

# KVA-Schlackenaufbereitung in der Schweiz

## Von den Anfängen bis heute

---

Seit es Kehrichtverbrennungsanlagen gibt, war auch die Entsorgung der dabei anfallenden Schlacken von einem permanenten Suchen nach Verwendungsmöglichkeiten geprägt. Bis heute werden grösste Mühen darauf verwendet, Alternativen zur Deponierung zu entwickeln und mit besseren Lösungen zu experimentieren. Eine in den Anfängen übliche Verwertung der Kehrichtschlacke als Kiesersatzmaterial im Strassen- und Dammbau wurde durch ein in den 80er-Jahren entwickeltes visionäres Abfalleitbild gestoppt, gefolgt von einer Phase der Utopien in den 1990er-Jahren, als die in dieser Zeit entwickelten Schmelzverfahren als eine entscheidende Innovation zur Verbesserung der Qualität der Rückstände aus der Abfallverbrennung angesehen wurden. Nach einer Konzentration auf das Machbare mit mobilen oder stationären Metallsortieranlagen wird jetzt ein neuer Durchbruch in der Schlackenverwertung mit dem Trockenverfahren gefeiert, mit dem es gelingen soll, das in den 1980-er Jahren entwickelte Abfalleitbild zu verwirklichen.

### 1. Die Anfänge der Müllverbrennung

Nachdem es bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in England insbesondere in der Nähe anwachsender Industriestädte immer schwieriger wurde, abgebaute Kiesgruben als Abladeplätze für Abfälle ausfindig zu machen, wurde 1874 in Nottingham eine erste Ofenkonstruktion zur Abfallverbrennung gebaut, welche von Albert Fryer unter der Bezeichnung „Destructor“ patentiert wurde. Eine zweite, zuverlässigere Verbrennungsanlage nach dem gleichen Prinzip wurde 1876 in Manchester in Betrieb genommen. Auf dem Kontinent wurde die erste Müllverbrennungsanstalt in Hamburg am Bullerdeich ab 1893 erbaut, welche dann am 1. Januar 1896 in Betrieb gesetzt wurde. Sie war nach einem englischen Patent von Horsfall mit Zellenöfen, die als eine Weiterentwicklung des „Destructor“ anzusehen sind, ausgerüstet und hatte bereits eine Dampf- und Stromerzeugungsanlage für den Eigenverbrauch. Es war ein Müllnotstand, der damals zu diesem Baubeschluss geführt hatte. Angesichts einer in Hamburg ausgebrochenen Cholera-Epidemie wollten die Bauern des Umlandes den Hamburger Müll nicht mehr zur Düngung ihrer Felder und Äcker verwenden und zwangen die Müllwagen teilweise mit Waffengewalt wieder nach Hamburg zurück.

Breits die Hamburger Müllverbrennungsanlage, deren Öfen 28 Jahre in Betrieb waren, verfügte über Einrichtungen, mit denen die Schlacke gebrochen, gesiebt und durch Magnete von Eisen befreit werden konnte. Die derart aufbereitete Schlacke wurde zum Preis von 1 Mark pro Tonne für den Strassen- und Wegebau verkauft, was heute einer Kaufkraft von 6 € entspricht.

In der Schweiz entschloss sich der Zürcher Stadtrat nach einer Studienreise nach England und Hamburg, das Kehrichtproblem mit den Bau einer Verbrennungsanlage zu lösen. Als erste Anlage in der Schweiz und als vierte Anlage auf dem europäischen Kontinent nahm am 10. Mai 1904 die Kehrichtverbrennungsanlage in Zürich an der Josefstrasse ihren Betrieb auf. Wie in Hamburg wurden auch in Zürich Zellenöfen nach dem System Horsfall gebaut, die bis 1920 in Betrieb waren. Die Anlage war mit einem Flugascheabscheider ausgestattet und die Wärme der Rauchgase wurde mittels Dampfessel und Dampfturbine genutzt. Die Schlacke fand als Auffüllmaterial und als Baustoff Verwendung.



Abbildung 1 KVA Zürich an der Josefstrasse (ab 1904)

Müllverbrennungsanlagen errichteten 1906 auch die Städte Frankfurt, Kiel und Wiesbaden, 1910 Fürth und Barmen im Wuppertal. 1911/12 erbaute Hamburg die erste Grossanlage am Teichweg, 1912/13 folgte eine weitere Anlage in Altona. Als letzte Müllverbrennungsanlage vor dem Ersten Weltkrieg entstand 1913 die der Stadt Aachen. Alle diese Anlagen nutzten bereits die Verbrennungswärme zur Dampf- und Stromerzeugung aus und die anfallende Schlacke wurde als Baustoff im Wegebau und als Verfüllmaterial genutzt. An die Anlagen Barmen, Kiel, Aachen und Köln waren darüber hinaus Schlackensteinfabriken angegliedert, in denen der Feinmüll zu Kunstbasalt niedergeschmolzen wurde.

In der Schweiz wurde als zweite Anlage die KVA Basel im Jahr 1943 in Betrieb genommen, welche bereits mit einer Einrichtung zur Aufbereitung der Schlacke und zur Abscheidung des Eisens ausgestattet war. Es folgten die KVA Bern im Jahr 1954 und die KVA Lausanne im Jahr 1958.

## **2. Die 1960er und 1970er Jahre - Boom der Abfallverbrennung**

Ein zu Beginn der 1960er Jahre stark zunehmendes Abfallaufkommen in der Schweiz und teilweise unhaltbare Zustände an den Ablagerungsplätzen veranlasste die Behörden, kommunale Abfallentsorgungen zur Lösung der zu dieser Zeit aufkommenden Abfallprobleme zu organisieren. In der Folge wurden die ersten Zweckverbände gegründet, die zumeist auch als Bauherren von Kehrichtverbrennungsanlagen auftraten. Während in den 1960er Jahren in Winterthur, Zürich-Hagenholz und Genf grosse Kehrichtverbrennungsanlagen entstanden, wurden ausserhalb der grossen Städte, z.B. in Horgen, Buchs SG, Zwillikon und Dübendorf teilweise sehr kleine Verbrennungsöfen ohne Wärmeverwertung erbaut. Der durch Bundessubventionen geförderte Bauboom hielt bis Mitte der 1970er Jahre an, so dass 1978 bei einer Bestandsaufnahme des Eidgenössischen Amtes für Umweltschutz 50 Verbrennungsanlagen für kommunale Abfälle gezählt werden konnten, davon 26 Kleinanlagen mit geringem Durchsatz und meist ohne Wärmenutzung. Bereits 1978 wurden 73% der Siedlungsabfälle verbrannt.

Die bei den Verbrennungsanlagen anfallende Kehrichtschlacke wurde als Kiesersatz verkauft, wenn sich Abnehmer finden konnten. Dies war aber nur in den wenigsten Fällen möglich, da in dieser Zeit Kies für den Wege- und Strassenbau meist am Ort des Bedarfs kostengünstig abgebaut werden konnte. Zur Verbesserung der Absatzsituation haben die Zürcher KVA's bereits in den 1960er und 1970er Jahren verschiedene Versuche, zum Teil in Zusammenarbeit mit Industriefirmen, zur

Verwertung der Schlacke unternommen. Trotz positiver Erfahrungen mit Teststrassen, die gezeigt haben, dass Verbrennungsschlacke als brauchbares Material für den Unterbau von Strassen aber auch in bituminösen Deckschichten eingesetzt werden kann, hat sich diese Verwertung der Schlacke nicht durchsetzen können. Neben der Konkurrenz mit preiswertem Kies und zunehmend auch aufbereitetem Bauschutt war damals sicherlich auch die Unkenntnis und mangelnde Experimentierfreude der Strassenbauer ein Grund für diese zögerliche Haltung. In den 1960er und 1970er Jahren lagerten nahezu alle in Betrieb stehenden Kehrichtverbrennungsanlagen ihre Schlacke inkl. des enthaltenen Eisenschrotts auf Deponien ab. Weil zu jener Zeit auch kein Markt für Eisen vorhanden war und der Schrottverkauf nicht mehr den Aufwand für die Schrottabtrennung decken konnte, wurden sogar vorhandene Einrichtung zur Abscheidung des Eisens teilweise wieder entfernt (z.B. KVA Basel).

In den grossen deutschen Verbrennungsanlagen wurde die Schlacke entweder auf der Anlage selbst entschrottet und aufbereitet oder die Verbrennungsrückstände werden von Fremdfirmen zur Eisenschrottauslese und Verwertung übernommen. Die Situation für den Verkauf der Schlacke als brauchbares und preiswertes Material für den Strassenbau war in Deutschland schon immer günstiger, da die Verbrennungsanlagen in der Regel in Ballungsgebieten liegen, in denen auch ein hoher Bedarf an Schüttmaterial für den Strassenbau vorhanden ist, oder sich im norddeutschen Raum befinden, wo ohnehin Kiesmangel herrscht. Im Jahr 1962 konnte in Hamburg etwa 35% der Schlacke mit einem Erlös von 9.20 DM/t für den Unterbau von Wegen und Strassen abgesetzt werden, der übrige Anteil musste deponiert werden. Befürchtungen vor einer Umweltgefährdung durch Emissionen von Schadstoffen in das Grundwasser waren damals keine vorhanden. Man ging davon aus, dass die verdichteten Schlackeschichten nach kurzer Zeit für Regenwasser undurchlässig werden und die bituminösen Deckschichten zudem den Zutritt von Regenwasser wirksam unterbinden.

Im Zuge des wirtschaftlichen Abschwungs verschlechterte sich in den 1970er Jahren auch in Deutschland die Absatzsituation für den Verbrennungsschrott. Wegen der Verunreinigung durch Schlackeanhaftungen und insbesondere durch Zinn und Kupfer, ist der direkte Einsatz des Schrotts bei der Erzeugung hochwertigen Stahls ohnehin nicht möglich und er kann nur bei der Produktion minderwertiger Produkte wie Grauguss oder Betonstahl verwendet werden. Dennoch wurde in Deutschland die Eisenabtrennung weiter aufrechterhalten, da der Schrott einerseits bei der Aufbereitung der Schlacken zu einem verkaufsfähigen Baustoff ohnehin abgetrennt werden muss, andererseits Deponievolumen eingespart werden kann.

### 3. Die 1980er Jahre - Jahrzehnt des Abfalleitbildes

Grosse Missstände in der Abfallwirtschaft insbesondere bei der Sonderabfallentsorgung waren Mitte der 1980er-Jahre der Ausgangspunkt für die Erarbeitung eines Leitbildes für die schweizerische Abfallwirtschaft. Dieses Leitbild basiert seither auf dem zentralen Grundsatz: „Entsorgungssysteme produzieren aus Abfällen nur zwei Arten von Stoffklassen: entweder verwertbare Stoffe oder endlagerfähige Reststoffe“. Dabei stellte sich natürlich die Frage, was endlagerfähige Reststoffe sind. Dass in den Arbeitsgruppen vor allem Geowissenschaftler zur Beantwortung dieser Frage sassen, kann daran abgelesen werden, dass anstatt ökotoxikologischen Überlegungen der Ansatz einer geogenen Referenz gewählt wurde. Die Endlagerqualität orientiert sich demnach an den Eigenschaften von Gesteinen und Erzen und ihrem geochemischen Verhalten in der Erdkruste. Die Forderung, dass endlagerfähige Reststoffe eine erdkrusten- oder gesteinsähnliche Form haben sollen, ist eine sehr hohe Zielsetzung. Zweifel an ihrer erfolgreichen Ausführung hegten bereits einige bei der Ausarbeitung des Leitbildes beteiligten Erdwissenschaftler<sup>1</sup>. Müllschlacken erfüllen die Anforderungen des Leitbildes bei weitem nicht. Die Anteile potentieller Schadstoffe (Schwermetalle) liegen um Grössenordnungen über den Qualitätszielen, die sich aus geogenen Gesteinswerten ableiten lassen. Aber basierend auf den damaligen Erwartungen, dass es infolge neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und verfahrenstechnischer Innovationen bald möglich sein könnte, mit thermischer Behandlung bei Temperaturen über dem Schmelzpunkt den anorganischen Teil der Abfälle in Formen zurückzuführen, die den Gesteinen und Erzen möglichst nahe kommen, wurde damals der Weg in Richtung „Endlagerqualität“ zuversichtlich eingeschlagen. Seit dem 1. Februar 1991 ist in der Schweiz die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) in Kraft, die sich im Wesentlichen am Leitbild für die Schweizerische Abfallwirtschaft aus dem Jahr 1986 orientiert.

### 4. Wiederaufnahme der Schlackenverwertung 1988-1997

Ende der 1980er Jahre wurde der überwiegende Anteil der Kehrichtschlacke deponiert. Während viele Städte (z.B. Winterthur) und Zweckverbände als Betreiber von Kehrichtverbrennungsanlagen über eigene Deponien verfügten, war die Stadt Zürich auf auswärtige Deponien im Fremdbesitz angewiesen. Die Entsorgung der KVA-Schlacken war daher für die beiden Zürcher KVA's ein erheblicher Kostenfaktor. Insofern war man damals sehr offen für kostengünstigere Alternativen und ist gerne

---

<sup>1</sup> Lichtensteiger T. und Zeltner C. (1994): Wie lassen sich Feststoffqualitäten beurteilen? In: Baccini P. und Gamper B. (Hrsg.), Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft - Endlagerqualität am Beispiel Müllschlacke. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 100 S.

auf einen Vorschlag der Firma Eberhard aus Kloten eingetreten, Fraktionen der KVA-Schlacke zum Bau von Strassen und Dämmen zu verwenden, was gemäss der neuen TVA durchaus noch als eine Möglichkeit offen gelassen wurde. Im Jahr 1988 wurde von Eberhard eine Schlackenaufbereitungsanlage auf der Deponie in Lufingen mit einer Jahreskapazität von 60'000 Tonnen Rohschlacke in Betrieb genommen. Die Rohschlacke wurde 2-4 Wochen zur Trocknung abgelagert und dann in zwei Korngrössenfraktionen klassiert, welche mittels Magnetscheidern entschrottet wurden. Zudem wurde Brennbares aussortiert und wieder in die KVA zurückgefahren. Schlacke der Kornfraktion 0-63 mm wurde als Kiesersatz in ungebundenen Foundationsschichten im Strassen-, Wege- und Dammbau eingesetzt. So war es möglich, eine Verwertungsquote von 85% der Rohschlacke zu erreichen. Nachdem zuvor der grösste Teil der in der Schweiz anfallenden Schlackenmenge in Deponien abgelagert worden war, konnte mit dieser Anlage die Schlackenverwertung im Strassenbau wiederaufgenommen werden. Im Jahr 1992 wurden 20% der jährlich in der Schweiz anfallenden Schlackenmenge zu Bauzwecken verwertet, wobei diese Quote grösstenteils auf die Eberhard-Anlage zurückzuführen war.

Die Meinungen und Ansichten der kantonalen Umweltorgane bezüglich der Verwertung von Schlacke im Strassenbau waren sehr unterschiedlich. Während einige Kantone insbesondere der deutschen Schweiz eine restriktivere Handhabung oder gar ein Verbot wünschten, erachteten die Kantone der französischen Schweiz sowie einige Bergkantone die Auflagen der TVA als zu einschränkend und verlangten weniger restriktive Bedingungen für eine Verwertung von Schlacke. In mehreren Kantonen des Mittellandes wurden wegen des oberflächennahen Grundwasserstromes ohnehin keine Bewilligungen für den Baueinsatz von Schlacke erteilt. Da in der Schweiz generell der Absatz der Schlacke aufgrund von kostengünstigen natürlichen Kieslagern eingeschränkt war, zeichnete sich ab Mitte der 1990er Jahre ein deutlicher Rückgang in der Verwertung der Schlacke zu Bauzwecken ab. Das vollständige Ende der Schlackenverwertung wurde Ende der 1990er Jahre eingeleitet, als die ersten Kantone auf der Grundlage der Altlastenverordnung ihre Kataster der belasteten Standorte erstellten und vom AWEL des Kantons Zürich 1997 angekündigt wurde, dass Grundstücke auf denen Schlacke eingesetzt wurde, zukünftig im Altlastenkataster zu führen sind.

Die Aushubrichtlinie aus dem Jahr 1999 hat der Schlackenverwertung einen weiteren Riegel vorgeschoben. Diese Richtlinie legte die Qualitätsanforderungen für den Einsatz von Bauabfällen (Aushub- und Bauabbruchmaterialien) im Strassenbau, für Aufschüttungen oder als Rohstoffersatz fest. Es wurden die Begriffe „unverschmutzt“ und „tolerierbar“ eingeführt und mit Schwermetallgrenzwerten abgegrenzt, um

entscheiden zu können, welches Material auf welche Weise verwertet werden kann. Die Schwermetallgehalte der KVA-Schlacke überschreiten diese Grenzwerte bei weitem, so dass Schlacke gemäss der Aushubrichtlinie eindeutig als „verschmutzt“ anzusehen ist und somit einer Verwertung als Kiesersatz hohe Hürden gesetzt wurden.

## **5. Die 1990er-Jahre - eine Phase der Utopien**

Das Erscheinen des neuen Leitbilds war gleichzeitig auch mit einem Appell an die im Abfall- und Entsorgungssektor tätigen Ämter, Zweckverbände und Unternehmen verbunden, in Zusammenarbeit mit Wissenschaft und Technik die Bereitschaft zu seiner Umsetzung aufzubringen. Es wurde ein Forschungsprogramm gestartet (IP Abfall des Schwerpunktprogramms Umwelt SPPU des schweizerischen Nationalfonds), dessen Schwerpunkt auf die Entwicklung aufwendiger Schmelzprozesse gelegt wurde, mit denen gemäss den damaligen Annahmen homogenere und definiertere Rückstände erreichbar seien. Als das IP Abfall seine Arbeit aufnahm, wurde allgemein erwartet, dass es mit einer vollständigen Aufschmelzung und Mineralisierung der Verbrennungsrückstände gelingen würde, aus den Rückständen der Abfallverbrennung im Sinne des Abfallleitbildes wieder verwertbare Produkte oder zumindest gesteinsähnliche Rückstände herzustellen, die dann endlagergerecht deponiert werden können. In der Folge wurden von Unternehmen des Müllverbrennungsanlagenbaus aufwendige thermische Verfahren zur Verglasung der nicht verwertbaren Rückstände entwickelt und getestet, die zumeist der Müllverbrennung nachgeschaltet wurden. Dafür wurden beträchtliche Entwicklungsbudgets zur Verfügung gestellt.

Ausserhalb des IP Abfall wurden von dem in der Schlackenverwertung tätigen Klotener Unternehmen Eberhard nasschemische Verfahren entwickelt. Mit saurer oder alkalischer Laugung der Schlacke sollte es gelingen, die Schwermetallgehalte in der Schlacke bis auf die Inertstoffgrenzwerte zu reduzieren. Insgesamt verliefen diese Versuche aber unbefriedigend. Die hauptsächlich durch Calciumverbindungen bewirkten stark basischen Eigenschaften der Schlacke haben ein immenses Säurebindungsvermögen zur Folge, so dass für eine saure Laugung ca. 300 Liter konzentrierte Salzsäure pro Tonne Schlacke aufgewendet werden mussten. Dennoch war die erzielte Schwermetallfreisetzung bei weitem nicht ausreichend für eine Reinigung auf Inertstoffqualität. Unter Berücksichtigung der Alkalinität der Schlacke wurden auch alkalische Laugungen mit Ammoniak durchgeführt, die insbesondere zur Reduktion des Kupfergehalts wirksam waren. Da aber diese Methode bei anderen Metallen weniger wirkungsvoll ist, waren auch mit diesem

Ansatz die Inertstoffgrenzwerte nicht zu erreichen. Schlussendlich war klar, dass nasschemische Behandlungsmethoden nicht ausreichten, die Feststoffqualitäten im geforderten Mass zu verbessern. Aufgrund des übermässigen Chemikalieneinsatzes sowie wegen des hohen anlagentechnischen Aufwandes, u.a. verursacht durch eine aufwendige Abwasserreinigung, schien der nasschemische Prozess weder in wirtschaftlicher Hinsicht tragbar noch bei Berücksichtigung von ökologischen Aspekten in sonstiger Weise akzeptabel zu sein. Die Entwicklung von chemischen Waschverfahren wurde daher Ende der 1990-er Jahre eingestellt.

Auch die technischen Entwicklungen bei den Hochtemperaturverfahren zur Abfallbehandlung liessen gegen Ende der 1990er-Jahre erkennen, dass vollständig inerte Stoffe, die ohne Nachsorgemassnahmen abgelagert werden können, auch durch einen schmelzflüssigen Schlackenabzug nicht erreichbar sind. Die immer noch für eine stoffliche Verwertung zu hohen Schwermetallgehalte der Schmelzprodukte, die von den Entwicklern nicht erwartet wurden, machte eine Verwendung als Rohstoff in der Baustoffindustrie, z. B. als Zumahlstoff für Zement, nicht möglich. Es gelang nicht einmal, die Schwermetalle zumindest soweit abzureichern, dass eine nachsorgefreie Ablagerung der Schmelzschlacken möglich gewesen wäre. Die Ziele der Gesteins- respektive der Erzähnlichkeit von Deponieabfällen liessen sich mit den Schmelzprodukten nicht erreichen. Die Entwicklung kam auch zum Ende, weil die staatlichen Projektförderungen ausliefen und die Schaffung von politisch-institutionellen Rahmenbedingungen zur Einführung der an sich unwirtschaftlichen neuen Technik ausblieb.

Aus heutiger Sicht entspricht die Einschmelzung der Verbrennungsrückstände keineswegs den neuen abfallpolitischen Zielsetzungen, welche Deponien als künftige Rohstofflager begreifen, aus denen die enthaltenen Rohstoffe bei geänderten ökonomischen Bedingungen oder weiterentwickelten Aufbereitungsprozessen zu einem späteren Zeitpunkt entnommen werden können. In der Schweiz wurden bereits viele Schlackendeponien wieder abgebaut, um die darin enthaltenen Aluminium- und Kupferpartikel mit mechanischen Trennverfahren abzutrennen. Dies wäre nicht möglich gewesen, wenn die Schmelzverfahren zum Einsatz gekommen und Schmelzgranulat abgelagert worden wäre. Denn die chemischen Bedingungen in einem Schmelzbad hätten zu einer vollständigen Oxidation des Aluminiums geführt, das damit als Rohstoffressource verloren gewesen wäre, und andere wertvolle Metalle, wie z.B. Kupfer, wären in die Glasmatrix fest und nahezu untrennbar eingebunden worden.



## 6. Die 2000er Jahre - Konzentration auf das Machbare (NE-Abtrennung)

Anfangs der 2000er Jahre hat der Enthusiasmus aus den Zeiten des Aufbruchs zu neuen Technologien einem Pragmatismus Platz gemacht. Nachdem die Förderprogramme durch BUWAL und Nationalfond ausgelaufen waren, wurden auch die Arbeiten zu den Schmelzverfahren bald eingestellt. Auch privatwirtschaftliche Entwicklungsarbeiten in Richtung von nasschemischen Verfahren kamen zum Stillstand, da sich herausstellte, dass die neuen Verfahren noch sehr weit von einer Wirtschaftlichkeit entfernt waren. Für die Wettbewerbsfähigkeit der Verfahren war es zwingend, die gereinigten Schlackenfraktionen einer Verwertung als Baustoff zuzuführen, dem stand jedoch eine strenge Grenzwertsetzung im Wege. Insofern waren zu Beginn der 2000er-Jahre der Status quo der Schlackenentsorgung ein nasser Austrag der Schlacke und die Deponierung zu Kosten im Bereich 120 CHF/t (ab KVA) im Schlackenkompartiment einer Reaktordeponie. Gelegentlich wurde vorher grobes Eisen ausgesiebt und in den Schrotthandel abgeführt.

Ohne die Schlackenaufbereitung ganz aufzugeben, wandte man sich technisch weniger aufwendigen Verfahren zu, die lediglich zum Ziel hatten, neben dem Eisenschrott auch die in elementarer, partikulär Form vorhandenen Nichteisenmetalle soweit als möglich aus der Kehrichtschlacke abzutrennen. Ein Pilotprojekt zur Separation insbesondere von Kupfer und Aluminium mittels einer selektiven Zerkleinerung wurde im Jahr 2002 gestartet. Die Projektpartner Eberhard Recycling, Von Roll Umwelttechnik und das Institut für Umwelttechnik an der Hochschule Rapperswil (Umtec) wollten die Idee der selektiven Zerkleinerung in grossem Massstab austesten. Das Verfahren beruhte auf einer Mahlung der von groben Eisenschrott und Störstoffen befreiten Schlacke in einer Kugelmühle, wobei die mineralischen Bestandteile fein gemahlen und die metallischen, unmahlbaren Partikel lediglich verformt und dabei auch gereinigt werden. Anschliessend konnten die nicht zerkleinerten Metalle mittels einer Siebung von der Feinschlacke abgetrennt werden. Aus dem Metallgemisch des Siebüberlaufs wurden mit einem Wirbelstromscheider Aluminium und Kupfer abgetrennt. Auf diese Weise war es möglich ca. 60% der NE-Metalle zurückzugewinnen. Begrenzend für das Metallausbringen war nicht das Verfahrensprinzip an sich, sondern die bei der Siebung gewählte Maschenweite, die im Versuchsbetrieb bei 4 mm lag, so dass Metallpartikel mit einem Durchmesser von weniger als 4 mm in die Feinschlacke ausgetragen wurden.



**Abbildung 2 Schlackemahlung in einer Kugelmühle im Versuchszentrum Klus (Mahlraumabmessungen: Breite 1240mm, Durchmesser 1720 mm, Gewicht Mahlkugel: 5.5 kg, Gesamtmasse Kugeln ca. 1 Tonne)**

Im Versuchszentrum Klus der Von Roll Umwelttechnik wurde im Dezember 2002 die in Abbildung 2 gezeigte Kugelmühle in Betrieb genommen. Während der Mahlbetrieb mit abgelagerter und abgetrockneter Schlacke zu sehr guten Mahlergebnissen führte, stellten sich jedoch bei Aufgabe von frischer Schlacke mit einem Wassergehalt von 15-20 % verfahrenstechnische Probleme ein. Da feuchtes Feinmaterial schnell zum Verstopfen der am Umfang des Mahlraums angebrachten Lochbleche und Siebbespannung führte, nahm der Mühlendurchsatz mit der Zeit schnell ab. Zudem war die Mahlwirkung auf feuchtes Material schlecht. Sehr gute Mahlergebnisse wurden hingegen erzielt, wenn der Kugelmühle Schlacke mit einem Wassergehalt von unter 10% aufgegeben wurde. Je trockener die Schlacke war, desto besser war sowohl die Mahlwirkung als auch die Qualität des ausgetragenen Schrottes, d.h. die Metallstücke hatten saubere und blanke Oberflächen.

Mit diesem Demonstrationsprojekt wurde die Abscheidung von NE-Metallen aus KVA-Schlacken in der Schweiz eingeläutet. Schon bald wurden Sortieranlagen, die zur Entschrottung der Schlacke auf manchen Deponien im Einsatz waren, mit Wirbelstromabscheidern ergänzt (z.B. Deponie Teuftal, Deponie Chrüzlen, Kelsag Laufental). Zusätzlich kamen Betreiber von mobilen Deponieanlagen auf den Markt (z.B. Mobile Mineralstoff-Aufbereitung in Degersheim, Recco BV Niederlande, Wiedag AG Oetwil am See), die den Deponiebetreibern eine kostenfreie

Entschrottung der Schlacke anbieten und sich mit dem Erlös der aussortierten NE-Metalle finanzieren. Infolge der in den Jahren 2005 und 2006 explodierenden Preise für Aluminium und Kupfer wurden sogar die meisten Schlackenkompartimente zur Rückgewinnung der enthaltenen Kupfer- und Aluminiumpartikeln wieder rückgebaut (z.B. Deponie Elbisgraben 2005). Auf Deponien wurden auch stationäre Anlagen zur Metallabtrennung errichtet (KEWU Krauchthal, Deponie Eielen Uri) und viele Kehrichtverbrennungsanlagen und Recyclingbetriebe haben in diesem Jahrzehnt eigene Schlackenaufbereitungsanlagen in Betrieb genommen (VfA Sennwald 2005, SFR Posieux 2005, Gevag Untervaz 2007, SIG Genf 2008, KVA Linthgebiet Niederurnen 2011).

## **7. 2010er Jahre - Jahrzehnt der Trockenentschlackung?**

Nachdem sich herausgestellt hatte, dass das Verfahren der selektiven Zerkleinerung mit trockener Schlacke effizienter ist, wurde nach Abschluss des Klus-Projektes seitens des Umtec nach Möglichkeiten sondiert, ob evtl. eine Verbrennungslinie auf einen Trockenaustrag der Schlacke umgerüstet werden könnte, um die Perspektiven dieses Verfahrens weiter aufzuzeigen. Die KEZO in Hinwil hat damals Interesse für einen Pilotbetrieb mit trockenem Schlackenaustrag gezeigt. Nach einem ersten Versuchsbetrieb im Juli 2005, bei dem über drei Tage rund 100 Tonnen Trockenschlacke gewonnen wurden, wurde im darauf folgenden Jahr zuerst die Linie 2 der KEZO auf Trockenentschlackung umgebaut. Dieser Umbau konnte nach Verbesserungsmaßnahmen zur Verhinderung von aufgetretenen Luftpulsationen bis Ende des Jahres 2007 abgeschlossen werden. Im Januar 2010 erfolgte dann der Umbau der Ofenlinie 1 von Nass- auf Trockenschlackenaustrag. Die Entwicklungsarbeiten der KEZO zur Metallsortierung konzentrierten sich zuerst auf die Feinfraktion. Im September 2008 wurde zur Aussortierung von metallischen Partikeln im Grössenbereich von 0.7 bis 5 mm eine Feinschlackenaufbereitung in Betrieb genommen. Zwei in Reihe geschaltete NE-Abscheider erzeugen ein NE-Metallgemisch, das im Wesentlichen aus Aluminium, Kupfer, Messing und Bronze besteht. Aus der Feinkornfraktion 0.7 - 5 mm kann ein Masseanteil in Höhe von 5% im NE-Produkt ausgebracht werden. Bezogen auf die gesamte Trockenschlacke entspricht dies einem Masseanteil von 0.5%. Im Jahr 2010 wurde dann eine weitere Sortieranlage in Betrieb gesetzt, mit der das NE-Metallgemisch in eine fast reine Aluminiumfraktion und eine NE-Schwerfraktion aufgetrennt werden kann, die bis zu 60% Kupfer enthält und in der auch bis zu 100 ppm Gold gefunden werden. Seit März 2012 existiert zudem eine Aufbereitungsanlage für die Feinstschlacke im Korngrössenbereich 0.2-1 mm, welche seit Juli 2012 kontinuierlich betrieben wird.

Im Jahr 2009 wurde die KVA der SATOM in Monthey auf eine Trockenentschlackung umgebaut. Nach der Behebung von technischen Problemen in der Anfangsphase, wobei unter anderem verschiedene Massnahmen zur Bekämpfung von Staubemissionen umgesetzt wurden, läuft die Anlage seit Mai 2010 im Dauerbetrieb. Die Vorteile des Trockenaustrags werden bei SATOM speziell darin gesehen, dass die abgetrennten Metallfraktionen in einer höheren Reinheit anfallen. Die Oberflächen sowohl des Eisenschrotts als auch der NE-Metalle sind sauber oder allenfalls nur von einer Patina bedeckt. Für den Eisenschrott können höhere Preise erzielt werden, da ein direkter Einsatz im Elektrostahlwerk möglich ist. Für die NE-Metalle grösser 6 mm finden sich direkte Abnehmer, nicht jedoch für die NE-Fraktion kleiner 6 mm, die stark verunreinigt ist und daher für eine weitergehende Aufbereitung an die Trockensortieranlage in Hinwil abgegeben wird. Eine Zunahme des Metallausbringens infolge des Trockenaustrags konnte von SATOM nicht festgestellt werden, was insbesondere darauf zurückgeführt werden kann, dass die ursprünglich für Nassschlacke konzipierte Sortieranlage nahezu unverändert auch zur Sortierung der Trockenschlacke weiterverwendet wird.

Die Anfänge des trockenen Schlackenaustrags liegen jedoch 20 Jahre zurück, als im August 1995 bei der KVA Trimmis mit Förderung des Integrierten Projekts Abfall ein trockener Schlackenaustrag erstmals erprobt wurde. ABB Umwelt hat in dieser Zeit das InRec-Drehrohrverfahren entwickelt, bei dem Filteraschen gemeinsam mit dem Feinanteil der Schlacken eingeschmolzen werden sollten. Da die Schlacke für die Aufgabe in einen nachgeschalteten Schmelzofen absolut trocken sein musste, war ein Trockenaustrag der Schlacke vorgesehen. Im Zuge dieses Projektes wurde zudem eine Trockenaufbereitung der Schlacke erprobt, bei der sogleich nach dem Rostabwurf eine Feinfraktion 0-2 mm abgetrennt wurde, die zur Einschmelzung vorgesehen war. Aus der Kornfraktion 2-32 mm wurden im Rahmen von Pilotversuchen Eisen und Nichteisenmetalle mit Magnet- und Wirbelstromabscheidern aussortiert, wobei 75% des Kupfers und 60% des Zinks als Metallfraktion abgetrennt werden konnten<sup>2</sup>.

## 8. Fazit

Seit den Anfängen der Müllverbrennung wurde versucht, durch Aufbereitung und Sortierung einen möglichst grossen Anteil der anfallenden Müllverbrennungsschlacke zu verwerten. In Deutschland wurden Müllverbrennungsschlacken von Anfang an großflächig einer bautechnischen Verwertung im Erd- und Straßenbau zugeführt,

---

<sup>2</sup> Paul Scherrer Institut: Forschung für eine nachhaltige Abfallwirtschaft - Schadstoffseparation und Produkteverwertung beim InRec-Verfahren, 1999

dadurch wurden schon immer hohe Recyclingquoten von mehr als 60% erreicht. Die überwiegende Anzahl der deutschen Müllverbrennungsanlagen liefern ihre Schlacke an Entsorgungsunternehmen, die Schlacken mehrerer Verbrennungsanlagen aufbereiten. Bei der mechanischen Schlackenaufbereitung fallen ca. 75% der Schlacke in einer Lieferkörnung 0/32 mm an, die in der Regel als untergeordnetes Baumaterial für Lärmschutzwälle, im Dammbau, Landschaftsbau, Deponiebau oder auch als Baumaterial für hydraulisch verfestigte Tragschichten im Strassen- und Wegebau eingesetzt wird. Weitere 10% Eisen- und Nichteisenmetalle werden bei der internen und externen Aufbereitung der Schlacken abgeschieden, so dass in Deutschland derzeit mehr als 85% der Schlacke aus Müllverbrennungsanlagen einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Der Rest wird auf Deponien beseitigt.

Anders ist die Situation in der Schweiz, wo seit Inkrafttreten der TVA im Jahr 1991 der Einsatz von Schlacken zum Strassen- und Dammbau als eine reine Übergangslösung verstanden wurde, bis eine weitergehende Behandlung möglich ist. Die aktuelle Fassung der TVA vom Januar 2010 ermöglicht zwar mit vielen Einschränkungen immer noch diese Art der Schlackenverwertung, da aber KVA-Schlacken weder Inert- noch Reststoffqualität aufweisen, hat der Gesetzgeber faktisch diesen Weg, der noch bis ins Jahr 1997 praktiziert wurde, aus guten Gründen über die Altlastenverordnung und Aushubrichtlinie geschlossen.

Dennoch werden im Rahmen von abfallwirtschaftlichen Planungen hohe Zielvorstellungen für die Verwertung von Kehrichtschlacken formuliert<sup>3</sup>. Das AWEL des Kantons Zürich fordert eine massive Steigerung der Verwertungsquote, um den knappen Deponieraum in der Schweiz zu schonen. Bis zum Jahr 2015 sollen 12% der Schlackenmenge aus allen Zürcher KVA's einer Verwertung zugeführt werden und im Jahr 2020 soll dann der Anteil an verwerteten Stoffen 50% betragen. Neue Verfahren zur Schlackenverwertung müssen sich daher daran messen lassen, ob mit ihnen ein entscheidender Schritt in Richtung dieser Verwertungsziele gegangen werden kann.

Es ist davon auszugehen, dass mit Trockenaustrag und Trockensortierung das Ausbringen an partikulären Nichteisenmetallen bis auf 85% gesteigert werden kann, da eine Sortierung bis in den Feinkornbereich (< 1 mm) möglich ist. Jedoch kann auch mit Aufbereitungsanlagen für nass ausgetragene Schlacke, deren Sortiertechnik in neueren Ausführungen bis auf 1 mm ausgelegt ist, ein Metallausbringen von 70-75% erreicht werden. Es bleibt dann noch ein Vorteil von

---

<sup>3</sup> AWEL: Massnahmenplan zur Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2011...2014

10-15%, resp. 3 bis 4 kg NE-Metalle, die bei einem Gesamtgehalt an partikulären NE-Metallen in Höhe von 3% mittels Trockensortierung zusätzlich pro Tonne Schlacke aussortiert werden können. Allein mit einer Verbesserung des Metallausbringens ist daher keine spürbare Steigerung der Recyclingquote möglich. Über die Metallseparation hinaus müsste ein wesentlicher Anteil an mineralischen Fraktionen aussortiert und verwertet werden. Grundsätzlich ist bei der Trockensortierung der Einsatz von Sensorsortierern zur Abtrennung weiterer mineralischer Stoffklassen möglich. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass nur ein 7-10 prozentiger Anteil an farblich sortiertem Glas sowie eine mineralische „helle Fraktion“, die sich aus Beton-, Stein- und Keramikbruchstücken zusammensetzt, auf diese Weise abtrennen lässt. Hinzu kommt, dass diese Fraktionen mit Schwermetallen belastet sind und daher eine Wiederverwendung, z.B. als Baustoff, bedenklich erscheint bzw. aufgrund von Grenzwertsetzungen nicht gestattet ist.

Recyclingquoten, wie sie im Massnahmenplan gefordert werden, sind nur denkbar, wenn die Verwertung von KVA-Schlacke als Baustoff möglich wäre. Aufgrund der bestehenden schweizerischen Umweltschutz-Gesetzgebung, in der die Schwermetallgehalte in solchen Materialien stark eingeschränkt werden, wäre aber für die relevanten Schwermetalle (Cu, Pb, Zn) eine mehr als 95%-ige Abreicherung bis auf Baustoffqualität erforderlich. Für die zur Wiederverwertung der KVA-Schlacken notwendige Schwermetallreduktion gibt es bis heute keine bzw. keine wirtschaftlichen Verfahren trotz jahrzehntelangen Ankündigungen. Auch mit dem Trockenaustrag sind die im aktuellen Massnahmenplan des AWEL geforderten hohen Recyclingquoten für KVA-Schlacken nicht erreichbar. Dass trotz effizienter Separation der Metalle aus der Trockenschlacke weder eine Rückführung des mineralischen Schlackenanteils in den Stoffkreislauf noch eine nachsorgefreie Deponierung möglich ist, wurde mittlerweile auch von der die Entwicklungsarbeiten zur Trockenschlacke finanzierenden Stiftung ZAR (Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung) erkannt<sup>4</sup>. Mit einer im September 2013 vollzogenen Neuausrichtung der ZAR-Forschungsbemühungen auf nasschemische Methoden (Extraktion der Schlacke mit Säuren oder Laugen) soll wieder ein bereits vor 20 Jahren verfolgter Ansatz zur Metallrückgewinnung aufgegriffen werden.

Dr.-Ing. Markus Franz im Juni 2014  
Nutec Engineering AG

---

<sup>4</sup> Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung ZAR, Geschäftsbericht 2013 (zu finden auf [www.zar-ch.ch](http://www.zar-ch.ch))