

Potenziale für Wertstoffrecycling aus Kehrriecht

Im Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung im Zürcher Oberland wurden mit einer Stoffflussanalyse für kritische und wertvolle Metalle sowie seltener Erden zum ersten Mal die Potenziale im Abfallinput und die Verteilung in einer Kehrriechtverbrennungsanlage umfassend und möglichst verlässlich bestimmt. Die Resultate sind wichtig zur weiteren Optimierung des Wertstoffrecyclings aus Kehrriecht.

Von Leo S. Morf und Daniel Böni

Mit Stoffflussanalysen können durch Messung der Massenflüsse des Kehrriechtinputs und der Verbrennungsprodukte sowie durch Analysen der Stoffkonzentrationen in den verschiedenen Verbrennungsprodukten die Stoffflüsse (z.B. von Kupfer, Chlor etc.) in einer Kehrriechtverbrennungsanlage (KVA) ermittelt werden. Eine einzelne Analysenmessung, wie etwa Kupfer in einer abgetrennten Metallfraktion aus der Schlacke, liefert als Resultat einen einzigen Konzentrationswert nur beschränkter Aussagekraft. Dagegen erlauben Stoffflussanalysen bezüglich der analysierten Stoffe das untersuchte System der KVA inklusive der Schlackenaufbereitung ganzheitlicher zu untersuchen. Nur das erlaubt verlässliche Aussagen zu Metallrückgewinnungsgraden oder (Rest-)Potentialabschätzungen. Dabei werden auch Fehlerabschätzungen mit in die Analyse integriert, um die Unsicher-



Die Aufbereitungsanlage für Feinschlacke (0,7–5 mm) und Feinstschlacke (0,2–0,7 mm) in der KVA Hinwil. Foto: R. Strässle

heit der Resultate aufzuzeigen. Diese Methode wurde in KVA seit den späten 80er Jahren in der Schweiz und anderswo mehrfach angewandt. Der Fokus lag aber mit wenigen Ausnahmen auf der Untersuchung von Schadstoffen (Quecksilber, Kupfer, Blei usw.). Natürlich sind einzelne der klassisch untersuchten Metalle nicht nur als Schadstoff wichtig, sondern auch als Wertstoffe (z.B. Kupfer, Blei). Aber bis heute wurden in KVA, aber auch in anderen Behandlungsverfahren der Abfallwirtschaft, noch praktisch keine umfassenden und verlässlichen Analysen der ökonomisch und ökologisch interessanten kritischen Metalle durchgeführt und publiziert. Für KVA deuten erst einzelne Publikationen auf interessante Potenziale einzelner Metalle (z.B. Antimon, Gold, Silber, Platin und Palladium) in einzelnen Verbrennungsprodukten hin; wie z.B. in [2].

Konzept weiterentwickeln

Das Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR) hat unter anderem den Auftrag, die thermische Abfallverwertung als integrierten Bestandteil der schweizerischen Ressourcenpolitik voran-

zubringen: Der Stand der Technik wird weiterentwickelt. Bezüglich der Optimierung der Rückgewinnung von wertvollen metallischen und mineralischen Rohstoffen aus den Verbrennungsrückständen soll ein wichtiger Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz geleistet werden. Durch die Substitution von Primärressourcen können auch langfristige Deponieemissionen und somit weitere Umweltemissionen stark reduziert werden. Dazu wird im ZAR konsequent das Konzept des Thermorecyclings (Thermo-re, geschützte Marke) angewandt und weiter optimiert. Thermo-re ist definiert als integrierter thermischer Recyclingprozess für Kehrriecht oder Restmüll. Es beinhaltet – unter Energiegewinnung – die Abfall(vor)behandlung, den thermischen Aufschluss und die Extraktion von Metallen und Mineralien aus dem Abfall sowie deren optimierte Aufbereitung. So soll die bestmögliche Behandlung der Verbrennungsprodukte garantiert werden.

In den letzten drei Jahren konnten am ZAR grosse Fortschritte erzielt werden. Der sogenannte Trockenaustrag – als ein essentielles Element des Thermo-re – funkti-

DR. LEO MORF

Vorsitzender des technischen Beirats des Zentrums für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR) in Hinwil, Zürich.

DANIEL BÖNI

Geschäftsführer des Zentrums für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR) in Hinwil, Zürich.

oniert seit Längerem problemlos. Auf dessen Basis ist es möglich geworden, grosse bis heute nicht zugängliche Metallpotenziale aus der Feinschlacke (0,7–5 mm) und seit Neustem auch aus der Feinstschlacke (0,2–0,7 mm) zurückzugewinnen. Einige Zahlen sollen den Erfolg unterstreichen: So wurden im Jahr 2011 aus den rund 40 000 Tonnen Schlacke, die jährlich in der KVA Hinwil anfallen, neben rund zehn Prozent Eisenschrott rund 900 Tonnen hochwertige Nichteisenmetallschrotte zurückgewonnen. Diese bestanden hauptsächlich aus Aluminium, aber auch grösseren Mengen an Kupfer, Zink, Silber usw.; sogar zehn Kilogramm Gold mit einem Marktwert von immerhin rund einer halben Million Franken konnten mit diesen Fraktionen in einem Jahr gewonnen und verkauft werden [3]. Auch konnten eindruckliche Resultate bezüglich noch nirgends erreichter Auf-

konzentrationsfaktoren vom Abfall in Verbrennungsprodukte mit nur mechanischer Aufbereitung unter geringstem Energieaufwand präsentiert werden. So liegt zum Beispiel der Kupfergehalt in den produzierten feinkörnigen Nichteisen-Edelfraktionen über 60 Gewichtsprozent und auch Goldgehalte von über 150 ppm (Teile pro Million) werden im Routinebetrieb erreicht.

Verlässliche Qualitätssicherung

Die Wichtigkeit eines verlässlichen Qualitätssicherungssystems bezüglich der Abfallannahme, Prozessführung, der Stoffflüsse, der Probenahme und -aufbereitung, Analyse usw. für die Rückgewinnung von hochqualitativen und marktfähigen Wertstoffen aus der thermischen Abfallbehandlung wurde in Hinwil früh erkannt. Erste Bilanzierungen in den ZAR-Aufbe-

reitungsanlagen zeigten in den Jahren 2008 bis 2010 selbst für «triviale» Metalle wie Kupfer, Blei und Aluminium, dass es mit üblich angewandten Methoden extrem schwierig beziehungsweise nicht möglich war, mit genügender Exaktheit wahre Analysenwerte zu generieren [4]. Darum wird in der Folge am ZAR neben der Weiterentwicklung der Anlagentechnik auch viel in die Weiterentwicklung der Qualitätssicherung investiert. Ohne diese Arbeiten wären die ersten umfassenden Analysen kritischer und wertvoller Elemente in KVA nicht möglich gewesen.

Bestimmung der Potenziale und Verteilung (Stoffflussanalyse)

Aufgrund der Tatsachen, dass

1. bisher keine umfassenden Daten zu Potenzialen und Verteilung von wertvollen und kritischen Metallen in KVA publiziert worden sind,
2. für die Weiterentwicklung des Thermo-re fundierte Grundlagen benötigt werden,
3. mittlerweile die Methoden der Qualitätssicherung (Probenahme, -aufbereitung und Analyse) sich für eine erste Untersuchung auf einem ausreichenden Niveau befanden,

wurde am ZAR entschieden, eine erste umfassende Stoffflussanalyse für die folgenden 31 Elemente durchzuführen: Wertvolle Metalle Gold und Silber, die kritischen Ressourcen Beryllium, Cobalt, Gallium, Germanium, Indium, Niob, Tantal, Wolfram sowie die Platingruppenelemente Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium sowie die Gruppe der seltenen Erden (Gadolinium, Neodym, Praseodym, Scandium und Yttrium). Ferner einige andere Metalle (Barium, Bismut, Blei, Hafnium, Lithium, Molybdän, Rubidium, Selen, Strontium, Tellur, Thallium, Vanadium und Zirconium).

Ausgewählte Resultate und wichtigste Erkenntnisse

2010 wurden in der KVA Hinwil am ZAR mittels einer «klassischen» Stoffflussanalyse alle relevanten Verbrennungsprodukte

- magnetische Metallfraktionen 0,7–5 mm
- Nichteisenmetallfraktion 0,7–5 mm (als Mischung der leichten NE-Fraktion und der schweren NE-Edelfraktion)

Noch wenig verlässliches Wissen

In den letzten Jahren stieg der weltweite Bedarf und damit die Produktion an wertvollen Metallen wie Gold, Silber, Platingruppenelementen und seltenen Erden (Neodym, Scandium, Yttrium usw.) stark an; zudem sind diese natürlichen Ressourcen limitiert vorhanden. Vor allem die Entwicklung von immer komplexeren Produkten für rohstoffintensive Zukunftstechnologien sind immer stärker abhängig von der Verfügbarkeit vieler dieser knappen Wertstoffe. Dazu kommt, dass viele der Elemente global ungleichmässig verteilt sind und oft in politisch instabilen Regionen gefördert werden. Die Weltmarktpreise sind grossen Schwankungen unterworfen. Das hat dazu geführt, dass weltweit verschiedene Initiativen zur genaueren Untersuchung dieser als kritisch eingestuft Situation gestartet und Strategien entworfen wurden. Die Europäische Union hat bereits im Jahre 2005 eine Strategie zur nachhaltigen Ressourcennutzung definiert und in verschiedenen Projekten wurden Verbrauch und Angebot von kritischen Ressourcen untersucht [1]. Eine Arbeitsgruppe hat im Jahr 2010 für die EU eine Auswahl von 15 kritischen Elementen definiert: Beryllium, Cobalt, Gallium, Germanium, Indium, Magnesium und weitere sowie Platingruppenmetalle und seltene Erden. Die Auswahl wurde getroffen aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung, des Angebotsrisikos und von Umweltaspekten. Mit der Gewinnung und Förderung solcher Primärressourcen in fernen Ländern sind auch

grosse Umweltbelastungen verbunden. Diese manifestieren sich in relevanten Anteilen an grauer Energie oder im ökologischen Fussabdruck für die Primärrohstoffförderung vieler kurz- oder langlebiger Konsumgüter. Diese Arbeiten und Erkenntnisse untermauern die Wichtigkeit bereits initiiert und angewandter «Urban Mining»-Konzepte. Darunter versteht man die Exploration der Rohstofflager im Zivilisationskreislauf, angewendet auf alle Prozesse der Material- und Rohstoffgewinnung aus Abfall.

Gross ist das Know-how im Bergbauwesen, gross ist auch der Aufwand, um weltweit neue primäre Wertstofflager (Minen) zu finden. Dagegen ist für viele Anwendungsbereiche des «Urban Mining» immer noch wenig oder kein verlässliches Wissen über Quellen und Senken von Wertstoffen für die erneute Nutzung vorhanden. Es fehlen schlicht effiziente und exakte Methoden zur verlässlichen Gewinnung von Wertstoffen in den «urbanen Minen». Gering ist das Know-how über die Zusammensetzung der immer komplexeren Konsumgüter auf chemischer Ebene. Nur sehr bescheiden sind zudem das Wissen zur Probenaufbereitung und Analyse von solchen Produkten oder die daraus entstehenden Abfallgemische (Bauabfälle, Elektronikschrott etc.). Auch für den thermisch zu entsorgenden Restabfall aus Haushalt und Gewerbe waren bis anhin praktisch keine Daten für die meisten der kritischen Metalle und seltenen Erden verfügbar.

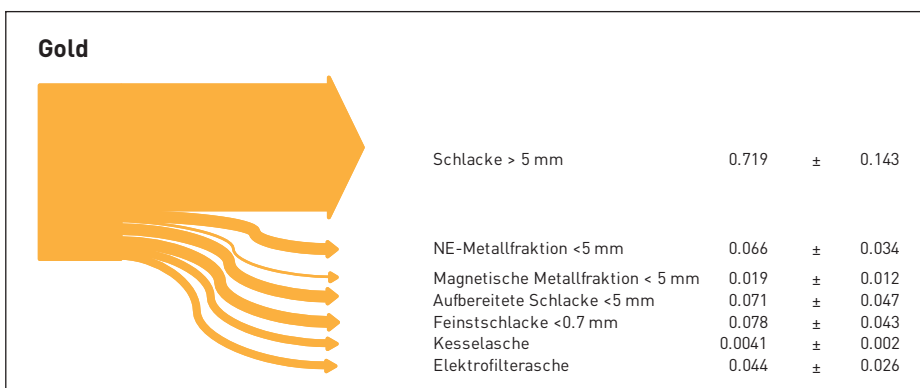
- aufbereitete Schlackefraktion < 5 mm
- Feinstschlacke < 0,7 mm
- Schlackefraktion > 5 mm, die noch nicht im ZAR aufbereitet wird, und
- Elektrofilter- bzw. Kesselasche

beprobte und auf die genannten Elemente analysiert. Andere Outputfraktionen der KVA spielten für die Analyse keine Rolle. Mit den Analysewerten, den gemessenen Jahresmengen aller relevanten Verbrennungsprodukte sowie der Inputmenge wurden dann alle Stoffflüsse, die Kehrrechtzusammensetzung und die Stoffverteilung inklusive derer Unsicherheiten berechnet; in [5] wurden alle Resultate veröffentlicht. In der Folge werden einige zentrale Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst.

Kehrrechtzusammensetzung

In Tabelle 1 sind die mittleren Konzentrationen im Kehrrechtinput der KVA Hinwil für das Jahr 2010 mit Angabe der geschätzten Unsicherheit für die ausgewählten wertvollen und kritischen Metalle und seltenen Erden dargestellt. Für die weiteren untersuchten 22 Metalle (inkl. Aluminium, Kupfer, Eisen etc.) wird auf die Publikation [5] verwiesen.

Anhand der Stoffflüsse in den Verbrennungsprodukten respektive den berechneten Kehrrechtkonzentrationen (Tabelle 1) können für die KVA Hinwil unter der Berücksichtigung des metallischen Anteils am Gesamtgehalt der Metalle aktuell erreichte Rückgewinnungsgrade bei der Aufbereitung respektive Gesamtpotenziale im Kehrrecht bestimmt werden. Die Resultate erlauben auch erste grobe Abschätzungen für die Situation in der Schweiz. Auf den ersten Blick täuschen die tiefen Gehalte in Tabelle 1 eine Rückgewinnung als ökonomisch und ökologisch uninteressant vor.



Grafik 2 zeigt die Verteilung von Gold in der KVA Hinwil (mittlere Transferkoeffizienten und deren Unsicherheit als Standardabweichung).

Element		Mittelwert (mg/kg)		Standardabweichung (mg/kg)
Silber	Ag	5.30	±	0.72
Gold	Au	0.40	±	0.20
Platingruppenmetalle (PGM)				
Platin	Pt	0.059	±	0.0220
Rhodium	Rh	0.000092	±	0.000050
Ruthenium	Ru	0.00050	±	0.00017
Seltene Erden				
Gadolinium	Gd	0.75	±	0.17
Neodym	Nd	7.26	±	3.0
Praseodym	Pr	1.9	±	0.85
Yttrium	Y	7.85	±	3.5
Andere kritische Metalle				
Beryllium	Be	0.28	±	0.031
Kobalt	Co	11	±	0.8
Gallium	Ga	2.2	±	0.14
Germanium	Ge	0.21	±	0.014
Indium	In	0.29	±	0.022
Niob	Nb	2.5	±	0.10
Tantal	Ta	1.2	±	0.54
Wolfram	W	56	±	48

Tabelle 1: Konzentrationen im Kehrrechtinput der KVA Hinwil für das Jahr 2010.

Grosse Stoffflusspotenziale im Kehrrecht

Die genauere Betrachtung zeigt aber Überraschendes: So liegt das gesamte Potenzial an Gold deutlich höher, als anhand des bisherigen bescheidenen Datenmaterials vermutet wurde. Allein für die KVA Hinwil liegt das Potenzial an Gold im Kehrrechtinput bei rund 81 Kilogramm pro Jahr. Im ZAR können davon derzeit maximal 15 Prozent zurückgewonnen werden. Auch für die anderen wertvollen und kritischen Elemente können trotz der scheinbar tiefen Konzentrationen in Tabelle 1 anspre-

chende Potenziale lokalisiert werden (z.B. Silber: 1,1 t/a; Neodym: 1,5 t/a).

Für die gesamte Schweizer Kehrrechtmenge von rund 3,3 Millionen Tonnen würde beispielsweise für Gold, das auf den ersten Blick interessanteste der gewählten Elemente, eine jährliche Fracht von 1,2 Tonnen ($\pm 0,6$ t) resultieren. Auch wenn diese Zahl heute noch sehr unsicher ist, ist der «Best-guess»-Wert um Faktoren höher als geschätzt anhand publizierter Daten zu Verbrennungsrückständen oder zu potenziell relevanten Quellen in KVA-Inputs (z.B. Elektronikschrott). Es besteht grosser Erklärungsbedarf bezüglich der Datenqualität solcher möglicher Inputquellen. Auch Vergleiche zu Einträgen in andere KVA wären interessant, um die Resultate besser beurteilen zu können. Für andere Elemente sind die mittleren Potenziale im Schweizer Kehrrecht aufgrund deren Vorkommen in Produkten noch viel grösser als für Gold (z.B. Wolfram: 160 t/a, Yttrium: 26 t/a, Silber: 18 t/a).

Spannend wird es ab 2014

Wie viel von diesen theoretischen Potenzialen im Kehrrechtinput in Zukunft einmal

wirtschaftlich genutzt werden kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Stark beeinflusst wird der Nutzungsgrad von den Marktpreisen für die Elemente. Eine grosse Rolle spielen auch die eingesetzte Technik, das Know-how des Personals sowie die Qualitätssicherung in der Produktion. Die Resultate der Stoffflussanalyse (SFA) liefern dabei wertvolle Informationen über aktuelle Rückgewinnungsraten bezogen auf die Gesamtpotenziale und Indikationen über weitere interessante Nutzungspotenziale. Aber erst die Kombination der SFA-Resultate mit Untersuchungen, Optimierungen und Kombinationen der verschiedenen verfahrenstechnischen Prozesse erlaubt eine weitere Gesamtsystemoptimierung. Die vorliegenden Resultate liefern wichtige Erkenntnisse über die aktuelle Leistungsfähigkeit des Thermo-re-Konzepts mit Trockenausstrag und Wertstoffrückgewinnung für Feinschlacke 0 bis 5 mm. Grafik 2 zeigt exemplarisch die für 2010 ermittelten mittleren Transferkoeffizienten für Gold in der KVA Hinwil. Dabei wird ersichtlich, dass im 2010 erst rund sieben Prozent des gesamten Goldes zurückgewonnen werden konnten. Mittlerweile kann nach der erfolgreichen Inbetriebsetzung der Feinstschlacke-Aufbereitung (< 0,7 mm) davon ausgegangen werden, dass die Rückgewinnungsrate sich innerhalb von zwei Jahren Optimierungsarbeit schon verdoppelt haben wird. Interessant wird es im



Seit 2012 wird in der KVA Hinwil auch die Nichteisen-Edelfraktion (0,2 – 0,7 mm) zurückgewonnen.
Foto: ZAR, Hinwil

Jahre 2014 nach Inbetriebnahme der neuen vom ZAR entwickelten Grossanlage durch die ZAV Recycling AG am KVA-Standort Hinwil. In der Anlage sollen neben den Fraktionen < 5 mm auch die Fraktionen > 5 mm mittels des Thermo-re-Ansatzes effizient aufbereitet werden. Die Herausforderung wird sein, möglichst viel des noch grossen erwarteten Anteils an Gold, aber auch andere Elemente aus der groben Schlacke zurückzugewinnen.

Ökologische Relevanz der Metalle

Die zukünftige Steigerung der Rückgewinnungsrate von Gold und anderen wertvollen respektive kritischen Elementen ist nicht nur aus ökonomischer Sicht wichtig, sondern auch ökologisch gesehen zentral, wie die Resultate der Analyse zutage führten. So zeigt sich zum Beispiel für Gold, dass trotz der rund 22 000-mal kleineren Menge im Vergleich zu Aluminium die vermiedene Umweltbelastung bei der Metallrückgewinnung aus dem Abfall im Vergleich zur Primärproduktion der Metalle, ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (Ecoindicator 99) für Gold im Vergleich zu Aluminium, praktisch identisch ist. Das bedeutet aus Umweltsicht, dass jedes Gramm Gold aus dem Abfall gleich wertvoll ist, wie wenn rund 22 Kilogramm Aluminium zurückgewonnen werden. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass mit der gesteigerten Goldrückgewinnung automatisch auch andere weniger wertvolle Schwermetalle wie Kupfer, Blei, Antimon usw. noch besser zurückgewonnen werden; damit vermeidet man zusätzlich spätere Umweltschäden, verursacht durch Sickerwasseremissionen auf Deponien. Diese Erkenntnis, dass wertvolle/kritische Metalle trotz massiv kleineren Mengen je nach Bewertung von ähnlicher ökologischer Rele-

vanz wie mengenmässig um drei bis fünf Grössenordnungen wichtigere Metalle (Aluminium, Kupfer und Zink) sind, ist zentral für die weitere Entwicklung im ZAR und bei der Umsetzung von wirkungsvollen «Urban Mining»-Konzepten.

Keine Stoffe verlieren

Die Stoffflussanalyse zeigt des Weiteren auch, dass eine grosse Herausforderung auch darin besteht, keine signifikanten Mengen an zukünftig als kritisch eingestuft, aber heute ökonomisch wenig wertvollen und ökologisch vielleicht weniger relevanten Stoffen zu «verlieren» (z.B. Indium, Wolfram). Hier sind übergeordnete und langfristig orientierte Ressourcennutzungskonzepte gefragt. Für das ZAR bedeutet es auch eine differenzierte, aber ganzheitliche Betrachtung der Metallrückgewinnung statt nur eines Fokus auf einzelne heute interessante Elemente.

Ausblick

Die Erkenntnisse der Stoffflussanalyse dienen der weiteren Entwicklung des Thermo-re-Konzepts. Konkret dienen die Resultate nun auch als eine Basis für die Planung und Entwicklung der neuen Grossanlage für die Schlackenaufbereitung. Andererseits dienen die Resultate auch der Weiterentwicklung der Qualitätskontrollinstrumente für die untersuchten Elemente. Geplant ist ab 2014, nach der Inbetriebnahme der neuen Grossanlage, eine erneute Analyse mit deutlich verbesserten Möglichkeiten zur Untersuchung des gesamten Kornspektrums der Schlacke. Schliesslich sind die Erkenntnisse der Studie auch mitentscheidend für die zielführende Definition und Optimierung der «Urban Mining»-Strategie im Kanton Zürich, aber auch von Nutzen auf nationaler Ebene. ■

Literatur

- [1] European Commission, 2010. Critical raw material for the EU – report of the ad-hoc working group on defining critical raw materials. European Commission (EC).
- [2] Muchova, L., Bakker, E., Rem, P., 2009. Precious metals in municipal solid waste incineration bottom ash, Water Air Soil Pollut: Focus (2009) 9: 107-116.
- [3] Strässle, R., (2012). Wertstoffrecycling am ZAR – Die Schlackenmanager, Umwelt Perspektiven 2-2012.
- [4] Morf, L., Taverna, R., Meister, R., 2011. Stoffbuchhaltung auf der KVA Hinwil, Endbericht.
- [5] Morf et al (2012). Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste – Sources and fate in a Swiss incineration plant; <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.010>