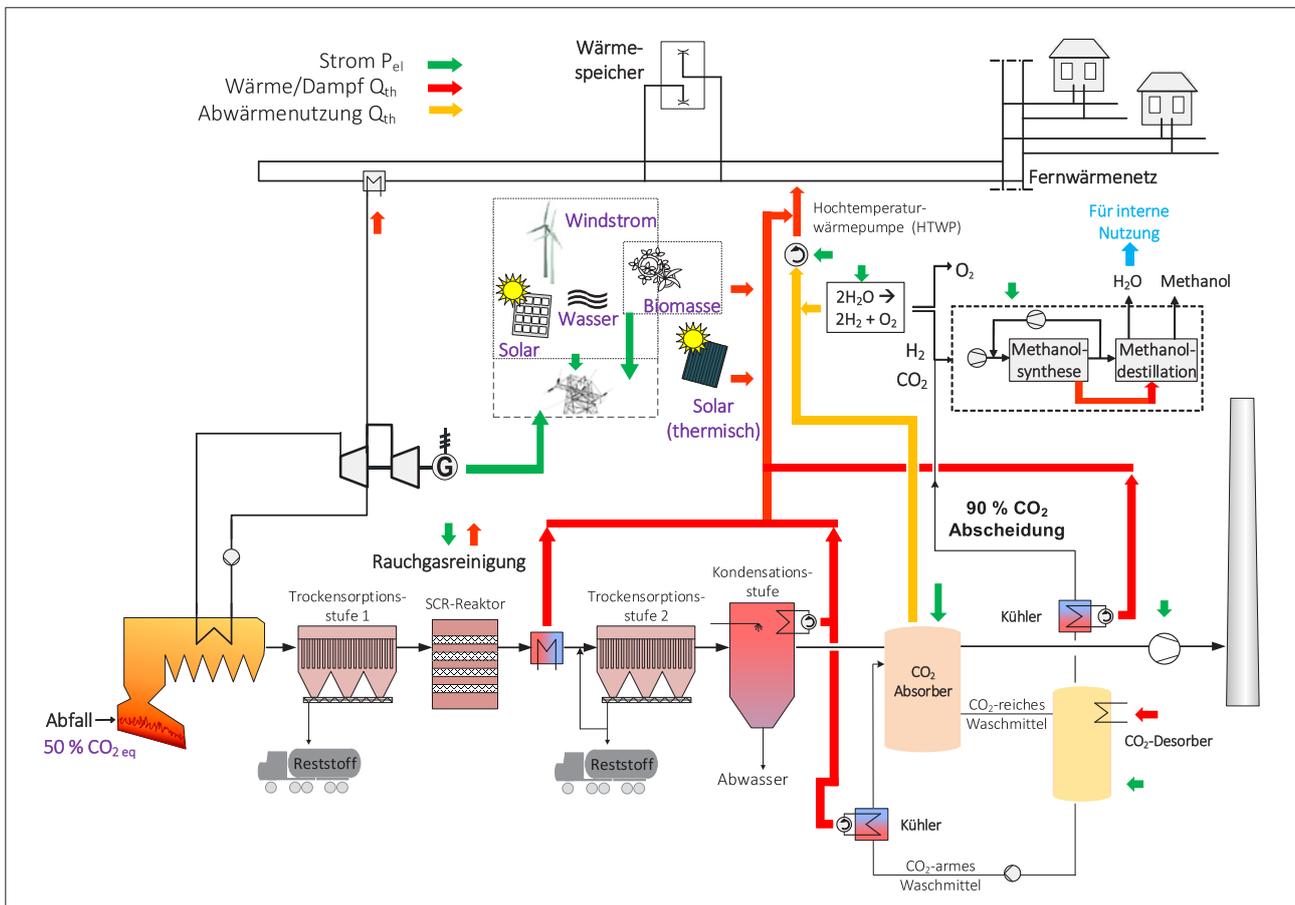


Abbildung 19: Energie- und Stoffkreisläufe einer modernen Abgasreinigungsanlage

trolyse und Methanol-Synthese ist aus eigener Kapazität aufgrund der relativ niedrigen elektrischen Nenn- bzw. Nettoleistung nur dann möglich, wenn lediglich ein kleiner Teil der CO<sub>2</sub>-Menge aus dem Abgas abgeschieden und verwertet wird.

Das bedeutet im Umkehrschluss, dass bei einer nahezu vollständigen CO<sub>2</sub>-Abscheidung (90 % Abscheidegrad) zusätzlich eine erhebliche Menge an elektrischer Energie aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden muss. In diesem Zusammenhang stellt sich dann die Frage, inwieweit dies als Speicher von volatil regenerativ erzeugtem elektrischen Strom dienen kann. Aber um die Funktion eines Speichersystems für überschüssige elektrische Energie aus Überangebotsphasen erfüllen zu können, müssen dann zusätzliche Komponenten für die Verdichtung und Speicherung des elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs sowie des aus dem Abgas abgeschiedenen Kohlendioxids bereitgestellt werden [6].

Wie sich bereits bei der Energieeffizienz gezeigt hat, kommt es nicht auf die Entwicklung komplett neuer Systeme oder Verfahren an, sondern vielmehr auf die intelligente Kombination von bestehenden Verfahren und die Nutzung von Synergien.

In diesem Sinne kann eine Symbiose in der Bereitstellung des CO<sub>2</sub> (Wertstoff) aus dem Abgas zu der überschüssigen volatilen regenerativ erzeugten elektrischen Energie für die Methanol-Synthese entstehen.

Ein anderer Ansatz für die Nutzung des im Abgas vorhandenen CO<sub>2</sub> wurde im niederländischen Twence durch die vor-Ort-Herstellung von Natriumbicarbonat aus CO<sub>2</sub> und Soda als Additiv für die Rauchgasreinigung bereits erfolgreich in die Praxis umgesetzt [7].

Im „ReNaBi“-Prozess [8] wird mit CO<sub>2</sub> aus dem Abgas aus Reststoffen der trockenen Rauchgasreinigung Natriumbicarbonat wiederhergestellt.

### 3.4 Zusammenfassung

Das heutige Emissionsniveau von Abgasreinigungsanlagen hinter Abfallverbrennungsanlagen grenzt z.T. an die Vertrauensbereiche der existierenden Messtechnik. Dennoch besteht für einzelne Verfahrensstufen grundsätzlich ein Optimierungspotential, was aber nicht die letztendlichen Herausforderungen darstellt.

Die zukünftigen Herausforderungen liegen vielmehr neben einer effizienten Schadgasabscheidung in Themen wie Energieeffizienz, Minimierung der Einsatzstoffe bis hin zur Wertstoffgewinnung aus der Abgasreinigung. Zusätzlich spielt insbesondere für Neuanlagen die Auswahl des Standorts eine wesentliche Rolle, damit Synergien genutzt werden können, was bei der Planung der prozessierten Mega-Citys Berücksichtigung finden muss.

Es wird nicht auf die Entwicklung komplett neuer Systeme oder Verfahren ankommen, sondern vielmehr auf die intelligente Kombination von bestehenden Verfahren und die Nutzung von Synergien.

## 4 Wertstoffrückgewinnung

### 4.1 Einleitung

Die erste Abfallverbrennungsanlage in Deutschland wurde 1896 in Betrieb genommen [1]. Grund für den Bau war damals die verheerende Cholera-Epidemie vier Jahre zuvor in Hamburg, ausgelöst durch miserable hygienische Verhältnisse, bei der 8.000 Menschen starben. Schon damals wurden aus den Rückständen Wertstoffe zurückgewonnen. Die mineralischen Verbrennungsrückstände der Hamburger Anlage erzielten Erlöse von 2 Reichsmark (RM) pro Kubikmeter und 15 RM pro Tonne Schrotteisen. Im Buch von Ungewitter aus dem Jahr 1938 werden die Verwertungswege für die mineralischen Rückstände aus der Abfallverbrennung aufgezählt: Straßenbaumaterial, Ersatzstoff für Kies bei der Betonherstellung und für die Herstellung von Zement [2]. Im Buch von Palm aus dem Jahr 1979 werden darüber hinaus auch noch die Abtrennung von Glas sowie die Separierung von NE-Metallen genannt [3].

Derzeit werden Rostaschen in Deutschland allerdings aufgrund z.T. inkonsistenter gesetzlicher Bestimmungen in den unterschiedlichen Bundesländern [4] überwiegend im Deponiebau verwendet. Dies ist allerdings schon heute, aber ganz besonders mittelfristig zu hinterfragen, da absehbar ist, dass die Möglichkeit der Verwertung als Deponiebaustoff aufgrund einer abnehmenden Anzahl neu zu bauender Deponien abnehmen wird, so dass nach neuen Wegen oder weiter zu entwickelnden Konzepten zur Verwertung der Rostasche gesucht werden muss.

Aktuell werden in Deutschland in rund 100 thermischen Abfallbehandlungsanlagen (davon 66 Siedlungsabfallverbrennungsanlagen) rund 20 Millionen Tonnen brennbare Abfälle verbrannt [5]. Nach Angaben der Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. - ITAD [6] sind im Jahr 2017 in Deutschland ca. 5,9 Millionen t Rostasche angefallen. Im Verlauf der Aufbereitung der Rostasche wurden nach dem Stand der Technik 413.000 t Eisen und 77.000 t NE-Metalle in 2017 in stückiger Form separiert. Der weitestgrößte Teil der Rostasche entfällt auf die mineralische Fraktion (89 %), in der die Metalle mit einer hohen Sauerstoffaffinität (Calcium, Aluminium, Magnesium usw.) in oxidischer Form in der Asche gebunden sind und unter wirtschaftlichen Bedingungen nicht wieder in metallischer Form zurückgewonnen werden können. In ihren Zusammensetzungen aber ähneln diese Oxide Rohstoffen, die unter Umständen z.B. zur Herstellung von Zement oder anderen Baustoffen verwendet werden können. Für die Herstellung von Zement [7] werden über-

wiegend die natürlichen Rohstoffe Kalkstein, Kreide und Ton eingesetzt, aus denen die erforderlichen Hauptbestandteile Calciumoxid (CaO) und Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>) sowie in geringeren Mengen Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) und Eisenoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) stammen.

Die Rostasche bildet mengenmäßig die größte Rückstandsfraktion. Nach einer Lagerung von einigen Wochen erfüllt die Rostasche im Regelfall die Anforderungen für die Deponieklasse 1 [8]. Allerdings wird der Großteil der Rostasche aufbereitet und verwertet. Zur Aufbereitung kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Für die Abtrennung der Eisen- und NE-Metalle werden magnetische Verfahren und die Wirbelstromtechnik eingesetzt. Für die mineralische Fraktion gibt es eine Vielzahl von Sortier- und Klassierungsverfahren, Waschverfahren und weitergehende thermische Verfahren [9]. Wurden bisher bei der Metallabtrennung vor allem die groberen Kornfraktionen aufbereitet, wird mittlerweile auch die Feinfraktion unter 4 bzw. unter 2 mm mit einbezogen, weil hier immer noch nennenswerte Mengen an wertvollen elementaren Metallen enthalten sind.

Von den rund 1,8 Millionen Tonnen Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen, die pro Jahr in Deutschland anfallen, wird der überwiegende Teil (64%) verbrannt, vor allem in Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen (460.000 t) [10]. Die Aschen aus den Monoverbrennungsanlagen haben im Mittel Phosphorkonzentrationen von 7,3% (Bereich 1,5 bis 13,1%) [11]. Dies macht die Aschen aus diesen Anlagen für die Rückgewinnung von Phosphor interessant.

### 4.2 Wertstoffrückgewinnung aus Rostaschen

Rostasche aus der thermischen Abfallbehandlung besteht aus bereits in den Siedlungsabfällen enthaltenen festen Phasen wie Glasstücken, Keramik, Asche und Metallen (Fe- und NE-Metalle) sowie neuen Phasen, die während des Verbrennungsprozesses gebildet werden [12]. Die fünf chemischen Hauptelemente in Rostasche sind Si, Ca, Fe, Al und Na. Während Si und Ca als Oxide und Silikate gebunden sind, kommen Al und Fe außer als Oxide auch in ihrer elementaren Form vor. Na liegt zusätzlich als Chlorid vor [13].

Rostasche ist ein extrem inhomogenes Material und seine genaue Zusammensetzung hängt stark von der Art des verbrannten Abfalls, den Bedingungen für die Verbrennung und der weiteren Behandlung ab [12, 14, 15].

Eine typische stoffliche Zusammensetzung ist

- » 9 % inertes Material (Glasscherben, Keramik, Steine etc. (9 %),
- » 1% Unverbranntes (Restorganik),
- » 10 % Metalle (davon 8 % Fe-Metalle und 2 % NE-Metalle, hauptsächlich Al und Cu bzw. Cu-Legierungen),
- » 40 % Asche und
- » 40 % Schmelzprodukte.

Kontakt mit Wasser führt bei Rostasche aufgrund der Bildung von Kalkhydrat ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) zu alkalischen pH-Werten von 12 und darüber. Aus dem Löslichkeitsprodukt von  $\text{Ca(OH)}_2$  ( $K_L=5,5 \times 10^{-6} \text{ mol}^3\text{L}^3$ ) lässt sich ein maximaler pH-Wert von 12,25 berechnen. Al wird unter alkalischen Bedingungen teilweise oxidiert und reagiert zu  $\text{Al(OH)}_3$  und  $\text{H}_2$ . Eine mehrwöchige Lagerung von Rostasche führt zu einer Carbonatisierung der Asche und einer Abnahme des pH-Wertes [16]. Kalkhydrat reagiert mit  $\text{CO}_2$  aus der Luft oder unter Einfluss von Regenwasser zu Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ), der deutlich schwerer löslich ist und keine pH-

Erhöhung beim Kontakt mit Wasser zur Folge hat. Die pH-Werte der resultierenden Eluate sinken daher auf Werte um 11 im Verlauf dieser Alterungsreaktionen. Dies führt zu sehr geringen Schwermetallfreisetzungen in standardisierten Auslaugtests und ermöglicht eine Verwertung der Rostasche als Ersatzbaustoff [17].

Die Inhomogenität der Rostasche zeigt sich vor allem in der chemischen Zusammensetzung. Die Elementgehalte schwanken zum Teil über mehr als eine Größenordnung, wie Tabelle 5 mit Durchschnitts-, Maximal- und Minimalwerten zeigt.

Die Aufbereitung von Rostaschen ermöglicht die Rückgewinnung von Wertstoffen. Bereits sehr lange praktiziert wird die Abtrennung von metallischem Eisen, anfangs vor allem mit der Intention, Deponieraum zu sparen [21]. In den Rostaschen sind allerdings auch Nichteisen-Metalle (NE-Metalle) wie Kupfer und Aluminium enthalten. Die Abtrennung von NE-Metallen gelingt mit der Wirbelstromtechnik. Zu Anfang wurde diese Technik in der Aufbereitung von Altglas eingesetzt [22], dann aber ab Mitte der 1990er Jahre zunehmend auch für Rostasche [23]. Inzwi-

Tabelle 5: Elementkonzentrationen in europäischen Rostaschen [18], Werte für Au und Ag [19, 20]

Substanz	Mittelwert	Min	Max	Substanz	Mittelwert	Min	Max
	mg/kg	mg/kg	mg/kg		mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ca	130.833	50.825	198.289	Ni	185	38	850
Si	82.713	61.060	96.078	Sn	181	52	737
Fe	58.714	34.216	118.220	F	148	13	1.779
Al	47.232	30.527	75.089	Sb	73,0	18,0	250,0
Na	21.379	12.308	34.791	Br	44,7	23,0	95,0
Mg	12.429	6.377	34.372	V	41,2	19,0	248,0
TOC *	10.092	1.350	42.760	Co	31,8	11,0	103,0
Cl	9.211	3.644	37.633	Mo	30,1	5,0	84,0
K	7.748	4.854	12.722	As	17,3	4,4	73,2
P	5.633	2.531	12.556	Ag	15,2	2,3	47,1
Ti	4.244	2.873	7.479	Li	14,0	2,0	29,0
S	3.862	1.310	16.808	Te	10,0	5,3	24,8
Cu	3.275	738	17.620	Tl	6,7	3,4	27,5
Zn	3.241	1.142	9.370	Se	5,2	2,3	12,2
Pb	1.309	197	6.441	Cd	4,8	1,1	117,0
Mn	1.173	644	2.248	Hg	2,3	1,39	9,69
Ba	1.102	760	2.970	Bi	2,1	0,05	11,3
Cr	353	115	852	Be	1,2	0,46	6,6
Sr	271	267	369	Au	1	0,4	1,6
Phosphat	248	10	1.360	Carbonat	61.073	26.160	103.800
B	198	30	532	O *	532.852		

\* TOC: gesamter organischer Kohlenstoff, O: Sauerstoff zur Bilanzierung auf 100%.

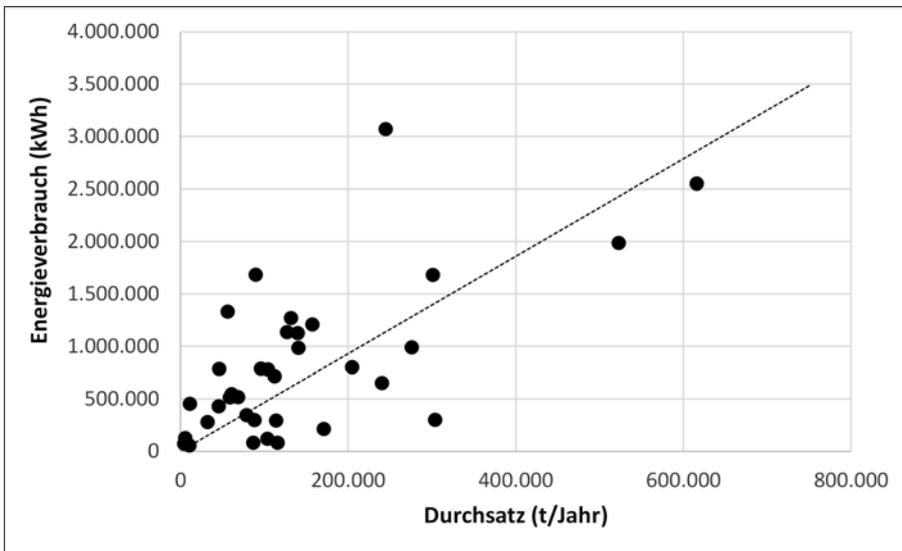


Abbildung 20: Energieverbrauch der Aufbereitungsaggregate in Rostasche-Aufbereitungsanlagen als Funktion des Durchsatzes [25]

schen gibt es Aufbereitungsanlagen mit bis zu 12 Wirbelstromscheidern für unterschiedliche Korngrößen [24].

Für die Erstellung des Referenzdokuments zur besten verfügbaren Technik (BVT) in der Abfallverbrennung [25] wurden neue Daten zur Aufbereitung von Rostaschen in Europa erhoben. Dazu wurden Fragebögen für die Erhebung anlagenspezifischer Daten zur Überprüfung des BVT-Merkblatts für Abfallverbrennungen an die Betreiber verschickt. Den Ergebnissen zufolge wurden im Jahr 2014 in 43 Anlagen aus 12 europäischen Ländern mehr als 6,2 Millionen Tonnen Rostasche behandelt. Im Durchschnitt wurden 6,3 Gew.-% Eisen- und 1,65 Gew.-% NE-Metalle abgetrennt. Der durchschnittliche Energieverbrauch (Strom und Treibstoffe für Maschinen) für den Anlagenbetrieb betrug 4,5 kWh pro Tonne behandelter Asche, bei einigen Anlagen jedoch bis zu 20 kWh, wie in Abbildung 20 [25] dargestellt.

Neben der bereits nach dem Stand der Technik praktizierten Abtrennung der stückigen Metalle hat die Abtrennung der Metalle aus der Feinfraktion sehr große

Vorteile, da einerseits hochpreisige Metalle zurückgewonnen werden können und andererseits die restliche mineralische Fraktion von diesen Metallen, die sehr wesentlich für das Auslaugverhalten verantwortlich sind, befreit wird. Im Hinblick auf die Werthaltigkeit der Metalle in der Feinfraktion der Rostasche stehen die Elemente Cu, Au und Ag [20, 26] im Fokus diverser Verfahrensentwicklungen, da für die elementaren Metalle hohe Erlöse erzielt werden, die deutlich über 1.000 EUR pro Tonne bei den NE-Metallen [27] liegen. Die Erlöse für Au übertreffen zum Teil die für Kupfer und Kupferlegierungen [28].

In der Feinfraktion (ca. 1,5 Mio. t/a in Deutschland) sind bei einer konservativen Betrachtung 0,3-0,4 % Cu enthalten (ca. 4.500-6.000 t/a), das, sofern es wirtschaftlich zurückgewonnen werden könnte, bei einem Kupferpreis von ca. 5.800 \$/t einem rein theoretischen Börsenwert von 26-35 Mio. \$/a entspräche. Da heute auf der Welt Kupfererze mit Kupfergehalten in dieser Größenordnung abgebaut werden, kann die Rostasche, unabhängig von Metallpreisschwankungen, unter diesem Aspekt als Wertstoff betrachtet werden. Darüber hinaus kann, basierend auf den Daten einer Müllverbrennungsanlage in der Schweiz [20], davon ausgegangen werden, dass Gold in einer Größenordnung von 1-2 ppm in der Feinfraktion (ca. 25 % der gesamten Rostasche) überwiegend vergesellschaftet mit Kupfer vorliegen kann. Damit entsprechen die Goldgehalte in der Feinfraktion der Rostasche den typischen Erzgehalten geogener Minen [29]. Bei einem Goldpreis von ca. 1.500 \$/Feinunze (31,1 g) entspräche der Goldgehalt in der Feinfraktion einem theoretischen Wert von 72 -144 Mio. \$/a. Da das Gold überwiegend vergesellschaftet mit dem Kupfer vorkommt, könnte es über die Abtrennung des Kupfers und die anschließende Kupferverhüttung nach dem Stand der Technik über den Anodenschlamm der Kupferelektrolyse zurückgewonnen werden.

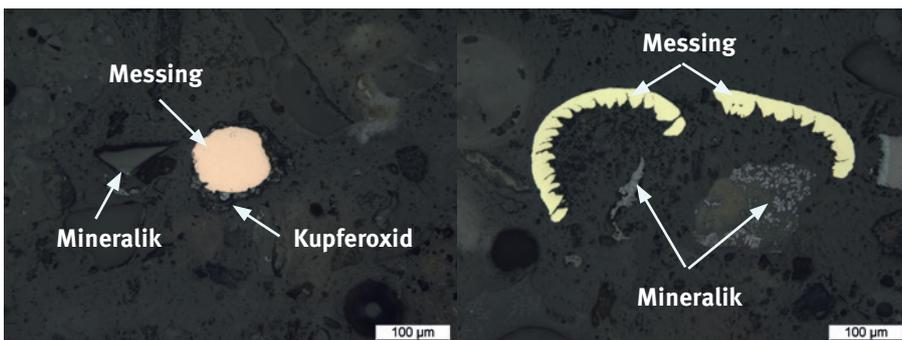


Abbildung 21: Lichtmikroskopische Aufnahme typischer kleiner Kupfer- und Messingpartikel in der Feinfraktion der Rostasche [7]

Neben der Tatsache, dass die Metallgehalte in der Feinfraktion der Rostasche in der Größenordnung natürlicher Lagerstätten liegen, ist von besonderer Bedeutung, dass die Schwermetalle, wie z.B. Kupfer in der Rostasche, überwiegend in ele-

Neuauflage 2019

mentarer Form als kleine Kupferpartikel oder Partikel einer Kupferlegierung (Abbildung 21) vorliegen.

Denn damit entfallen beim Recycling dieser Metallpartikel Aufbereitungsprozesse, die bei der Gewinnung der Metalle aus natürlichen Lagerstätten notwendig sind, um das Kupfer entweder aus seinen oxidischen oder sulfidischen Verbindungen herauszulösen, so dass auf diese Weise eine große Menge Energie bei der Primärproduktion eingespart werden kann. Darüber hinaus werden natürliche Ressourcen (Erze) geschont und negative Umweltwirkungen des Bergbaus, insbesondere beim Kupfer [30, 31], vermieden.

Die eingesparten Energiemengen lassen sich am besten durch den Parameter kumulierter Exergieverbrauch (cumulative exergy consumption, CExC) darstellen [32]. Bei der Sekundärproduktion der Metalle wird deutlich weniger Energie benötigt.

**Tabelle 6. Kumulierter Exergieverbrauch CExC für die Herstellung verschiedener Metalle (Primärproduktion und Sekundärproduktion)**

Metall	kumulierter Exergieverbrauch CExC (MJ/t)	
	primär	sekundär
Fe	26.690 <sup>1</sup>	22.740
Cu	67.000	4.450...20.150
Al	157.300	9.960

<sup>1</sup> bei Verwendung von 15% Schrott

Rechnet man die eingesparte Energie bei der Sekundärproduktion von Fe, Cu und Al zum Energieoutput der Abfallverbrennungsanlage dazu, erhöht sich der Wirkungsgrad um 1 bis 2 Prozentpunkte [33].

Künftige Entwicklungen bei der Aufbereitung von Rostaschen zielen auf die Rückgewinnung elementarer Metalle aus der Feinfraktion < 2mm, wo die edlen Metalle Silber und Gold vor allem zu finden sind. Hier liegen noch ungenutzte Potenziale. Nach derzeitigem Kenntnisstand werden Abtrennung und Aufbereitung der Feinfraktion einfacher, wenn die Asche trocken ausgetragen wird [34, 35]. In der Schweiz wurde bereits eine großtechnische Aufbereitungsanlage für trocken ausgetragene Rostasche errichtet und in Betrieb genommen. Es wurden Erlöse in Höhe von 95 CHF durch elementare Metalle erzielt, 30% (d.h. 29 CHF) allein durch Gold und Silber.

Trotz der Tatsache, dass die Gewinnung der metallischen Komponenten aus der Feinfraktion der Rostasche zu einer Wertschöpfung führt und andererseits dadurch eine sauberere mineralische Restfraktion hergestellt wird,

ist eine Wirtschaftlichkeit des Recyclings von Metallen aus Rostasche in Deutschland nach derzeitigem Kenntnisstand und bei derzeitigen Metallpreisen – trotz hoher theoretischer jährlicher Erlöse – nicht zu realisieren, wenn durch die zusätzlichen Aufbereitungsschritte (insbesondere Mahlung und Zerkleinerung) die mineralische Restfraktion nicht mehr wirtschaftlich verwertet werden kann.

Die Verwertung der mineralischen Fraktion, die aber rund 90% der jährlich anfallenden Menge ausmacht, gestaltet sich in Deutschland zunehmend schwieriger, obwohl von den rund 5 Millionen Tonnen pro Jahr (Metalle und Mineralik, s.o.) in der Vergangenheit der überwiegende Teil noch zu ca. 45 % im Deponiebau und 31% im Straßenbau [36] verwertet werden konnten.

Europaweit werden rund 17,6 Millionen Tonnen Rostasche erzeugt. In 11 Ländern wird die Rostasche verwertet, im Schnitt zu 54% (Schwankungsbereich 20-100%) [37]. Für die Verwertung der mineralischen Fraktionen gibt es keine einheitliche Regelung in Europa. Die Anforderungen, die für eine Verwertung definiert werden, beziehen sich auf die Schadstoffkonzentrationen im Feststoff und auf Schadstofffreisetzungen in standardisierten Auslaugtests, die allerdings auch nicht einheitlich sind (z.B. unterschiedliche Wasser/Feststoffverhältnisse). Gute Erfahrungen mit der Verwertung im Straßenbau wurden in Dänemark gemacht, wo die Verwertungsquote 99% beträgt [38].

Die Verwertung der Mineralik bleibt problematisch, da keine europaeinheitlichen Qualitätsanforderungen in Sicht sind. Eine höhere Verwertungsrate bedingt eine verbesserte, aber damit auch komplexere Aufbereitungstechnik. In den Niederlanden etablieren sich gerade Nassverfahren, mit denen eine Reduzierung der Chloridgehalte und weiterer Störstoffe möglich ist [39]. Auch in Deutschland kommen mancherorts bereits nassmechanische Verfahren zum Einsatz. Der verfahrenstechnische Aufwand ist zwar hoch, z.B. durch die zusätzliche Abwasserbehandlung, jedoch konnte gezeigt werden, dass sich so mehr als 60 % des Sulfats abtrennen lassen [17].

Der Einsatz von aufbereiteter und hinsichtlich des Metallgehaltes entfrachteter Rostasche erscheint insbesondere vor dem Hintergrund der aktuellen Klimadiskussion interessant, da die Möglichkeit besteht, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß und den Energieverbrauch bei der Zementherstellung zu reduzieren, da für das mit der Rostasche eingebrachte CaO kein CaCO<sub>3</sub> mehr zersetzt werden muss. Für den Einsatz von Rostasche als Rohstoff zur Herstellung von Zementklinker muss die Rostasche gemahlen werden. Im Verlauf einer Untersuchung [7] zum Einsatz der Rostasche in der Zementindustrie konnte festgestellt werden, dass sich die metallischen Partikel durch das

Mahlen verformt haben (Abbildung 22) und auf diese Weise mit einem Siebschnitt  $> 500 \mu\text{m}$  relativ leicht abgetrennt werden konnten. Besonders leicht verformen sich Nichteisenpartikel, da diese Metalle weicher sind.

Damit stellt das Mahlen eine sehr wichtige Prozessstufe dar, die auch großtechnisch relativ leicht umsetzbar ist. Allerdings kommt der Optimierung des Mahlprozesses eine ganz besondere Bedeutung zu, da bei einem zu intensiven Mahlen aus den Kanten der abgeflachten Partikel kleinere Partikel herausbrechen, die damit in die feine mineralische Restfraktion übergehen und somit im Hinblick auf die Aufbereitung dieser Fraktion dann eine kontraproduktive Wirkung haben.

Nach dem Mahlen und dem anschließenden Sieben ist eine magnetische Trennung im Hinblick auf die Aufbereitung der mineralischen Fraktion relevant, da in der Feinfraktion das Eisen vollständig oxidiert ist und hauptsächlich als Eisenoxid in Form des Magnetits ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) vorliegt, der sehr oft mit anderen Oxiden verwachsen ist. Im Hinblick auf die verschiedenen Möglichkeiten der Metallabscheidung ist die Existenz des Magnetits von besonderer Bedeutung [41], da der Magnetit eine höhere Löslichkeit für andere Metalle aufweist. Aufgrund der Spinellstruktur des Magnetits können  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Fe}^{3+}$  Ionen durch  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  Ionen ersetzt werden, so dass der Magnetit als Sammler für die genannten Elemente wirkt.

Neben der materialtechnologischen Eignung der Rosta-sche als Rohstoff für die Klinkerherstellung spielen der Verbleib der eingetragenen Schwermetalle und deren

Verhalten im Klinkerbrennprozess eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit [7] dieser Verwertungsmethode. Mit Hilfe von Emissions- und Klinkerprognosen können die Einflüsse der Rosta-sche auf die Emissionen beim Klinkerbrennprozess und die Einträge von Schwermetallen in den Zementklinker berechnet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch entsprechende Aufbereitungsschritte einige Elemente auf ein umweltverträgliches Niveau abgesenkt werden können und dass bei anderen Elementen wie Kupfer, Antimon und Chrom deutliche Abreicherungs-raten erzielt werden können. Dennoch besteht hier noch weiterer Untersuchungsbedarf.

#### 4.3 Rückgewinnung von Phosphor aus Aschen der Klärschlammverbrennung

Die Klärschlammverordnung wurde im Jahr 2017 novelliert. Neu in der Verordnung sind dabei die Pflichten zur Rückgewinnung von Phosphor (P) aus Klärschlamm bzw. Klärschlammverbrennungsaschen. Gemäß Verordnung sind den Verbrennungsverfahren auch solche Verfahren gleichgestellt, die unterstöchiometrisch betrieben werden (Vergasung) bzw. auf indirekter Beheizung des Konversionsraumes basieren (Pyrolyse). Mit Gehalten von durchschnittlich mehr als 7% sind die Aschen zur Phosphorrückgewinnung auch gut geeignet. Für Phosphor aus Klärschlammaschen ergibt sich ein Rückgewinnungspotenzial von knapp 19.000 Tonnen pro Jahr, was rund 12% der in Form konventioneller mineralischer Dünger eingesetzten Menge an Phosphor entspricht [11].

Die Schwermetallgehalte in den Aschen verhindern allerdings eine direkte Verwertung als Düngemittel [42]. Ebenso gilt es die Bioverfügbarkeit des Phosphors sicherzustellen. Für eine Reduzierung der Schwermetallgehalte existieren zahlreiche nasschemische und thermochemische Verfahren [43], von denen allerdings bisher keines großtechnisch realisiert wurde. Das wird sich künftig ändern, da die Rückgewinnung von Phosphor verpflichtend wird.

Mit der Umsetzung großtechnischer Phosphorrückgewinnungsverfahren wurde in den letzten Jahren begonnen, wobei die ersten dieser Anlagen ab 2021 bzw. 2022 zur Verfügung stehen werden. Dabei wurden besonders vielversprechende Verfahrensansätze fokussiert, die sich

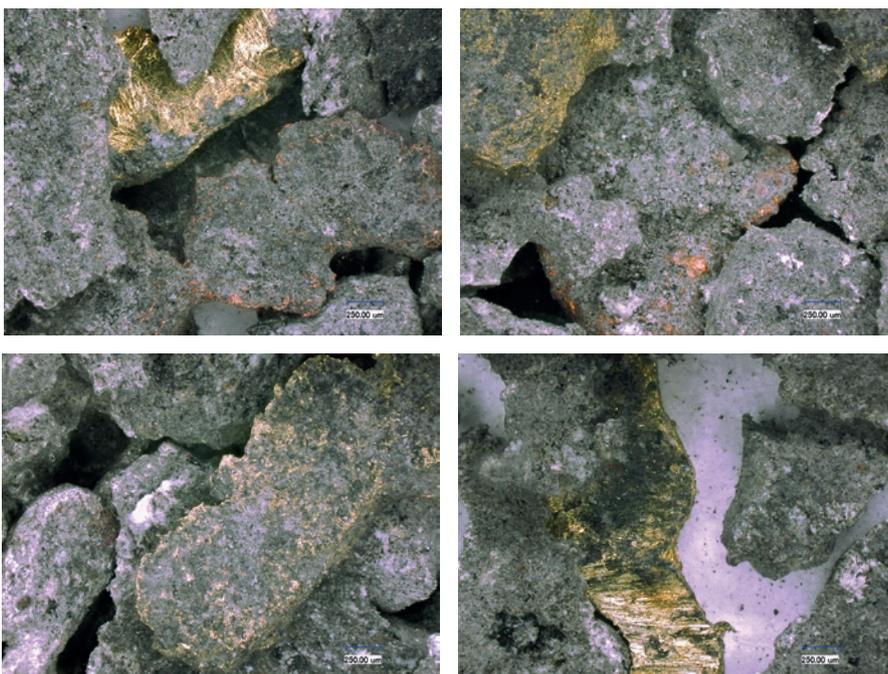


Abbildung 22: Durch das Mahlen abgeflachte metallische Partikel (Messbalken =  $250 \mu\text{m}$ ) mit angebrochenen Kanten [40]

an der Markttauglichkeit der Produkte orientieren. Beispielsweise kann durch nass-chemischen Aufschluss der Klärschlammasche Phosphor in Form von Phosphorsäure oder als düngemitteltaugliches Dicalcium- oder Monoammoniumphosphat (DCP bzw. MAP) zurückgewonnen werden. Möglich ist auch, das Säure-Klärschlammaschegemisch (mit oder ohne Ausschleusung von Schwermetallen, z. B. durch Fällungsprozesse), vollständig zu Düngemittelsubstituten aufzubereiten. Ebenfalls in der Umsetzung befindliche thermochemische Behandlungsverfahren haben zum Ziel, mittels Additivgabe Schwermetalle aus der Verbrennungssasche auszuschleusen und zugleich die Bioverfügbarkeit des enthaltenen Phosphats zu erhöhen [10]. Aschebasierte Rückgewinnungsverfahren sind im Allgemeinen als technisch aufwändig einzuschätzen und müssen am Ende der Klärschlammverwertungskette separat genehmigt und installiert werden.

Im Gegensatz zu den entwickelten nass- bzw. thermochemischen Behandlungsverfahren haben sich alternative Verfahrensansätze, wie z.B. elektrochemische und metallurgische Verfahren oder Karbonisierungsverfahren, aufgrund der technisch hohen Ansprüche, verfahrensseitiger Probleme, aber auch wegen nicht gegebener Düngemittelkonformität bisher nicht in der Breite etablieren lassen bzw. werden nicht weiterverfolgt.

#### 4.4 Zusammenfassung

Die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Rostaschen der thermischen Abfallbehandlung trägt dazu bei, dass die thermische Abfallbehandlung ein integraler Bestandteil einer Kreislaufwirtschaft ist [44]. Die mineralischen Bestandteile können natürliche Ressourcen wie Sand und Kies ersetzen sowie im Fall der Klärschlammaschen immer knapper werdende Naturphosphate. Die Abtrennung von Eisen und NE-Metallen ist seit Jahrzehnten gängige Praxis. In Deutschland wurden 2017 nach dem Stand der Technik 413.000 t Eisen und 77.000 t NE-Metalle in stückiger Form separiert. In der jüngeren Vergangenheit wurden neue Verfahren und bestehende Verfahren weiterentwickelt, die sich mit einer noch weitergehenden Abtrennung der Metalle aus der Feinfraktion beschäftigen, um auf diese Weise hochpreisige Metalle (u.a. Cu, Au, Ag) zurückgewinnen zu können. So liegen z.B. die Kupfergehalte in der Feinfraktion der Rostasche durchaus in der Größenordnung natürlicher armer Lagerstätten. Im Gegensatz zu den natürlichen Lagerstätten liegt in der Feinfraktion der Rostasche Kupfer aber schon überwiegend in elementarer Form, als kleine Kupferpartikel oder Partikel einer Kupferlegierung vor, so dass im Vergleich zur Primärgewinnung bei der Sekundärproduktion Energie gespart wird. Diese Verfahren werden immer weiter verbessert, aber bereits heute trägt die Aufbereitung von Rostaschen substantiell zur Sekundärrohstoffwirtschaft bei [28, 45].

## 5 Literatur

### Kapitel 1: Abfallströme, gesetzliche und energiepolitische Rahmenbedingungen und Perspektiven

- [1] S. Flamme, J. Hanewinkel, P. Quicker, K. Weber: Energieerzeugung aus Abfällen - Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030, Umweltbundesamt (Hrsg.), Projektnummer 75778, Texte 51/2018, ISSN 1862-4359, Dessau-Roßlau, Juni 2018, online: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26\\_texte\\_51-2018\\_energieerzeugung-abfaelle.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26_texte_51-2018_energieerzeugung-abfaelle.pdf), abgerufen 06.07.2020.
- [2] Gohlke, O.; Neukirchen, B.; Wiesner, J. (Hrsg.): Werkzeuge zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren – Methoden und Ergebnisse. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 18–34. ISBN 3-931384-54-3
- [3] Fachverband Anlagenbau Energie. Umwelt. Prozessindustrie (Hrsg.): FDBR-Richtlinie 7 - Abnahmeversuche an Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerungen, Ausgabe 7, Düsseldorf, Stand: 03/2013.
- [4] Beckmann, M.; Scholz, R.: Kapitel 5: Massen- und Energiebilanzen. In: (Autorenkollektiv) Gohlke, O.; Neukirchen, B.; Wiesner, J. (Hrsg.): Werkzeuge zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren – Methoden und Ergebnisse. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 18–34. ISBN 3-931384-54-3
- [5] BMWI (Hrsg.): Gesetzeskarte für das Energieversorgungssystem, Plakat, Stand 01.03.2018, online: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/gesetzeskarte.html>, abgerufen am 03.07.2020.
- [6] Pieper, C.; Ohle, A.; Unz, S.; Beckmann, M.: Waste incineration plants as the supportive element of a local energy network. 14th International Conference on the European Energy Market (EEM), 6-9 June 2017; DOI: 10.1109/EEM.2017.7981902.
- [7] Pieper, C.; Heß, T.; Henoeh, J.: Renewable, Cellular Energy Clusters Providing Ancillary Services. NEIS 2018 “Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems”, 20. - 21.09.2018, Hamburg.
- [8] Eigene Darstellung – Professur Energieverfahrenstechnik, TU Dresden
- [9] O. Bendel: Digitalisierung, Definition im Gabler Wirtschaftslexikon, Stand 19.02.2018, online: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitalisierung-54195>, abgerufen 07.07.2020.
- [10] O. von Raven, R.; Hanenkamp, A.: Effizienzsteigerung und Emissionsminderung durch Digitalisierung – Online-Bilanzierung des Prozesses und Vorhersage der Verschmutzungssituation im Kessel. In: Energie aus Abfall 17, 483-495. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2020.
- [11] Pohl, M.; Wen, T.; Jentschke, L.; Kaiser, M.; Brell, J.; Spiegel, W.; Bernhardt, D.; Graube-Kühne; F.; Kehr, T.; Beckmann, M.; Geese, B.; Durwen, M.; Sauer, S.: Assistenz- und Monitoringsystem zur intelligenten Kesselreinigung im Kraftwerk Schkopau. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik 2020 - Power Plant Technology, Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, 2020, E-Book, ISBN 978-3-934409-88-0.
- [12] Widder, T.; Beckmann, M.: Identifizierung problematischer Brennstoffkomponenten mittels Feuerungsmodell mit nichtlinearer Optimierung. Konferenzbeitrag zum 29. Deutschen Flammentag, 17.-18.09.2019, Bochum, Deutschland.

### Kapitel 2: Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Thermische Hauptverfahren

- [1] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, ISBN 3-519-00402-X, 2001.
- [2] Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen. Endbericht eines Verbundvorhabens zwischen Firma MARTIN GmbH, München, NOELL GmbH, Würzburg, L.&C. Steinmüller GmbH, Gummersbach, Projektträger UBA-Berlin, 1994
- [3] Berwein, H.-J.: Siemens Schwel-Brenn-Verfahren – Thermische Reaktionsabläufe. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995
- [4] Beckmann, M.; Davidovic, M.; Wiese, C.; Busch, M.; Peppler, E.; Schmidt, W.: Mehrstufige Vergasung von Restmüll auf einem Rost. Abschlußbericht über ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 01746 gefördertes Forschungsprojekt, 1999
- [5] Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and Some Test Results of Pilot Plants. 1989 Incineration Conference, Knoxville, USA, 1989
- [6] Stahlberg, R.; Feuerrigel, U.: Thermoselect – Energie und Rohstoffgewinnung. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec ,95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995

- [7] Albrecht, J.; Loeffler, J.; Reimert, R.: Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverschlackung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994
- [8] Koralewska, R.; Schönsteiner, M.: Neue Anforderungen an eine umweltgerechte thermische Abfallbehandlung – welche Lösungsansätze sind notwendig? In: Bayerische Abfall und Deponietage 2018.
- [9] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995
- [10] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVCSymposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994
- [11] Périlleux, M.; Creten, G.; Kümmel, J.: Improving combustion and boiler performance of new and existing EFW plants with the seghers-ibb-prism. 6th EUROPEAN CONFERENCE on INDUSTRIAL FURNACES and BOILERS INFUB Estoril - Lisbon - Portugal, 02.-05. April 2002
- [12] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991
- [13] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen – Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) /TÜ/ Umwelt-Special 44 (1992) Nr. 10
- [14] Englmaier, L.: Primäre und sekundäre Korrosionsschutzmaßnahmen im MHKW Burgkirchen. Automatische Feuerleistungsregelung und Recladding. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. Freiberg 2005. ISBN 3-934409-27-X, S. 359-383
- [15] Martin, J.; Busch, M.; Horn, J.; Rampp, F.: Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung. VDI-Berichte 1033, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
- [16] Schäfers, W.; Limper, K.: Fortschrittliche Feuerungsleistungsregelung durch Einbeziehung der Fuzzy-Logik und der IR Thermografie. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1993
- [17] Thomé, E.; Dittrich, R.; Gazinski, A.; Gehr, D.: Optimierung einer Müllfeuerung durch modulare Feuerungsleistungsregelung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 199-210
- [18] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Davidovic, M.: Optimization of Gasification of Waste Materials in Grate Systems. 1997 International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, San Fransisco-Oakland Bay, California, 12.-16. May, 1997
- [19] Darstellung Dipl. Ing. R. von Raven, VON RAVEN Ingenieuresellschaft für Energie und Umweltverfahrenstechnik & Beratung mbH
- [20] Gohlke, O.; Busch, M.: Reduction of combustion by-products in WTE plants: O<sub>2</sub> enrichment of underfire air in the Martin Syncom process, Chemosphere 42, (2001) S. 545-550.
- [21] Gohlke, O.; Busch, M.; Horn, J.; Martin, J.: Nachhaltige Abfallbehandlung mit dem SyncomPlus-Verfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003.
- [22] Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik: »MARTIN Nox Reduktion.« 2013.
- [23] Uhlig, S.: Abfallverbrennung der Zukunft. Diplomarbeit TU Dresden 2014.
- [24] D. Böni: »Thermo-Recycling: Effiziente Gewinnung von Wertstoffen aus der Trockenschlacke.« Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 5. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. Neuruppin, 2018.
- [25] Morf, Leo; Kuhn, Elmar, et al. (April 2009): Qualitätsentwicklung konventionell ausgetragener Schlacke. [http://www.a-wel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/abfall\\_rohstoffe\\_altlasten/veroeffentlichungen/\\_jcr\\_content/contentPar/publication\\_2/publicationitems/schlacke\\_qualit\\_tsen/download.spooler.download.1320054462148.pdf/qualitaetsentwicklung\\_austrag\\_schlacke\\_2009.pdf](http://www.a-wel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/abfall_rohstoffe_altlasten/veroeffentlichungen/_jcr_content/contentPar/publication_2/publicationitems/schlacke_qualit_tsen/download.spooler.download.1320054462148.pdf/qualitaetsentwicklung_austrag_schlacke_2009.pdf). aufgerufen am 28.01.2016.
- [26] R. Koralewska; E.-C. Langhein; J. Horn: »Verfahren zur Verbesserung der Qualität von Verbrennungsrückständen mit innovativer MARTIN-Technologie.« KVA-Rückstände in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweiz. 2010.
- [27] P. Quicker, F. Neuerburg, Y. Noël et al.: Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen, Umweltbundesamtes (Hrsg.), Projekt 29217, ISSN 1862-4359, Dessau-Roßlau, März 2017, online: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-06\\_texte\\_17-2017\\_alternative-thermische-verfahren\\_o.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-06_texte_17-2017_alternative-thermische-verfahren_o.pdf), abgerufen 10.07.2020.

- [28] Umweltbundesamt (Hrsg.): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU) - BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung, mit ausgewählten Kapiteln in deutscher Übersetzung, Juli, 2005, online: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt\\_abfallverbrennungsanlagen\\_vv.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_abfallverbrennungsanlagen_vv.pdf), abgerufen 13.07.2020.
- [29] Berghoff, Rolf: Zur Pyrolyse häuslicher Abfälle. Dissertation, Fakultät für Bauwesen, RWTH Aachen, 1981.
- [30] von Raven, R.; Hanenkamp, A.: Die digitale MVA – Effizienzsteigerung und Emissionsminderung durch Anwendung von Big Data. In: Beckmann, M., Hurtado, A. (Hrsg): Kraftwerkstechnik 2018, SAXONIA Standortentwicklungs- und Verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg.

### Kapitel 3: Verfahrenstechnik der thermischen Abfallbehandlung – Abgasreinigung

- [1] VDI 3460: VDI-Richtlinie 3460, Emissionsminderung Thermische Abfallbehandlung, Verein Deutscher Ingenieur (Hrsg.), Düsseldorf 2014
- [2] Karpf, R.; Emissionsbezogene Energiekennzahlen von Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung, TK-Verlag, Neuruppin 2012, ISBN 978-3-935317-77-1
- [3] Thomé-Kozmiensky, Elisabeth (Hrsg.), Abfallverbrennungsanlagen – Deutschland – 2014 | 2015; TK Verlag, Neuruppin 2016, S. 185
- [4] Bieber, H., Karpf, R.; Energieeffiziente Abgasreinigung hinter Abfallverbrennungsanlagen; 25. VDI-Fachkonferenz Thermische Abfallbehandlung, Würzburg 10./11. Oktober 2013
- [5] Brick, K.; High Environmental Standard – Reflection on choice of integrated techniques; 4th International VDI Conference 2017, Copenhagen 17./18. May 2017
- [6] Karpf, R., Bergins, C.; CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei der Abfallverbrennung; Müll und Abfall, Ausgabe Mai 2016, S. 228 - 240
- [7] Huttenhuis, P., Roeloffzen, A., Versteeg, G.; CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Wiederverwendung in einer Abfallverbrennungsanlage; [Hrsg.] Karl J. Thomé-Kozmiensky und Michael Beckmann; Energie aus Abfall, Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, 2016, Bd. 13, S. 401 - 410
- [8] Morun, B.; Neue Ergebnisse zur trockenen Rauchgasreinigung und Möglichkeiten zur Verwertung anfallender Reststoffe; 12. Potsdamer Fachtagung -Optimierung in der thermischen Abfall- und Reststoffbehandlung- Perspektiven und Möglichkeiten; Potsdam 27.02.2015

### Kapitel 4: Wertstoffrückgewinnung

- [1] Nabasik, A. und Nottrodt, A. (1996): 100 Jahre Müllverbrennung in Hamburg, Zur Geschichte und Technikgeschichte der Müllverbrennung in Hamburg, Stadtreinigung Hamburg
- [2] Ungewitter, C. (1938): Verwertung des Wertlosen, Wilhelm Limpert-Verlag: Berlin
- [3] Palm, W. (1979): Rohstoffe im Engpaß, Urania-Verlag: Leipzig
- [4] Belouschek, J.R. (2014): Processing of Bottom Ashes and management of output products: State of the art in Germany, International VDI Conference, Metals and Minerals from IBA, Düsseldorf
- [5] BDE, BDSV, bvse, ITAD, PlasticsEurope, VDM, VDMA, VCI und VKU (2018): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft, Einblicke und Aussichten (Status report of the German circular economy, insights and prospects)
- [6] ITAD (2017): Jahresbericht 2017. ITAD – Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V, Düsseldorf, <https://www.itad.de/ueber-uns/mehr/jahresbericht/itad-jahresbericht-2017.pdf>
- [7] Deike, R., Smaha, B., Vennemann, B., Knöpfelmacher, A. und Hoenig, V. (2019): Kann die mineralische Fraktion der Feinfraktion der MVA-Schlacke in der Zementindustrie als Rohstoff eingesetzt werden?, in: Thomé-Kozmiensky, E. und Thiel, S. (Hrsg.), Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6, Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Thomé-Kozmiensky-Verlag: Neuruppin
- [8] Bundesregierung (2009): Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts (DepRVV). Bundesgesetzblatt I(22), 900-950,
- [9] Holm, O. und Simon, F.G. (2017): Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany. Waste Management 59, 229-236, doi: 10.1016/j.wasman.2016.09.004
- [10] Roskosch, A. und Heidecke, P. (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

- [11] Krüger, O. und Adam, C. (2014): Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, TEXTE, 49/2014
- [12] Bayuseno, A.P. und Schmahl, W.W. (2010): Understanding the chemical and mineralogical properties of the inorganic portion of MSWI bottom ash. *Waste Management* 30(8–9), 1509-1520, doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.010
- [13] Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hartlen, J., Hjelmar, O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., van der Sloot, H.A. und Vehlow, J. (Hrg.) (1997): *Municipal solid waste incineration residues: An international perspective on characterisation and management of residues from municipal solid waste incineration*. International Ash Working Group, Studies in Environmental Science, Bd. 67, Elsevier: Amsterdam
- [14] Wei, Y., Shimaoka, T., Saffarzadeh, A. und Takahashi, F. (2011): Mineralogical characterization of municipal solid waste incineration bottom ash with emphasis on heavy metal-bearing phases. *Journal of Hazardous Materials* 187, 534-543, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.070
- [15] Hyks, J. und Astrup, T. (2009): Influence of operational conditions, waste input and ageing on contaminant leaching from waste incinerator bottom ash: A full-scale study. *Chemosphere* 76(9), 1178-1184, doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.06.040
- [16] Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C.L., Van der Sloot, H.A. und Comans, R.N.J. (2008): A consistent geochemical modelling approach for the leaching and reactive transport of major and trace elements in MSWI bottom ash. *Applied Geochemistry* 23(6), 1544-1562, doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.12.032
- [17] Simon, F.G., Kalbe, U. und Holm, O. (2019): Antimon in Rostaschen aus der Müllverbrennung - Auslaugverhalten und Rückschlüsse für die Aufbereitung, in: Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Pretz, T., Senk, D.G. und Wotruba, H. (Hrg.), *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Aschen, Schlacken Stäube und Baurestmassen*, Bd. 6, S. 148-164, TK-Verlag: Neuruppin
- [18] Hjelmar, O., van der Sloot, H.A. und van Zomeren, A. (2013): Hazard property classification of high temperature waste materials, Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia\_2013, S. Margherita di Pula, Italy, CISA Publisher
- [19] Muchova, L., Bakker, E. und Rem, P. (2009): Precious metals in municipal solid waste incineration bottom ash. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 9, 107-116,
- [20] Morf, L.S., Gloor, R., Haag, O., Haupt, M., Skutan, S., Lorenzo, F.D. und Böni, D. (2013): Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste – Sources and fate in a Swiss incineration plant. *Waste Management* 33(3), 634-644, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.010>
- [21] Baccini, P. und Gamper, B. (Hrg.) (1993): *Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft, Endlagerqualität am Beispiel Müllschlacke*. EAWAG/ETHZ, vdf (Hochschulverlag AG, ETH Zürich): Ittingen
- [22] Bilitewski, B., Härdtle, G. und Marek, K. (1994): *Abfallwirtschaft*. 2. Auflage, Springer-Verlag: Berlin
- [23] Simon, F.G. und Andersson, K.H. (1995): InRec™ process for recovering materials from solid waste incineration residues. *ABB Review* (9), 15-20,
- [24] Kuchta, K. und Enzner, V. (2015): Ressourceneffizienz der Metallrückgewinnung vor und nach der Verbrennung, in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrg.), *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2*, S. 105-116, TK Verlag: Neuruppin
- [25] Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez Benavides, J., Holbrook, S. und Roudier, S. (2019): *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*, Luxembourg, EUR 29971 EN, doi: 10.2760/761437
- [26] Deike, R., Ebert, D., Schubert, D., Ulum, R., Warnecke, R. und Vogell, M. (2013): Reste in Schlacke und Asche. *ReSource* (3), 24-30,
- [27] Simon, F.G. und Adam, C. (2012): Ressourcen aus Abfall. *Chemie Ingenieur Technik* 84(7), 999-1004, doi: 10.1002/cite.201100189
- [28] Simon, F.G. und Holm, O. (2018): Resources from recycling and urban mining, limits and prospects. *Detritus* 2, 24-28, doi: 10.31025/2611-4135/2018.13665
- [29] Morf, L., Böni, D. und Di Lorenzo, F. (2013): Urban Mining im ZAR in Hinwil, Wertstoffrecycling aus MVA-Rückständen, 12. VDI Fachkonferenz Feuerung und Kessel,, Köln
- [30] Simon, F.G. und Holm, O. (2017): Exergetische Bewertung von Rohstoffen am Beispiel von Kupfer. *Chemie Ingenieur Technik* 89(1-2), 108-116, doi: 10.1002/cite.201600089

- [31] Simon, F.-G. (2018): Exergie und Rohstoffgewinnung. *Chemie in unserer Zeit* 52(5), 282-283, doi: 10.1002/ciuz.201800872
- [32] Simon, F.G. und Holm, O. (2016): Exergetic Considerations on the Recovery of Metals from Waste. *International Journal of Exergy* 19(3), 352-363, doi: 10.1504/IJEX.2016.075668
- [33] Gehrman, H.-J., Hiebel, M. und Simon, F.G. (2017): Methods for the Evaluation of Waste Treatment Processes. *Journal of Engineering* 2017, 3567865 (1-13), doi: 10.1155/2017/3567865
- [34] Böni, D. und Morf, L.S. (2018): Thermo-Recycling, Efficient Recovery of Valuable Materials from Dry Bottom Ash, in: Holm, O. und Thome-Kozmiensky, E. (Hrg.), *Removal, Treatment and Utilisation of Waste Incineration Bottom Ash*, S. 25-37, TK Verlag: Neuruppin
- [35] Šyc, M., Simon, F.G., Hyks, J., Braga, R., Biganzoli, L., Costa, G., Funari, V. und Grosso, M. (2020): Metal recovery from incineration bottom ash: state-of-the-art and recent developments. *Journal of Hazardous Materials* 393(122433), 1-17, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122433
- [36] Alwast, H. und Riemann, A. (2010): Verbesserungen der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. *Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Texte, 50/2010*
- [37] Blasenbauer, D., Huber, F., Lederer, J. und Fellner, J. (2019): Utilisation of Incineration Bottom Ash and Respective Legal Requirements in the EU, Norway and Switzerland, in: Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Winter, F. und Juchelkova, D. (Hrg.), *Waste Management, Vol. 9, Waste-to-Energy*, S. 715-729, TK-Verlag: Nietwerder
- [38] Hyks, J. und Syc, M. (2019): Utilisation of Incineration Bottom Ash in Road Construction, in: Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Winter, F. und Juchelkova, D. (Hrg.), *Waste Management, Vol. 9, Waste-to-Energy*, S. 731- 741, TK-Verlag: Nietwerder
- [39] Born, J.P. (2018): Mining Incinerator Bottom Ash for heavy Non-Ferrous Metals and Precious Metal, in: Holm, O. und Thome-Kozmiensky, E. (Hrg.), *Removal, Treatment and Utilisation of Waste Incineration Bottom Ash*, S. 11-24, TK Verlag: Neuruppin
- [40] Ulum, R.M. (2017): Copper recovery from fine particle grain size of bottom ash from Waste to Energy plants. *Universität Duisburg-Essen, Disseration*
- [41] Deike, R., Ulum, R., Gellermann, C. und Lutz, S. (2015): The recycling potential of metals from MSW incineration residues, in: Lederer, J., Laner, D., Rechberger, H. und Fellner, J. (Hrg.), *International Workshop MINING THE TECHNO-SPHERE, Drivers and Barriers, Challenges and Opportunities*, S. 117-120, Christian Doppler Laboratory “Anthropogenic Resources”, TU Wien: Vienna
- [42] Krüger, O., Grabner, A. und Adam, C. (2014): Complete Survey of German Sewage Sludge Ash. *Environmental Science & Technology* 48(20), 11811-11818, doi: 10.1021/es502766x
- [43] Bertau, M., Fröhlich, P., Gellermann, C., Maurer, A., Vohrer, U. und Wendler, K. (2017): Phosphatrückgewinnung. *DECHEMA, Frankfurt/Main, Statuspapier der ProcessNet-Fachgruppe “Rohstoffe”*
- [44] Van Caneghem, J., Van Acker, K., De Greef, J., Wauters, G. und Vandecasteele, C. (2019): Waste-to-energy is compatible and complementary with recycling in the circular economy. *Clean Technologies and Environmental Policy* 21(5), 925-939, doi: 10.1007/s10098-019-01686-0
- [45] Steger, S., Ritthoff, M., Dehoust, G., Bergmann, T., Schüler, D., Kosinka, I., Bulach, W., Krause, P. und Oetjen-Dehne, R. (2019): Ressourcenschonung durch eine stoffstromorientierte Sekundärrohstoffwirtschaft (Saving Resources by a Material Category Oriented Recycling Product Industry). *Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency), Dessau, TEXTE 34/2019, FKZ 3714933300*

DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.

Theodor-Heuss Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Telefon: 069 7564-0

Telefax: 069 7564-117

E-Mail: [info@dechema.de](mailto:info@dechema.de)