

## Neue Methoden zur Wertstoffgewinnung aus primären und sekundären Rohstoffquellen

Katrin Bokelmann, Thorsten Hartfeil, Katerina Kunkel, Michael Binnewies,  
Carsten Gellermann und Rudolf Stauber

1.	Elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ) .....	427
1.1.	Entschichten von Zierleisten aus galvanisch verchromtem ABS-PC.....	429
1.2.	Entstückung von Leiterplatten aus Elektroaltgeräten .....	431
2.	Chemische Gasphasenreaktionen.....	432
2.1.	Thermodynamische Betrachtungen .....	433
2.2.	Massenspektrometrische Untersuchungen.....	435
3.	Zusammenfassung .....	436
4.	Literatur.....	437

Eine gesicherte Rohstoffversorgung ist für Industrienationen in Europa essenziell. Mehr und mehr wird es notwendig, Rohstoffe aus sogenannten *End-of-Life*-Produkten zurückzugewinnen, um von Exporten aus Drittländern wie beispielsweise China unabhängig zu sein. Gleichzeitig führt eine Wiederverwertung von Reststoffen dazu, energieeffizientere Produktionsverfahren zu entwickeln, somit Kosten zu sparen und zu einer Verringerung des Klimawandels beizutragen.

Ein Recyclingprozess beginnt im Allgemeinen mit einem oder mehreren Zerkleinerungsschritten. Je nach Material kommen hier unterschiedliche Methoden zum Einsatz, die auf Druck (z.B. Einsatz eines Backenbrechers), auf Scherkräften (Schredder) oder auf Reibungskräften (Mühlen) beruhen. Meist dienen diese Methoden lediglich dazu, das Material zu homogenisieren. Weitere teils aufwändige Sortiermethoden müssen folgen, um hochwertige Fraktionen zu generieren. Dies hat zur Folge, dass das Potenzial vieler recyclingfähiger Materialien nicht ausgeschöpft werden kann, da ein wirtschaftlicher Recyclingprozess nicht zur Verfügung steht.

Ein Lösungsansatz besteht darin, bereits zu einem möglichst frühen Zeitpunkt der Wertschöpfungskette möglichst selektive Verfahren anzuwenden, um die Anzahl der Prozessschritte zu verringern.

### 1. Elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ)

Das Verfahren der elektrohydraulischen Zerkleinerung (EHZ) basiert auf Schockwellen, die durch gepulste Funkenentladungen entstehen und über ein flüssiges Trägermedium auf das Material übertragen werden. Durch diese kurzen, aber heftigen mechanischen

Stöße werden gezielt Schwachstellen im Material angegriffen: Die Trennung erfolgt an makroskopischen Verbindungsstellen (geklemmt, geklebt, geschraubt) oder an mikroskopischen Grenzflächen (Korn- oder Phasengrenzen). Hierdurch wird insbesondere für Hybridmaterialien eine gezielte Trennung an Materialgrenzen erreicht, die eine anschließende Sortierung der verschiedenen Werkstoffe möglich macht, ohne dass weitere aufwändige Trennschritte (beispielsweise mit Hilfe von chemischen Methoden) notwendig sind.

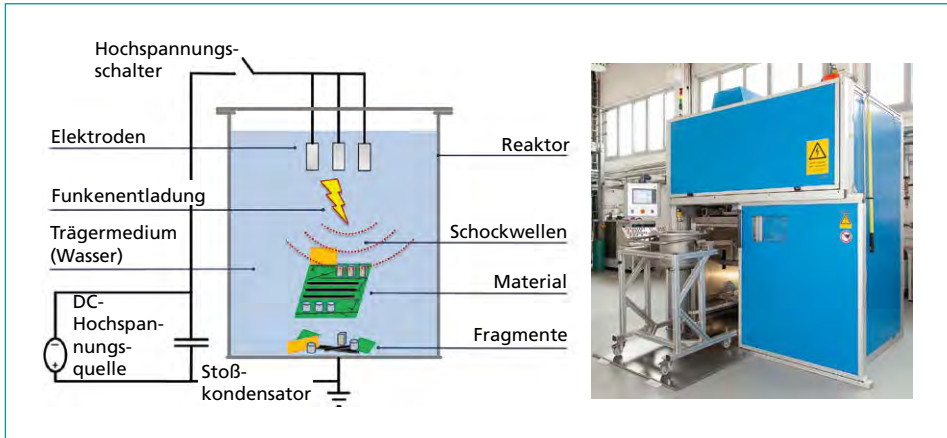


Bild 1: Funktionsprinzip der EHZ (links) und Pilotanlage für den halbautomatischen Batchbetrieb im Technikum der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS in Alzenau (rechts)

Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig, das Verfahren eignet sich sowohl für Materialverbunde als auch für Verbundmaterialien, wie z.B.:

- Zerkleinerung von Elektroaltgeräten (z.B. Mobiltelefone, Festplatten),
- Freisetzung von metallischen Einschlüssen aus mineralischen Schlacken,
- Aufschluss von Faser- und Schichtverbundwerkstoffen (z.B. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK), Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK), Glas-Folie-Lamine, galvanisierte Kunststoffe),
- Aufschluss von teilelastischen Verbundwerkstoffen,
- Kontaminationsfreie Zerkleinerung von hochreinen Materialien.

In Bild 1 links ist das Funktionsprinzip der EHZ dargestellt. Das zu zerkleinernde Material befindet sich in einem geschlossenen Reaktor umgeben von einem Trägermedium, in der Regel Wasser. Zwischen drei höhenverstellbaren Elektroden und dem Reaktorboden finden die Funkenentladungen statt, die von einer Hochspannungselektronik gesteuert werden. Dadurch entstehen schnell expandierende Plasmakanäle, die über das Wasser als Schockwellen mit lokalen Drücken von einigen tausend Bar auf das Material übertragen werden [2].

Die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS verfügt über eine Pilotanlage, die für Versuche im halbautomatischen Batchbetrieb ausgelegt ist (Bild 1 rechts). Die Anlage kann im Regelbetrieb mit Elektrodenspannungen bis 40 kV und Entladungsfrequenzen bis 4 Hz betrieben werden. Es stehen zwei Reaktoren mit 29 l bzw. 39 l Volumen zur Verfügung.

### 1.1. Entschichten von Zierleisten aus galvanisch verchromtem ABS-PC

Als Designelement im Automobilbereich sind Zierleisten aus galvanisch verchromtem ABS-PC sowohl im Interieur als auch am Exterieur zahlreich zu finden [4]. Die Qualitätsanforderungen sind in diesen für den Kunden sichtbaren Bereichen sehr hoch, Fehlstellen oder eine frühzeitige Abnutzung bzw. Ablösung der Metallschichten werden von den Automobilherstellern nicht toleriert. Entsprechend streng sind die Spezifikationen, die ein aus Produktions- oder Konsumabfällen gewonnenes Kunststoffgranulat einhalten muss.

Für Experimente mit galvanisch verchromtem ABS-PC in der EHZ wurde das Versuchsmaterial zunächst von äußerlich anhaftendem Schmutz befreit und händisch auf eine Stückgröße von etwa 5 cm geschnitten. Insgesamt wurden 146 Teile mit einer Gesamtmasse von etwa 1 kg im Reaktor behandelt. Einige Teile wurden vor dem Versuch mit einem Binärsystem codiert, um eine schnelle und einfache Identifizierung zu ermöglichen (Bild 2 links). Als Versuchsparameter wurden 40 kV Elektrodenspannung bei 2 Hz Entladungsfrequenz gewählt. Der Versuch wurde iterativ durchgeführt, d.h. nach einer definierten Anzahl von Impulsen wurde der Reaktor geöffnet und sämtliche Teile entnommen.



Bild 2: Teile des Versuchsmaterials vor der EHZ (links) und nach 1.000 Impulsen (rechts); die einzelnen Teile sind für eine schnelle und eindeutige Identifizierung mit einem Binärsystem codiert

Lose anhaftendes Schichtmaterial wurde durch Abspülen entfernt, anschließend wurden die Teile leicht trocken getupft und gewogen. Das gesamte Material inklusive Prozesswasser wurde danach wieder zurück in den Reaktor gegeben und die nächste Impulsfolge gestartet. Das Versuchsmaterial wurde einer kumulierten Anzahl von 1.000 Impulsen ausgesetzt. Der erste optische Eindruck verspricht eine nahezu vollständige Entschichtung des Materials (Bild 2 rechts).

Mit Hilfe der erhobenen Daten lässt sich der quantitative Zusammenhang zwischen der Anzahl der Impulse bzw. der Versuchszeit und der Masse der abgelösten Schicht und dem damit verbundenen spezifischen Energieverbrauch darstellen (Bild 3).

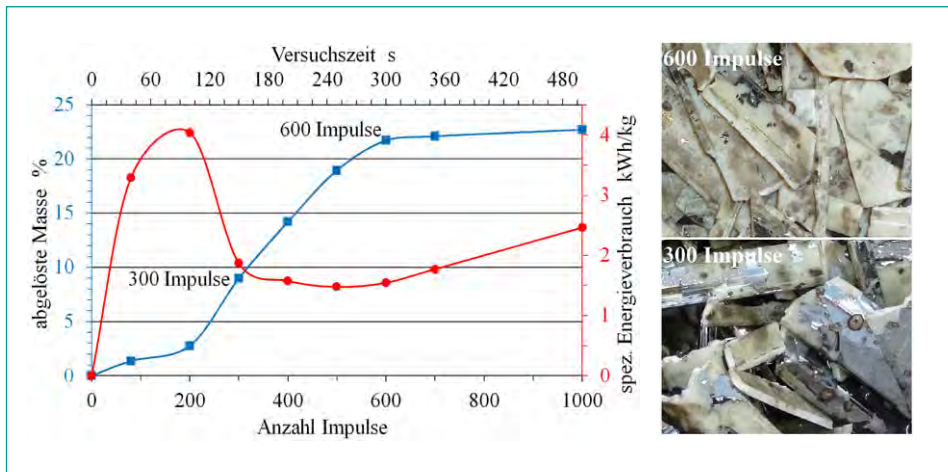


Bild 3: Abgelöste Masse und spezifischer Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Anzahl der Impulse bzw. der Versuchszeit (links); Zustand des Versuchsmaterials nach 300 Impulsen (rechts unten) und 600 Impulsen (rechts oben)

Der zu Beginn flache Anstieg der abgelösten Masse ist die Folge eines anlagenspezifischen Einfahreffekts. Nach einem annähernd linearen Verlauf zwischen 200 und 600 Impulsen flacht die Kurve erneut ab, weil der größte Teil der Beschichtung bereits abgelöst ist. Nach 300 Impulsen zeigt sich bereits eine deutliche, aber noch unvollständige Ablösung der Beschichtung (Bild 3 rechts unten), nach 600 Impulsen sind nur noch geringfügige Anhaftungen zu erkennen (Bild 3 rechts oben). Am Ende des Versuchs konnten von den eingesetzten 1.002 g Zierleisten 775 g entschichteter Kunststoff mit minimalen Metallanhaftungen, 175 g Metallbeschichtung und 49 g Sediment aus dem Prozesswasser zurückgewonnen werden. Während des Einfahrens steigt der spezifische Energieverbrauch bis zu einem Maximum bei knapp 200 Impulsen an und fällt danach auf ein Minimum zwischen 400 und 600 Impulsen ab. In diesem Bereich liegt in Bezug auf die Energieeffizienz der optimale Betriebspunkt für die gewählten Prozessbedingungen.

Entscheidend für die Eignung des Materials zur direkten Wiederverwendung im Spritzguss- und Galvanikprozess sind die Restmetallgehalte nach der Entschichtung. Um die Restmetallgehalte zu bestimmen, wurden jeweils 5 Stücke des entschichteten ABS-PC in 1 mol/l HCl bzw.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  gegeben und für mehrere Stunden bei 50 °C gerührt.

Anschließend wurden die Konzentrationen von Kupfer, Nickel und Chrom in den Lösungen mit Hilfe von optischer Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (ICP-OES) bestimmt.

Die Ergebnisse der chemischen Analyse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Alle drei Metalle der Beschichtung konnten in beiden Proben quantitativ nachgewiesen werden. Allerdings sind deutliche Unterschiede bei den Konzentrationen zu erkennen. Während die Verhältnisse der Metalle zueinander annähernd gleich sind, ist die Gesamtkonzentration der Metalle in Probe 2 doppelt so hoch wie in Probe 1. Das zeigt, dass das Ergebnis der Entschichtung einer gewissen Verteilung unterliegt, die unter anderem von der Stückgröße und der Reaktorbeladung bestimmt wird. In weiteren Versuchen mit unterschiedlichen Stückgrößen zeigte sich, dass eine Verwendung kleinerer Stückgrößen nicht zu einer Verbesserung der Materialtrennung führt. Insgesamt kann das Ziel einer Reinheit von > 99 Prozent mit Hilfe des EHZ-Verfahrens erreicht werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der chemischen Analyse (ICP-OES) der Restmetallgehalte nach 1.000 Impulsen; die Proben 1 und 2 bestanden aus jeweils 5 Stücken des entschichteten ABS-PC

Element	Probe 1 Konzentration mg/kg	Probe 2 Konzentration mg/kg
Cu	164	347
Ni	109	216
Cr	2	3
<b>Gesamt</b>	<b>275</b>	<b>566</b>

## 1.2. Entstückung von Leiterplatten aus Elektroaltgeräten

Elektroaltgeräte (EAG) sind ein äußerst komplexer und vielschichtiger Abfallstrom mit einem großen Potential für die Gewinnung von sekundären Rohstoffen. Der Wertgehalt von EAG konzentriert sich, sofern vorhanden, auf die Leiterplatten, die mit einer Vielzahl unterschiedlicher elektrotechnischer Bauteile bestückt sind. Neben Kupfer als Hauptbestandteil finden sich dort viele Edel- und Platingruppenmetalle wie Gold, Silber und Palladium aber auch andere technologisch relevante Metalle wie Gallium oder Tantal. Nach derzeitigem Stand der Technik werden die Leiterplatten durch mechanische Aufbereitung oder manuelle Demontage von den Geräten getrennt und als besonders hochwertige Fraktion in Kupferhütten verarbeitet. Dort gelingt eine sehr effiziente Rückgewinnung des Kupfers sowie sämtlicher in Kupfer löslicher Edelmetalle. Weitere Metalle wie Zinn können über das Blei ausgetragen werden. Trotz der weit entwickelten Technologie gibt es jedoch auch Metalle, die in den Schlacken und Abgasen verloren gehen, wie das erwähnte Gallium und Tantal [7].

Diese Verluste sind nur dann zu vermeiden, wenn für die Kupferhütten ungeeignete Metalle gar nicht erst in diese Prozesse gelangen. Dazu bedarf es einer tiefgehenden Zerlegung der Leiterplatten, um differenziertere Fraktionen erzeugen zu können [3].

Für den EHZ-Versuch wurde eine einzelne Leiterplatte mit gemischter Bestückung gewählt und bei einer Elektrodenspannung von 30 kV und einer Entladungsfrequenz von 1 Hz prozessiert. Bereits nach 2 Impulsen kommt es zu einer ersten Ablösung von Bauteilen. Nach insgesamt 4 Impulsen ist ein Großteil der Bauteile abgelöst, eine nahezu vollständige Entstückung wird nach nur 8 Impulsen erreicht (Bild 4).

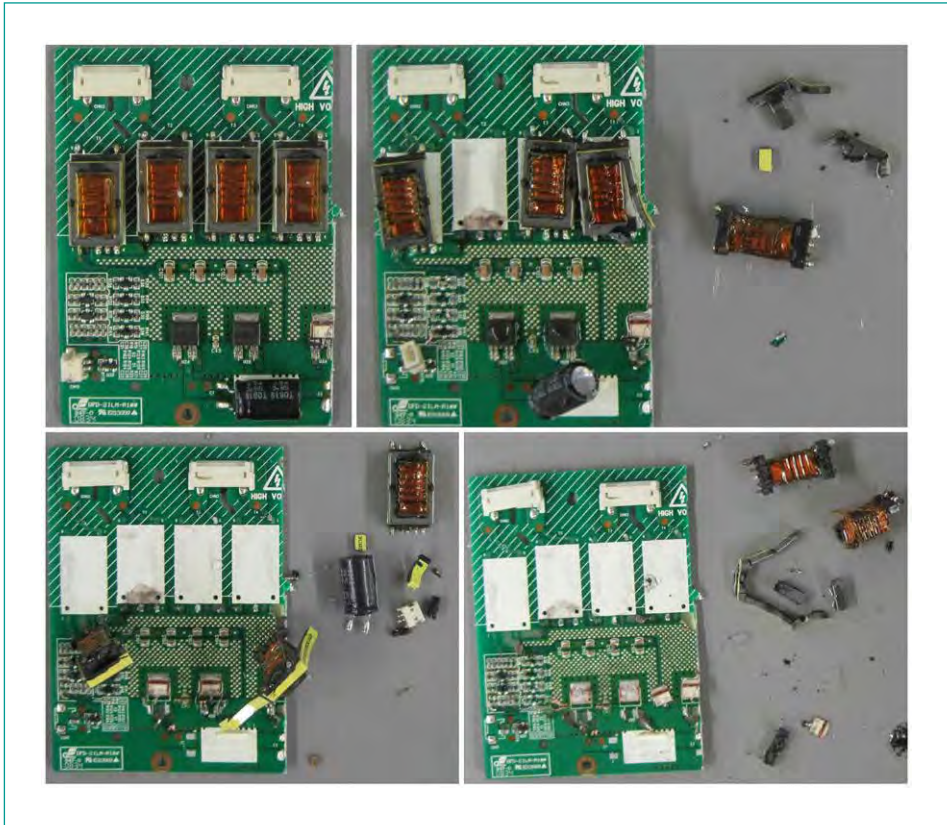


Bild 4: Bestückte Leiterplatte aus einem EAG vor der EHZ (links oben), nach 2 Impulsen (rechts oben), nach 4 Impulsen (links unten) und nach 8 Impulsen (rechts unten)

Während die Leiterplatte bei den geringen Impulszahlen intakt bleibt, sind einige der Bauteile bereits leicht bis stark beschädigt. Eine einfache Trennung von Leiterplatte und Bauteilen kann durch einen geeigneten Siebschnitt realisiert werden, eine nachfolgende Sortierung der Bauteile in weitere Fraktionen wird jedoch durch die Beschädigungen erschwert. Trotzdem ist davon auszugehen, dass bereits in der Bauteilmischung eine deutlich höhere Konzentration unedler Technologiemetalle und eine niedrigere Konzentration von Kupfer vorliegen als in der bestückten Leiterplatte. Eine wichtige Voraussetzung für die separate Verwertung der Bauteile außerhalb des Kupferhüttenprozesses ist damit erfüllt.

## 2. Chemische Gasphasenreaktionen

In bestimmten Fällen befinden sich Wertstoffe jedoch chemisch gebunden in einer Matrix, so dass eine rein mechanische Trennung nicht möglich ist. In diesem Fall bieten Fest/Gas-Reaktionen die Möglichkeit, bestimmte Bestandteile eines Mehrkomponentensystems in Form flüchtiger Verbindungen abzutrennen. Diese Bestandteile können

elementar oder in Form verschiedenster Verbindungen in einem Abfall, beispielsweise einer Asche, enthalten sein. Auch die Art der Beimengungen (Matrix) kann sehr unterschiedlich sein.

Es können allgemeingültige Aussagen darüber getroffen werden, welche gasförmigen Spezies dieser Elemente prinzipiell für eine Abtrennung über die Gasphase infrage kommen. In manchen Fällen haben die Elemente selbst bei der gewählten Prozesstemperatur einen genügend hohen Dampfdruck, um in hinreichendem Umfang in die Gasphase überzugehen und dann ausgetragen werden zu können. Wenn die abzutrennenden Elemente in der jeweiligen Probe nicht elementar vorliegen, sie aber in elementarer, gasförmiger Form abgetrennt werden können und sollen, müssen sie zunächst durch eine geeignete Reaktion, z.B. mit einem Reduktionsmittel wie Wasserstoff in den elementaren Zustand überführt werden. In einigen Fällen kommt die Bildung von leicht flüchtigen Sauerstoffverbindungen in Betracht. Zahlreiche Elemente bilden leicht flüchtige Halogenverbindungen. Eine Übersicht wurde bereits vor kurzem publiziert [1].

## 2.1. Thermodynamische Betrachtungen

Der erste Schritt muss also die Auswahl einer geeigneten, möglichst leicht flüchtigen Spezies des wiederzugewinnenden Elements sein. Im darauf folgenden Schritt wird nach einer Reaktion gesucht, durch welche die ausgewählte Spezies bei technisch sinnvollen Bedingungen in hinreichendem Umfang, kostengünstig und möglichst selektiv gebildet wird. In einer solchen Diskussion muss das ausgewählte Reaktionsgleichgewicht gemeinsam mit dem Verdampfungsgleichgewicht der flüchtigen Spezies berücksichtigt werden. Dies soll anhand von zwei Beispielen erläutert werden. Das Element Indium wird in Form von Indium-Zinn-Oxid als transparente, leitfähige Schicht in Displays verwendet und auf Glasplatten aufgebracht. Displays bieten somit als End-of-Life-Produkte das Potenzial, als Rohstoffquelle für Indium zu dienen, wenn Indium wirtschaftlich lohnenswert aus den Displays abgetrennt und zurückgewonnen werden kann. Mit Hilfe von Fest/Gas-Reaktionen ist es möglich, Indium-Zinn-Oxid in leicht flüchtiges Indium(III)-chlorid zu überführen. Eine thermodynamische Diskussion der Gleichgewichtslage verschiedener infrage kommender Reaktionen ergibt, dass sowohl Chlor als auch Chlorwasserstoff prinzipiell geeignet sind. Die Gleichgewichtslage ist bei der Reaktion mit Chlorwasserstoff jedoch günstiger, so dass Chlorwasserstoff bevorzugt eingesetzt wird. Es lässt sich durch Erhitzen von Ammoniumchlorid freisetzen. In Bild 5 ist die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtslage für die Umsetzung von Indiumoxid mit Ammoniumchlorid dargestellt.

Es ist demnach sinnvoll, vor Beginn der Experimente zunächst thermodynamische Betrachtungen der in Frage kommenden Reaktionen durchzuführen. Auf diese Weise erhält man wertvolle Informationen darüber, unter welchen Bedingungen eine Fest/Gas-Reaktion in der Praxis durchführbar ist und kann die Laborversuche entsprechend planen. Trotzdem ist eine Überprüfung der theoretischen Untersuchungen unabdingbar, um die Reaktionsbedingungen bezogen auf das zu untersuchende Recyclinggut zu optimieren. Im Fall des Beispiels Indium-Zinn-Oxid ist es sinnvoll, Ammoniumchlorid bei einer bestimmten Temperatur zu zersetzen und das so gebildete Gas bei einer höheren

Temperatur mit dem Indium-haltigen Material zur Reaktion zu bringen. Auf diese Weise können das Ausmaß der Zersetzung von Ammoniumchlorid und die Gleichgewichtslage der Verflüchtigungsreaktion unabhängig voneinander gesteuert werden.

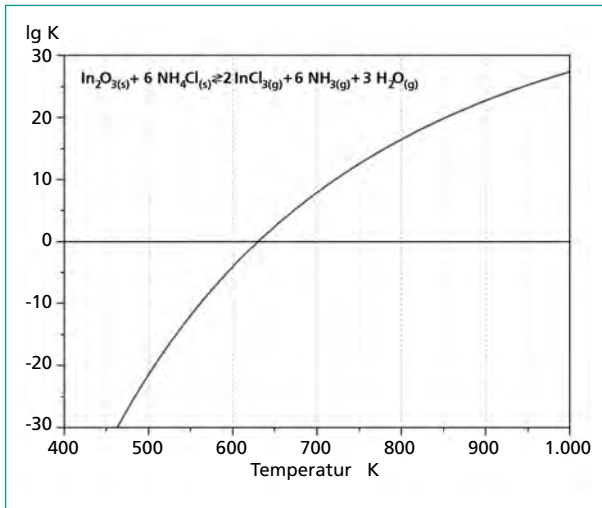


Bild 5:

Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtslage für die Umsetzung von Indiumoxid mit Ammoniumchlorid

Ein weiteres Beispiel betrifft die Rückgewinnung von Gallium. Gallium findet in Form verschiedener Verbindungen als Halbleiter Anwendung und wird, beispielsweise in Form von Galliumnitrid, in Leuchtdioden verwendet. Thermodynamische Betrachtungen zeigen, dass die Rückgewinnung von Gallium aus Galliumnitrid mit Hilfe von Fest/Gas-Reaktionen in Form von leichtflüchtigem Gallium(II)-chlorid möglich ist, das in diesem Fall mit Hilfe von Chlorgas gebildet werden kann. Der Logarithmus der Gleichgewichtskonstanten der entsprechenden Reaktion (Bild 6) ist über einen breiten

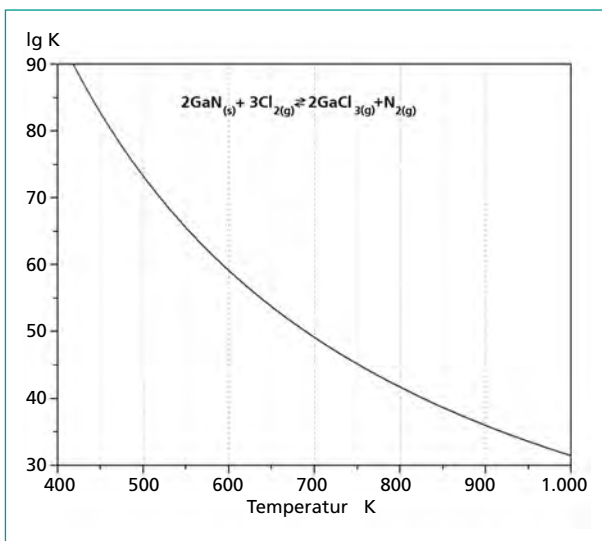


Bild 6:

Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtslage für die Umsetzung von Galliumnitrid mit Chlorgas



Temperaturbereich positiv. Die Rückgewinnung von Gallium kann jedoch nur erfolgen, wenn Gallium in die Gasphase überführt wird, so dass die Reaktionstemperatur vom Dampfdruck des Gallium(III)-chlorids bestimmt wird.

## 2.2. Massenspektrometrische Untersuchungen

Insbesondere bei Kombinationen von Elementen, die in unterschiedlichen Verbindungen vorliegen, können thermodynamische Untersuchungen schwierig sein.

In solchen Fällen sind experimentelle Untersuchungen für die Ausarbeitung eines Trennkonzpts notwendig. Das Ziel einer solchen Untersuchung ist es, die bei der Reaktion eines Feststoffgemischs mit einem zuvor ausgewählten reaktiven Gas gebildete Gasphase hinsichtlich ihrer qualitativen und quantitativen Zusammensetzung zu charakterisieren. Zeigt eine solche Untersuchung, dass der abzutrennende Stoff bzw. das abzutrennende Element in die Gasphase überführt wird, können die Randbedingungen (Druck bzw. Temperatur) variiert werden, um die Abtrennung so spezifisch wie möglich zu gestalten. Da diese Trennverfahren in aller Regel bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden müssen, ist eine Untersuchungsmethode anzuwenden, die es gestattet, Hochtemperaturgase zu charakterisieren. Derartige Methoden sind im Prinzip lange bekannt und eingehend beschrieben [5, 8, 6]. Als eine besonders gut geeignete Methode hat sich im Laufe der Zeit die Massenspektrometrie erwiesen. Da kommerzielle Massenspektrometer für derartige Untersuchungen nicht geeignet sind, wurde am Fraunhofer IWKS ein Massenspektrometer aufgebaut, das es gestattet, die Reaktion von Feststoffen und Feststoffgemischen mit Gasen bei Temperaturen bis zu etwa 1.000 °C zu verfolgen. Bild 7 zeigt eine schematische Darstellung des Massenspektrometers. Es besteht aus zwei Hochvakuumrezipienten, die durch jeweils eine Turbomolekularpumpe evakuiert werden. Der Rezipient 1 enthält das Massenspektrometer mit dem Quadrupolanalysator, bestehend aus Elektronenstrahl-Ionenquelle, Massenfilter mit Molybden-Quadrupol-Stäben sowie einen *off axis*-Sekundärelektronenvervielfacher (SEV). Ein Hochfrequenzgenerator (nicht dargestellt) erzeugt die für die Massentrennung erforderliche Hochfrequenzspannung. Ein Elektrometer-Vorverstärker verstärkt die sehr kleinen Ionenstrom- bzw. Elektronenstromsignale des Analysators. Der Rezipient 2 enthält eine Knudsenzelleinrichtung aus Kieselglas, in der chemische Reaktionen bis hin zu etwa 1.000 °C untersucht werden können. Beide Rezipienten sind durch ein Ventil voneinander getrennt. Im geöffneten Zustand durchquert der die Knudsenzelle verlassende Molekularstrahl dieses Ventil und tritt in die Ionenquelle ein. Die Knudsenzelleinrichtung wird durch einen aus Sinterkorund gefertigten Ofen beheizt. Der Flansch, auf dem dieser Ofen aufgebaut ist, ist so konstruiert, dass der Ofen durch eine Justiereinrichtung in zwei zueinander senkrecht stehenden Richtungen um jeweils einige Grad gekippt werden kann. Auf diese Weise wird erreicht, dass der Molekularstrahl genau auf die Eintrittsöffnung der Ionenquelle ausgerichtet werden kann. Die Vakuummessgeräte dienen für Hochvakuummessungen.

Zur Untersuchung einer Fest/Gas-Reaktion wird der Feststoff in der Knudsenzelle mit Gas-einleitung platziert, so dass das Gas mit dem Material zur Reaktion gebracht werden kann.

Sobald eine Temperatur erreicht wird, bei der sich eine oder mehrere gasförmige Verbindungen bilden, wird von diesen ein Massenspektrum aufgenommen. Man kann somit die unterschiedlichen Verbindungen den verschiedenen Reaktionstemperaturen zuordnen und daraus wertvolle Informationen gewinnen, wie ein geeignetes Trennverfahren für das jeweilige Stoffgemisch entwickelt werden muss.

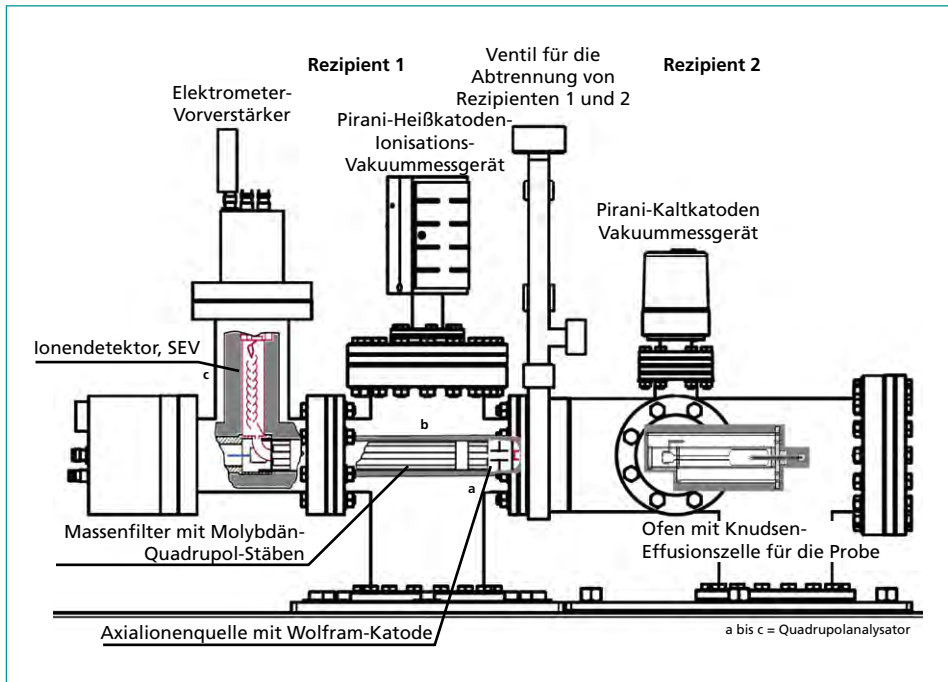


Bild 7: Schematische Darstellung des am Fraunhofer IWKS aufgebauten Massenspektrometers

### 3. Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt zwei unterschiedliche Technologien, mit deren Hilfe es möglich ist, im Rahmen eines Recyclingprozesses Stoffe selektiv zu trennen und somit Prozessschritte in konventionellen Verfahren einzusparen. Die Verfahren eignen sich sowohl für die Rückgewinnung von Wertstoffen aus primären sowie sekundären Rohstoffquellen.

Bei der ersten Technologie handelt es sich um ein spezielles Verfahren zur mechanischen Zerkleinerung. Mit Hilfe der *Elektrohydraulischen Zerkleinerung* ist es möglich, durch Schockwellen Materialien an ihren Phasengrenzen zu separieren. Dies wird am Beispiel von galvanisierten Kunststoffen dargestellt. Das Verbundsystem wird an der Grenze Metall/Kunststoff so aufgetrennt, dass in einem einfachen Verfahren ohne hohen energetischen Aufwand hochwertiger Kunststoff zurückgewonnen werden kann. Am Beispiel von Leiterplatten wird zudem deutlich, dass auch makroskopische Grenzflächen wie Verklebungen, Verschraubungen usw. mit Hilfe des Verfahrens

aufgetrennt werden können. Auf diese Weise wird es möglich, hochwertige Bauteile der Leiterplatten wie beispielsweise Kondensatoren selektiv abzutrennen und einer weiteren Verwertung zuzuführen.

Die zweite beschriebene Technologie beruht auf einem chemischen Prozess, den sogenannten chemischen Gasphasenreaktionen. Hiermit können Wertstoffe unter spezifischen Reaktionsbedingungen aus Gemischen wie Schlacken oder Aschen selektiv in eine leichtflüchtige chemische Verbindung überführt und damit abgetrennt werden. Die Prozessbedingungen werden über gezielt durchgeführte thermodynamische Berechnungen sowie begleitende Untersuchungen in einem speziellen Massenspektrometer für eine spätere Anwendung in einem industriellen Aufarbeitungsverfahren spezifiziert.

## 4. Literatur

- [1] Binnewies, M.; Bokelmann, K.; Gellermann, C.; Gäth, S.; Stauber, R.: Konzepte zur Wiedergewinnung strategischer Metalle über die Gasphase, Chem. Ing. Tech. Vol. 87, Nr. 11, 2015, S. 1486-1497
- [2] Bluhm, H.; Frey, W.; Giese, H.; Hoppé, P.; Schultheiß, C.; Sträßner, R.: Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, Nr. 5, 2000, S. 625-635
- [3] Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D.: Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV-Fachbericht 38, 2012
- [4] Dahlhaus, M.: Auf Hochglanz gebracht – galvanisierte Kunststoffe im Automobilbau, JOT Journal für Oberflächentechnik, Vol. 41, Nr. 9, 2001, S. 60-65
- [5] Eyring, L. (Ed.): Advances in High Temperature Chemistry, Academic Press, London, 1967.
- [6] Margrave, J. L. (Ed.): The Characterization of High Temperature Vapors, Wiley, New York, 1967.
- [7] Reuter, M.; van Schaik, A.: Opportunities and Limits of WEEE Recycling – Recommendations to Product Design from a Recyclers Perspective, Electronics Goes Green 2012+ (EGG), 2012
- [8] Rutner, E.; Goldfinger, P.; Hirth, J. P. (Eds.), Condensation and Evaporation of Solids, Gordon and Breach, New York, 1964



Deutschlands Online-Magazin  
für die Recyclingwirtschaft

++ Immer online ++ Immer verfügbar ++ Immer aktuell ++



Jetzt 6 Wochen kostenfrei testen!  
[www.320grad.de](http://www.320grad.de)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):  
**Recycling und Rohstoffe – Band 10**

ISBN 978-3-944310-34-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

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

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2017  
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.  
Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Anne Kuhlo, Sandra Peters,  
Ginette Teske, Gabi Spiegel, Cordula Müller  
Druck: Universal Medien GmbH, München

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

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

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