

8 Der Kreislauf der Platinmetalle - Recycling von Katalysatoren

Christian Hagelüken

1 Einführung/Motivation

Katalysatoren für die Abgasreinigung von Kraftfahrzeugen enthalten die Edelmetalle Platin (Pt), Palladium (Pd) und Rhodium (Rh). Weltweit wurden zwischen 1980 und 2004 kumuliert knapp 3.000 t Platingruppenmetalle (PGM) für Autoabgaskatalysatoren eingesetzt, davon entfallen rund 1.400 t auf Pd, 1.250 t auf Pt und 280 t auf Rh. Die Primärproduktion an diesen Metallen betrug im gleichen Zeitraum fast 7.300 t, d.h. der Autoabgaskatalysator stellt - wie ausführlich in Kapitel 4 dargestellt - mit rund 40% das insgesamt wichtigste Nachfragesegment für PGM dar.

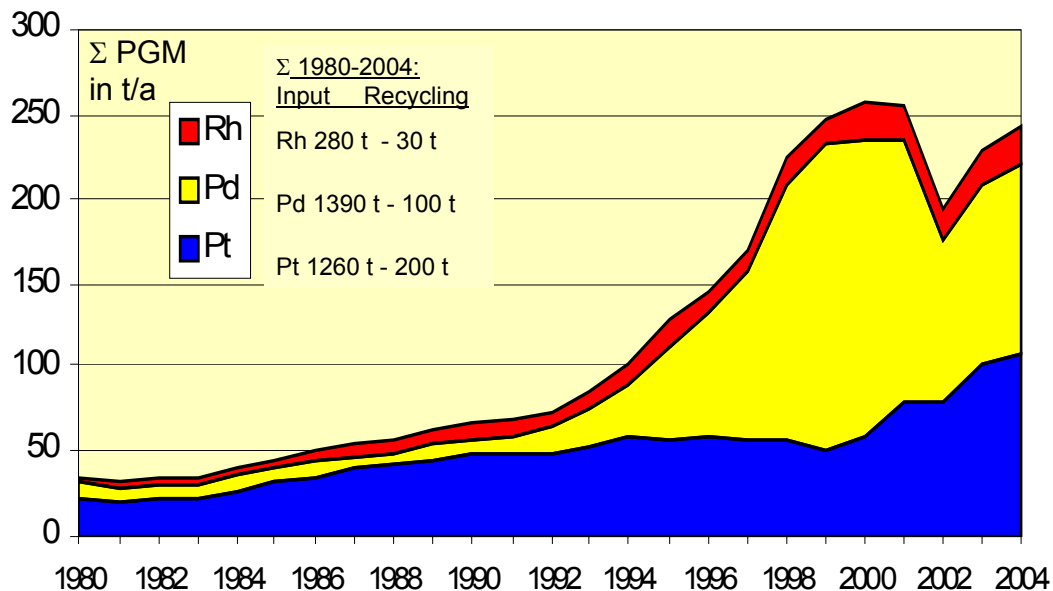


Bild 1: Bruttobedarf an Platin, Palladium und Rhodium für Autokatalysatoren weltweit (Werte nach [1])

Mit der Verbreitung des Autoabgaskatalysators und der Entwicklung bei der Abgasgesetzgebung ist der jährliche Gesamtbedarf an PGM für Autokatalysatoren kontinuierlich gestiegen, von knapp 35 t im Jahr 1980 auf 270 t in 2004 (Bild 1). Die Lebensdauer des Katalysators erreicht in der Praxis heute in den meisten Fällen die des Fahrzeuges, d.h. der starke PGM-Nachfrageanstieg der letzten 10 Jahre ist bisher für den Recyclingmarkt noch kaum relevant gewesen. Es kann davon ausgegangen werden, dass kumuliert im Jahr 2004 - nach Abzug von bisherigen Recyclingmengen (ca. 340 t) und Verlusten durch nicht recycelte Katalysatoren - von den zuvor genannten 3.000 t PGM noch rund 2.000 t in mit Autoabgaskatalysatoren ausgestatteten Fahrzeugen im Einsatz sind. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff von der "rollenden Platinmine" geprägt und in der Tat stellt diese PGM-Menge

- gut 4,5 mal so groß wie die jährliche Primärproduktion - eine wichtige Versorgungsquelle für die Zukunft dar, sofern sie durch effiziente Recyclingprozesse erschlossen werden kann. Insbesondere gilt dies für Europa, das über keine eigenen PGM-Minen verfügt und wo durch eine spätere Einführung von Katalysatoren der Nachfrageanstieg noch deutlicher ausgefallen ist (Bild 2). Bis 1993 ist für Europa das klassische Verhältnis Pt:Rh von 5:1 zu erkennen. Aus den Grafiken ist ersichtlich, dass von 1993-1999 die Nachfrageexplosion fast ausschließlich durch den Pd-Einsatz bedingt wurde, während in den Jahren danach die Entwicklung durch Pt vorangetrieben wurde (Dieselkat in Europa).

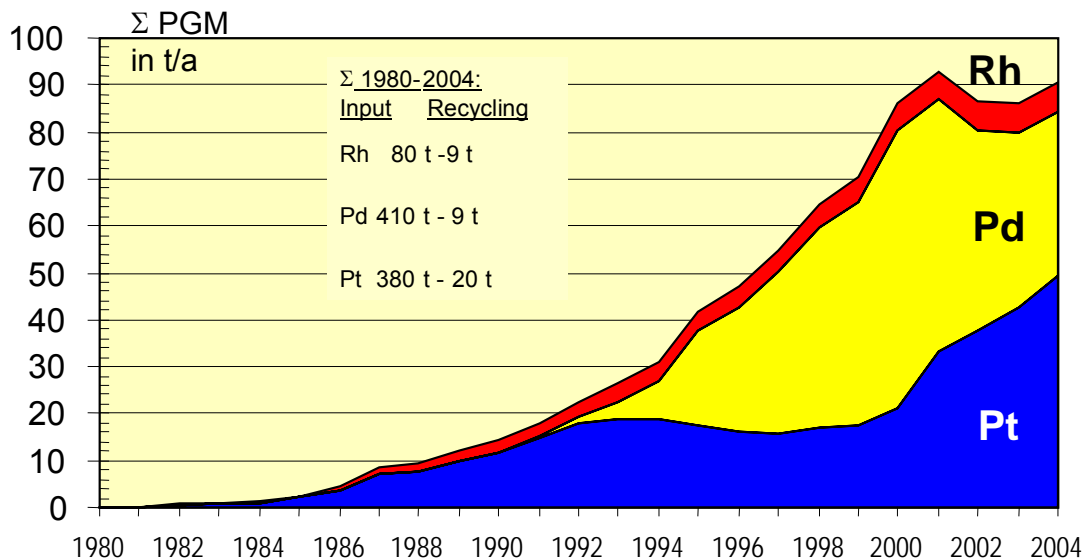


Bild 2: Bruttobedarf an Platin, Palladium und Rhodium für Autokatalysatoren in Europa (Werte nach [1])

Durch den Wert der Platingruppenmetalle ist das Recycling schon aus rein ökonomischen Gründen sinnvoll und wird bereits erfolgreich praktiziert. Die zurückgewonnenen Edelmetalle werden - ohne Qualitätseinbußen - erneut für die Herstellung neuer Katalysatoren eingesetzt. Der weltweit durch das Recycling gedeckte Anteil¹ am PGM-Bruttobedarf für Autokatalysatoren lag 2004 bei 20% für Pt, 12% für Pd und 19% für Rh (vgl. Tab.1 und Kapitel 4). Die Recyclingmengen stammen heute noch überwiegend aus Nordamerika und Japan², wo PKW bereits seit den siebziger Jahren mit Kats ausgestattet werden und heute nahezu jedes dort verschrottete Auto einen Kat besitzt. Kumulativ konnten bisher ca. 10% der von 1980-2004 für Autokatalysatoren eingesetzten PGM aus dem Recycling gedeckt werden. Wie in Kapitel 11 ausführlich dargestellt, weist Recycling von Autokatalysatoren neben den wirtschaftlichen auch deutliche ökologische Vorteile gegenüber der Primärproduktion auf.

¹ Hierbei handelt es sich um die sogenannte "statische Recyclingquote" [3], die nur eingeschränkt Auskunft über die Effizienz des Recyclings gibt (da auch der Bruttobedarf auf den aktuellen Zeitpunkt bezogen wird). Bei Produkten mit langer Lebensdauer in stark dynamischen Märkten ist die wichtigere Maßzahl die "dynamische Recyclingquote" ("welcher Anteil der vor x Jahren für die Kat-Herstellung eingesetzten PGM wird am Ende der Kat-Lebensdauer wieder zurückgewonnen?"). Hierauf wird ausführlich in Abschnitt 6 eingegangen.

² Viele der japanischen Altfahrzeuge bzw. Katalysatoren werden im benachbarten asiatischen Raum recycelt, daher sind die in Tab. 1 für Japan angegebenen Recyclingwerte eher niedrig.

	Bruttobedarf AAK [t/a]				Recycling-Menge AAK [t/a]				
	Pt	Pd	Rh	PGM	Pt	Pd	Rh	PGM	Kat-Keramik
Europa	49,5	35,0	6,3	90,8	4,3	3,3	0,9	8,8	3.000
Japan	16,5	18,5	6,0	41,0	1,9	1,2	0,5	3,6	2.000
Nord-Amerika	26,0	43,2	5,1	74,3	13,7	10,7	2,5	26,8	14.000
Rest Welt	14,8	16,8	5,2	36,8	1,7	1,1	0,3	3,0	2.000
Gesamt	106,7	113,5	22,6	242,8	21,6	16,3	4,3	42,2	21.000

Tabelle 1: PGM-Bruttonachfrage für Autoabgaskatalysatoren (AAK) und Recycling aus Autokats in 2004 (PGM-Werte nach [1] u. eigene Berechnungen)

Nicht zuletzt durch den 1999/2000 stattgefundenen dramatischen Preisanstieg bei den Platingruppenmetallen (vgl. Kap. 4) hat auch die Automobilindustrie die Bedeutung des Katalysatorrecyclings für eine langfristig sichere und bezahlbare Versorgung mit PGM erkannt und beschäftigt sich zunehmend mit dem Thema.

Die Gründe für das Katalysatorrecycling lassen sich damit unter drei Schlagworten zusammenfassen: Gesicherte Versorgung mit Platinmetallen, Stabilisierung der PGM-Preise und umweltfreundliche Produktion. Im folgenden werden die verschiedenen für das Kat-Recycling wichtigen Aspekte erläutert: Stoffströme/Recyclingkette, Marktstruktur und Entwicklung des Recyclingvolumens, Sammellogistik, technische Verfahren der PGM-Rückgewinnung, Geschäftsabwicklung, Edelmetallkreislauf, Ökologie. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt dabei auf Europa.

2 Komponenten und Bauformen von Recycling-Katalysatoren

Im Zentrum des Katalysatorrecyclings stehen die wertvollen Platingruppenmetalle, die gewichtsmäßig nur einen sehr geringen Anteil am Katalysator ausmachen. Wie in den vorausgegangenen Kapiteln ausführlich beschrieben, sind die PGM feinstverteilt im sogenannten "Washcoat" auf einem keramischen oder metallischen Katalysatorträger aufgebracht. Ziel des Recycling ist, diese PGM möglichst vollständig aus dem Katalysator zurückzugewinnen mit der Randbedingung, dass auch die anderen Komponenten des Kat-Konverters - Stahlgehäuse und Katalysatorträger - einer Weiterverwendung zugeführt werden können und die gesamte Recyclingkette auch unter ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll gestaltet wird.

Dabei sind mit Art des Katalysatorträgers (Metall oder Keramik; Monolith oder Pellets), Edelmetallbeladung und Bauform des Katalysators andere Faktoren von Bedeutung, als bei Entwicklung und Produktion. Bauform, Katalysatorvolumen und Edelmetallinhalt pro Kat sind je nach Automobilhersteller, Einsatzregion, Motorversion und Produktionsjahr verschieden. Die Bandbreite des Gewichts der Kat-Keramik reicht von ca. 0,6 - 4,5 kg pro Pkw, oft auf mehrere Konverter verteilt. Die Edelmetallbeladung liegt - bezogen auf das Gewicht des Katalysatorträgers (inkl. Washcoat) - zwischen 0,1% und 0,5%, wobei Pt, Pd und Rh in unterschiedlichsten Beladungsverhältnissen auftreten können, mit starken Abweichungen je nach Baujahr und auch zwischen Europa, Nordamerika und Fernost. [3]

Wichtig ist, dass die heute für das Recycling zur Verfügung stehenden Katalysatoren die Entwicklung der letzten 15 Jahre widerspiegeln, mit einem naturgemäß großen Anteil an älteren Katalysatoren. So ist in einer typischen europäischen gemischten Altkat-Partie aus dem End-of-Life Bereich noch immer der "klassische" Pt/Rh = 5:1-Kat mit einer Beladung von 30-50 g/ft³ vorherrschend, Pd spielte hier lange eine untergeordnete Rolle, gewinnt inzwischen aber an Bedeutung. Eine Mischpartie in Deutschland von Recyclingkatalysatoren aus Autoverwertung (End-of-Life) und Werkstattentsorgung (Kat-Austausch) kann neben dem klassischen Kat auch höher beladene, Pd-dominierte Kats neueren Typs aufweisen, der Durchschnittsgehalt hier liegt z.B. bei Pt = 0,12%, Pd = 0,07%, Rh = 0,015%. In Nordamerika und Fernost wiederum liegt die Beladung der Recycling-Kats in der Regel deutlich unter der in Europa, mit einem "typischen" Gehalt von 0,1% Pt, 0,03% Pd und 0,01% Rh.

Edelmetall-Konzentration und -Verhältnis variieren heute sehr viel stärker als noch vor wenigen Jahren. Tendenziell hat von EU I bis EU IV die Vielfalt an unterschiedlichen Katalysatorbeladungen erheblich zugenommen. Die zuvor genannten Entwicklungen führen dazu, dass bereits heute und noch sehr viel stärker in den kommenden Jahren die Vielfalt an Recycling-Kats zunehmen wird. Katalysatoren gleicher Baugröße können völlig unterschiedliche Edelmetallbeladungen (20 g/ft³ - 200 g/ft³) und PGM-Kombinationen aufweisen (z.B. Pd-dominiert oder Pt-dominiert). Bei Bewertung der Beladungsoptionen mit den aktuellen PGM-Preisen (mit großer Preisspanne zwischen Pt und Pd) resultiert daraus auch eine zunehmende Spanne im monetären Wertinhalt eines Altkats, bis zu Faktor 10 bei gleichem Katalysatorvolumen. Dies wird dazu führen, dass selbst der Fachmann durch in Augenschein nehmen des Recyclingkatalysators nicht mehr in der Lage sein wird, den voraussichtlichen Edelmetallinhalt und Wert zu taxieren. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies mittelfristig zu einer grundsätzlichen Änderung der Geschäftspraxis in der Recyclingkette führen wird.

Die zuvor genannten "typischen" Gehalte sollten keinesfalls als Durchschnittswerte für kommerzielle Berechnungen angesetzt werden, gleiches gilt für eine Mittelwertbildung aus Beladungsspannen. Auch die nachgenannten Gewichtsangaben sind nur als Anhaltspunkt zu sehen, um Angaben zu Stückzahlen und Tonnagen besser einschätzen zu können: Bei einem Keramik-Konverter beträgt das Gewicht des beschichteten Trägers bezogen auf das Konvertergewicht (ohne Rohre) etwa 15-20%, das durchschnittliche Trägergewicht pro Fahrzeug liegt bei einem Altkat in Deutschland bei 0,9 - 1 kg, in vielen anderen europäischen Ländern liegt es wegen eines höheren Anteils von Fahrzeugen mit kleinerem Hubraum (und Kat-Volumen) noch darunter. In Nordamerika mit durchschnittlich größerem Motorvolumen ist auch das Keramikgewicht pro Alt-Katalysator entsprechend größer.

3 Anforderungen an eine optimierte Recyclingkette

Um das Recyclingziel einer möglichst vollständigen Rückgewinnung der PGM aus Autokatalysatoren zu erreichen, sind - heruntergebrochen auf die einzelnen Stufen der Recyclingkette - folgende Teilziele von Bedeutung:

- Eine optimale Nutzung des Recyclingpotenzials, d.h. die möglichst vollständige Erfassung aller theoretisch für das Recycling verfügbaren Kat-Konverter.
- Eine optimale Trennung und Erfassung des PGM-haltigen Kat-Trägers/ Washcoats aus dem Konverter.
- Eine möglichst verlustarme Scheidung (d.h. Rückgewinnung) von Platin, Palladium, Rhodium aus dem PGM-haltigen Träger/Washcoat.
- Eine hohe Transparenz und Zuverlässigkeit über die gesamte Recyclingkette.

In Tabelle 2 sind zu diesen Teilzielen die im Detail zu optimierenden möglichen Verlustquellen aufgeführt.

Der Grad der Zielerreichung, d.h. die unter dem Strich erzielbare Recyclingquote der gesamten Kette ist abhängig von Gesetzgebung/praktischer Umsetzung, Organisation/Logistik, Technik und nicht zuletzt der Erfahrung und Seriosität der Teilnehmer in der Akteurskette. Dabei ist es für den Gesamtprozess irrelevant, wo die Verluste auftreten. Wie in Abschnitt 8.2 dargestellt wird, ist die größte Transparenz heute beim PGM-Refining gegeben, wo Eingangs- und Ausgangsströme genau analysiert werden. Je nach Prozesstechnik werden hier z.B. bei Pt/Pd Ausbeuten von 95-98% erreicht, d.h. die PGM-Verluste sind sehr gering. Trotzdem wird vor allem diesem Schritt oft sehr große Bedeutung zugemessen, andere Schritte wie Erfassung oder Entmantelung können bei genauer Betrachtung für die Gesamt-Recyclingquote aber eine sehr viel höhere Relevanz haben. Wenn z.B. durch mangelnde Organisation nur 5% der im End-of-Life Bereich vorhandenen Kat-Konverter nicht ausgebaut werden, oder wenn bei der Entmantelung 5% Verstaubungs- oder sonstige Trägerverluste auftreten, dann bedeutet dies ebenfalls einen PGM-Verlust von jeweils 5%. Die bei der technisch sehr anspruchsvollen PGM-Scheidung auftretenden Verluste würden also schon im Vorfeld übertroffen.

Im folgenden werden die der Recyclingkette zugehörigen Organisationsformen und Verfahren beschrieben, von der Erfassung des Konverters bis hin zur Darstellung der Feinmetalle Pt, Pd, Rh. Neben möglichst hohen PGM-Ausbeuten sind dabei auch die anfallenden Kosten und der Zeitbedarf (Kapitalbindung!) wichtig. Die Recyclingkette ist zudem so zu gestalten, dass die damit verbundenen Umweltbelastungen minimiert werden und die Abläufe transparent und dokumentierbar sind.

Teilziele	Mögliche Verlustquellen für PGM
Vollständige Erfassung der Kat-Konverter	<p>Fahrzeug wird nicht recycelt ("wilde" Deponie)</p> <p>Export des Fahrzeugs außerhalb des Recyclingkreislaufs</p> <p>Kat-Konverter wird nicht demontiert (und gelangt mit Fahrzeug in den Shredder)</p> <p>Konverter wird demontiert, aber falscher Fraktion zugeordnet (z.B. Stahlfraktion)</p> <p>Konverter wird demontiert, aber nicht oder mit starker zeitlicher Verzögerung dem Recycling zugeführt (Hortung, Einsatz des Kats als Ersatzteil)</p>
Vollständige Erfassung des PGM-haltigen Kat-Trägers/Washcoat	<p>Betriebsverluste von PGM-haltigem Kat-Träger/Washcoat durch thermische oder mechanische Beschädigung, hervorgerufen z.B. durch mangelnde Wartung (z.B. Zündungsfehl-einstellung, schadhafte Aufhängung des Abgasstrangs), unsachgemäßen Betrieb, schlechte Straßenverhältnisse oder durch Mängel des Konverters (Canning; Abstimmung von Träger, Quellmatte und Gehäuse; Auslegung des Übergangs Rohr, Konus, Katalysator)</p> <p>Verluste von Kat-Träger/Washcoat während Sammlung, Transport und Lagerung der Recyclingkats (Bruch, Staub, Abplatzen des Washcoats bei Metallkats)</p> <p>Unsaubere Trennung von PGM-haltigem Träger/Washcoat bei Entmantelung (z.B. durch Anhaftung oder Einklemmen in Kat-Gehäuse oder Quellmatte; Sortierfehler bei Entmante-lung)</p> <p>Verstaubungsverluste von PGM-haltigem Washcoat durch fehlende oder ungenügende Absaugung, mangelhafte Verfahrenstechnik bei Kat-Entmantelung, mangelhafte Arbeitshygiene)</p>
vollständige Rückge-winnung der PGM beim Refining	<p>PGM-Einträge (Verluste) in Schlacken, Ausmauerung, Abgas oder Stäube bei der pyrometallurgischen Rückgewinnung</p> <p>PGM-Einträge in Abwasser, Schlämme, Restlösungen oder Löserückstände bei der hydrometallurgischen Gewinnung</p> <p>PGM-Einträge in Unedelmetall-Seitenströme (z.B. Cu, Ni) oder in andere Edelmetalle (z.B. Pd in Ag, Rh in Pd)</p>
Transparenz und Zuverlässigkeit der Recyclingkette	PGM-Verluste durch Unachtsamkeit, Wiege-/Probenahme-/Analysefehler, Diebstahl/Betrug, mangelhafte Organisation

Tabelle 2: Anforderungen an eine optimierte Recyclingkette für Autokatalysatoren und mögliche Verlustquellen

4 Akteurskette beim Katalysator-Recycling

Die prinzipielle Akteurskette ist in Bild 3 dargestellt. Zu unterscheiden sind drei Hauptebenen: Primäre Anfallstellen für Recycling-Kats, Sammellogistik/Kat-Entmantelung sowie das eigentliche PGM-Refining (Scheidung). Je nach (lokaler) Ausprägung können die einzelnen Ebenen noch weiter vertikal unterteilt sein. Die Zahlenangaben zu den einzelnen Ebenen beziehen sich auf Deutschland, die zunehmende Konzentration entlang der Kette gilt grundsätzlich auch für andere Länder. Landesgrenzen haben in der Realität keine Bedeutung, wie im Bild dargestellt kommt es auf allen Ebenen der Recyclingkette zu grenzüberschreitenden Stoffströmen (in beiden Richtungen).

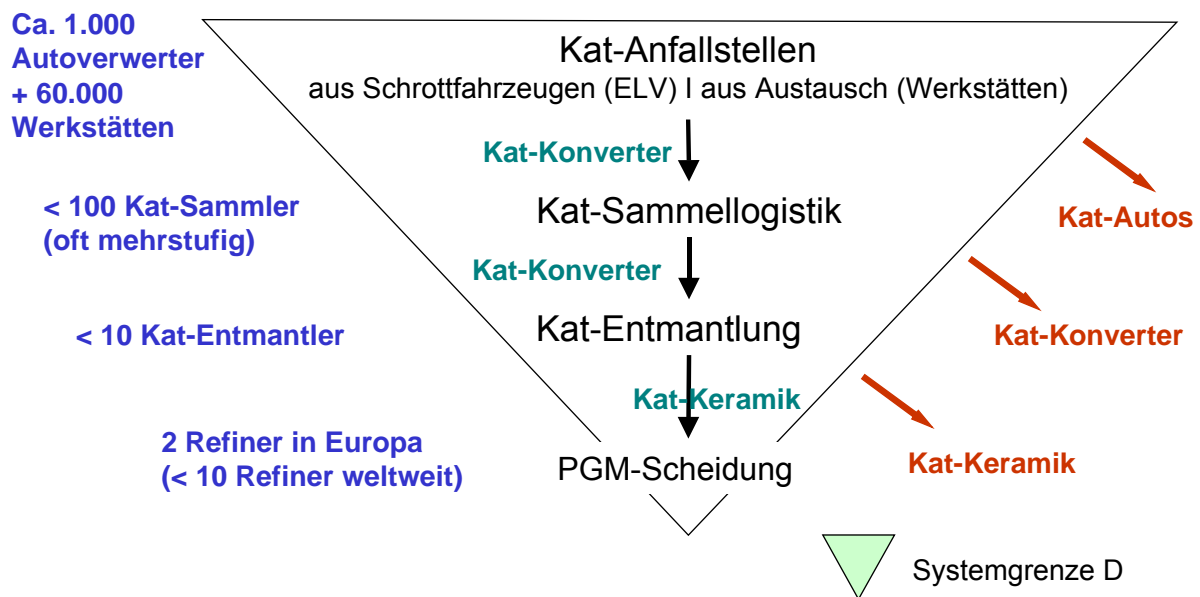


Bild 3: Akteurskette beim Recycling von Autokatalysatoren

4.1 Anfallstellen für Recycling-Katalysatoren

Geringe Mengen *Produktionsausschuss* fallen an bei der Katalysatorentwicklung und -Beschichtung, beim Canning sowie beim Automobilhersteller (Entwicklungs- und Prüflabors, Crashtests etc.). Hierbei handelt es sich definitionsgemäß um Neukatalysatoren, die Beladungen entsprechen dem aktuellen Stand der Kat-Entwicklung. Die Erfassungsquoten sind hier sehr hoch.

Während der *Gebrauchsphase* des Fahrzeugs werden schadhafte Katalysatoren in *Werkstätten* ausgetauscht und in der Regel von dort mit nur geringen Verlusten dem Recycling zugeführt. Zu unterscheiden ist zwischen Vertragswerkstätten der Automobilfirmen, freien Werkstätten sowie Werkstattketten, die einen speziellen Service rund um die Abgasanlage anbieten. Bei den Vertragswerkstätten fallen durch Gewährleistungsfälle und die hohe Kundenbindung bei neueren Fahrzeugen auch größere Anteile an jüngeren Recyclingkatalysatoren an, die Ketten hingegen verfügen weitgehend über ältere Kat-Typen.

In der *Nachgebrauchsphase*, d.h. bei Abmeldung/Verschrottung durchläuft das Altfahrzeug in der Regel eine mehrstufige Kette, beginnend bei *der Annahmestelle* (die auch eine Werkstatt sein kann) über den *Autoverwerter*/Demontagebetrieb bis

hin zum *Shredderbetrieb*. Sofern der Shredderbetrieb nicht gleichzeitig Annahmestelle für das Altfahrzeug ist, sind hier in den meisten Fällen die Katalysatoren bereits entfernt³. Mit Ausnahme von Unfallfahrzeugen sind die Recycling-Kats aus dem End-of-Life Bereich Typen, die vor oft deutlich über 10 Jahren hergestellt wurden. Hier ist der "klassische" Pt/Rh-Kat noch vorherrschend. Auch in Deutschland sind viele Schrott-Fahrzeuge noch nicht mit einem Kat ausgerüstet. Hier wirkt sich ein weiterer Effekt verzögernd aus: Bei den Fahrzeugen, die von 1985 bis 1993 in Deutschland mit Kats ausgestattet wurden, dominierten vor allem in den ersten Jahren die Ober- und Mittelklasse-Pkw. Diese haben tendenziell sowohl höhere Lebensdauern als auch eine größere Attraktivität für den Export und stehen damit für das Recycling erst später oder - bei Export aus Europa heraus - auch gar nicht zur Verfügung. Katalysatoren aus Unfallfahrzeugen werden häufig als Ersatzteile verkauft und - bei passender Geometrie - wieder in anderen Fahrzeugen verwendet.

4.2 Sammellogistik und Entmantelung

Voraussetzung für das wirtschaftliche Recycling von Autokats ist eine sinnvoll koordinierte Arbeitsteilung. Allein in Deutschland existieren mit knapp 60.000 Kfz-Betrieben und Werkstätten sowie ca. 1000 Autoverwertern eine Vielzahl von potenziellen Anfallstellen. Eine Schlüsselfunktion für das Kat-Recycling kommt damit dem Logistiksystem zu.

Verschiedene, meist mittelständige Firmen haben sich in diesem Bereich engagiert, von reinen Logistikfirmen, die häufig im Unterauftrag Übernahme- und Transportdienstleistungen anbieten, über Entsorgungs- oder Metallhandelsfirmen bis hin zu spezialisierten Kat-Recycling Firmen, die neben Ankauf und Transport auch die Vorbereitung (Entmantelung) für die PGM-Scheidung übernehmen. Noch vor einigen Jahren spielten dabei Firmen mit branchenspezifischen Entsorgungsleistungen eine wichtige Rolle, die neben Katalysatoren oft auch andere Recyclingmaterialien übernahmen. Inzwischen decken die spezialisierten Kat-Recyclingfirmen einen großen Teil des Marktes ab, hier sind die erforderlichen Spezialkenntnisse und die Besonderheiten der Geschäftsabwicklung (s. Abschnitt 8) ausschlaggebend.

Die gesammelten Kat-Konverter werden der Zerlegung (Entmantelung) zugeführt, d.h. die PGM-haltige *Keramik* wird vom Stahlgehäuse getrennt. Die Stahlfraktion wird in der Regel direkt vermarktet, der Keramikanteil zur PGM-Scheidung abgegeben. Für die Entmantelung werden in der Regel hydraulische Schlagscheren ("Alligatorschere"), in den USA meistens sogenannte Guillotine-Scheren verwendet. Vereinzelt sind auch modifizierte Pressen im Einsatz. Zunächst werden noch vorhandene Rohre abgeschnitten und dann der Konverter mittig durchtrennt. Da dabei das Gehäuse an der Schnittstelle zusammengedrückt wird, muss in einem zweiten Schnitt am um 90° gedrehten Konverter das Gehäuse wieder geöffnet werden, anschließend kann die durch den Vorgang gebrochene Keramik in bereit gestellte Behälter entleert werden. Für ein effizientes Arbeiten und auch aus Arbeitsschutzgründen ist für die Entmantelung eine gute Absaugungsanlage unabdingbar. Wie aus Tabelle 2 und Abschnitt 6.4 hervorgeht, können bei ungenügender Verfahrenstechnik oder mangelnder Erfahrung der Bedienmannschaft bei der Entmantelung erhebliche PGM-Verluste auftreten, deswegen sollte dieser Schritt sehr sorgfältig durchgeführt werden.

³ In der Altfahrzeugverordnung vom 21.6.2002 ist der Katalysator als Ausbauteil definiert, das zusammen mit Betriebsflüssigkeiten, Reifen und Batterie vor dem Shredderprozess entfernt werden muss.

Metallkatalysatoren werden vor der Entmantelung aussortiert und separat behandelt. Hier wird bei darauf spezialisierten Unternehmen der Konus möglichst nah am Monolithen abgeschnitten und dieser dann in einem speziellen Shredder oder einer Schlagmühle zerkleinert. Dabei platzt der PGM-haltige Washcoat von der Stahlfolie ab und kann durch Klassierung, Magnetscheidung und Windsichtung von der Stahlfraktion getrennt werden. Die Anreicherung nach "Entmantelung" ist hier deutlich höher und die PGM-Gehalte liegen in der Regel beim drei bis fünffachen des Keramik-katalysators, da das PGM-freie Trägermaterial nicht enthalten ist. Qualitätsentscheidend ist hier, wie vollständig der Washcoat von der Folie getrennt werden kann - es gilt durch Auslegung der Anlage und sorgfältiges Arbeiten die Washcoat-Verluste zu minimieren, die durch Einklemmen in der Trägerfolie (schlagende Beanspruchung) und durch Adhäsion von PGM-haltigem Staub an der Stahlfraktion entstehen können.⁴

Obwohl oft der Eindruck vermittelt wird, handelt es sich bei den meisten der in Europa tätigen Kat-Logistik/Entmantelungs-Firmen nicht um Recycler von Platinmetallen im engeren Sinne. Die eigentliche Rückgewinnung der Platinmetalle wird bei weltweit nur wenigen in der PGM-Scheidung aktiven „Refining-Unternehmen“ (Scheidebetrieben) durchgeführt⁵ (s. Abschnitt 4.4).

Leider hat in den letzten Jahren gerade das Kat-Recyclinggeschäft auch einige unseriöse Akteure angezogen. Begünstigt wird dies durch den relativ hohen, aber selbst für einen Experten ohne Analyse kaum zu taxierenden (Edelmetall)-Wert eines Altkats, die Verbreitung von Bargeschäften beim Ankauf der Katalysatoren, schwankende PGM-Preise mit damit verbundenen Spekulationsmöglichkeiten sowie die häufig bewusst intransparent gehaltenen Stoffströme entlang der Recyclingkette. Für die seriös agierenden Akteure bedingen diese Praktiken zum Teil eine erhebliche Verzerrung der Wettbewerbsbedingungen, wie nachstehend noch dargestellt, führt dies auch insgesamt zu Ineffizienzen und erhöhten PGM-Verlusten beim Kat-Recycling.

4.3 Recyclingaktivitäten der Automobilfirmen

Die Automobilfirmen haben eine Zwischenstellung; sie verfügen zum einen über geringe Mengen an Produktionsausschuss, zum anderen haben sie grundsätzlich Zugriff auf ihre Vertragswerkstätten. Die meisten europäischen Automobilfirmen haben inzwischen interne Rücknahmesysteme eingerichtet, um sich darüber Platinmetalle aus Kat-Rückläufen zu sichern. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit des in Abschnitt 10 beschriebenen PGM-Kreislaufs über ein Edelmetall-Gewichtskonto.

In vielen Fällen wird der Altkatalysator aus den Vertragswerkstätten über die bestehende interne Logistik für Austauschteile zu Zentrallagern zurückgeführt und von dort aus für die Weiterverarbeitung vergeben. Um sicherzustellen, dass die Vertragswerkstätten den Recyclingkat auch tatsächlich zurückliefern und nicht an Dritte verkaufen,

⁴ Zur Verringerung dieser Verluste wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem durch Kaltversprödung des Metallmonolithen mit Stickstoff vor der Zerkleinerung ein Einklemmen des Washcoats vermindert und durch Nachbehandlung der Metallfraktion in einem Ultraschallbad die Anhaftungsverluste verhindert werden konnten [17]. Der dafür erforderliche apparative Aufwand für eine Umsetzung im Produktionsmaßstab rechnet sich aber bei den bisher insgesamt geringen Mengen an Metallkatalysatoren nicht.

⁵ Umicore ist dabei einer der wenigen PGM-Refiner, die auch über eigene Logistik- und Entmantelungsaktivitäten verfügen.

wird der Austauschkatalysator häufig mit einem Pfand belegt, das bei Rückgabe eines Altkats der Werkstatt erstattet wird. Dieses ist - wie beim klassischen Flaschenpfand - in der Regel unabhängig vom Edelmetallwertinhalt des Altkats und dient nur dazu, den Stoffstrom in eine gewünschte Richtung zu lenken.

Über die eigenen Vertragswerkstätten hinaus ist es für die Automobilindustrie jedoch sehr schwierig, direkten Zugriff auf Recycling-Kats zu erhalten. Dies gilt insbesondere für den zukünftig an Bedeutung gewinnenden End-of-Life Bereich: Die großen Autoverwerter und Demontagezentren sind in der Regel von mehreren Automobilfirmen lizenziert, eine Aufteilung der Katalysatoren nach Marken erfordert dort erhebliche Anstrengungen. Um eine hohe Erfassungsquote für Altkatalysatoren sicherzustellen, wird demnach auch zukünftig ein weiter optimiertes, zweigleisiges Sammelsystem erforderlich sein, bei dem die Automobilindustrie sich auf die Vertragswerkstätten fokussiert und die Kat-Recycling-Unternehmen im Verbund mit den PGM-Scheideanstalten die anderen Anfallstellen abdecken.

4.4 PGM-Scheidung

Eingangsmaterial für die eigentliche PGM-Scheidung (PGM-Refining) ist die entmantelte Kat-Keramik bzw. der vom Metallkat abgelöste Washcoat. Die Prozesse zur Homogenisierung, Vorkonzentration sowie zur Separation und Raffination der Platinmetalle werden in Abschnitt 7 beschrieben. Sie erfordern spezielles analytisches, metallurgisches und chemisches Verfahrens-Know-how, hohe Investitionen und eine auf die hohen Edelmetallwerte ausgerichtete Infrastruktur. In der Regel ist die Verarbeitung von Autokatalysatoren nur im Verbund mit anderen PGM-haltigen Materialien wirtschaftlich, da sonst die kritische Größe vor allem für die Feinscheidung (Separation und Raffination der PGM) nicht gegeben ist. In Europa sind nur zwei Unternehmen über die gesamte Refining-Prozesskette aktiv. In Nordamerika und Japan liegen mehrstufige Verwertungswege vor - einige Firmen führen nur eine Homogenisierung und pyrometallurgische Vorkonzentration des Materials durch, die dabei erzeugten Konzentrate werden dann an Dritte zur Feinscheidung der Platingruppenmetalle abgegeben. Schließlich bemühen sich auch einige Primärproduzenten von PGM darum, über Rückgewinnung von Sekundär-PGM aus Recycling-Kats ihre dominierende Position bei der PGM-Versorgung aufrechtzuerhalten.

Einige der Refiner haben über langfristige Verträge oder Beteiligungen Zugriff auf eine eigene Kat-Sammellogistik. So hat Umicore⁶ hierzu bereits 1992 auf europäischer Ebene gemeinsam mit führenden Metallhandels- und Verwertungsgesellschaften den Kat-Verbund gegründet, in Kooperation mit Vorlieferanten bauen die Partner in diesem Verbund auf bestehende Logistiknetze auf. Die Kat-Konverter werden an den Sammelstellen zu Tagespreisen angekauft, beim jeweiligen Verbundpartner entmantelt, und Kat-Keramik sowie Metallmonolithe werden zur Weiterverarbeitung an Umicore geliefert. Als Know-How-Träger für Katalysatoren und PGM-Märkte koordiniert Umicore die Aktivitäten des Kat-Verbundes und berät die angeschlossenen Firmen.

⁶ Die Firma hat 2003 die früheren Edelmetallbereiche der Degussa übernommen und mit den eigenen Recyclingaktivitäten integriert.

5 Anfall von Recyclingkatalysatoren in Europa

Im Vergleich zu Nordamerika ist das europäische Recyclingaufkommen noch gering (vgl. Tab. 1). Im Jahr 2004 betrug die Gesamtmenge an Kat-Keramik (einschließlich Produktionsausschuss beim „Canning“) knapp 3.000 t (mit ca. 4 t Pt, 3 t Pd und 1 t Rh). Allerdings wird Europa, mit 187 Mio. zugelassenen PKW in der EU (Stand 31.12.2002) und einer seit 1993 für alle EU-Staaten gültigen Abgasgesetzgebung, in Zukunft für das Kat-Recycling eine größere Bedeutung erlangen.

Deutschland nimmt hierbei eine Vorreiterrolle ein. Mit 45 Mio. PKW hat Deutschland zum einen den größten Bestand, auch wurden hier ab Ende der achtziger Jahre - angespornt durch Steueranreize - zum ersten Mal in Europa in größerem Umfang Kat-Fahrzeuge zugelassen. Andere Länder mit frühen Kat-Zulassungen wie die Schweiz, Österreich, Schweden und die Niederlande haben insgesamt nur einen PKW Bestand von 19 Mio. Fahrzeugen, in Frankreich, England und Italien (mit insgesamt 82 Mio. Fahrzeugen) spielten Kat-Fahrzeuge erst ab 1993 eine nennenswerte Rolle. Damit nimmt Deutschland beim Kat-Recycling heute (noch) eine Schlüsselposition ein.

Die Menge an *Produktionsabfällen* aus den verschiedenen Stufen der Kat-Herstellung wird sich in den nächsten Jahren kaum steigern, da steigende Stückzahlen durch eine Verringerung der Ausschussquote kompensiert werden.

Mengenmäßig von weitaus größerer Bedeutung ist *das Recycling von Altkatalysatoren*, die *am Ende der Lebensdauer* eines Kat-Fahrzeuges sowie bei Austausch des Kats anfallen. In Deutschland wurden 1985 zum ersten Mal einige 10.000 Kat-Pkw zugelassen, danach stieg die Zahl kontinuierlich an. Heute ist jeder neu zugelassene PKW mit einem Kat ausgestattet. EU-weit gilt hierfür ab 1.1.1993 de facto die Kat-Pflicht für Fahrzeuge mit Otto-Motor. Das gleiche gilt seit 1.1.1997 für Diesel-Pkw. Für Ende 2004 wird der Bestand in den EU-Staaten auf rund 150 Mio. Kat-Fahrzeuge geschätzt. 11,6 Mio. Fahrzeuge werden dort jährlich aus dem Verkehr gezogen⁷, von denen - auch in Deutschland - bisher jedoch nur ein Teil mit Katalysator ausgestattet ist.

Am 1. Dezember 1993 wurde in Deutschland eine regelmäßig vorgeschriebene Abgasuntersuchung ("AU") auch für Kat-Fahrzeuge eingeführt, um die Funktionsfähigkeit von Katalysator und Lambda-Sonde zu überprüfen. Bisher blieb die Anzahl von identifizierten, nicht mehr ausreichend funktionsfähigen Systemen aber sehr niedrig. (Fehler sind i.d.R. auf nicht ordnungsgemäßen Gebrauch, mechanische Beschädigung, Fehlzündungen, Überhitzung oder Vergiftung durch Blei- oder Schwefelanteile im Benzin zurückzuführen.) Ähnliche Tests wurden inzwischen in den meisten EU-Staaten eingeführt. Die z.B. auf Grund solcher Tests *während des Autolebens ausgetauschten Katalysatoren* stellen neben denen aus Schrottfahrzeugen ein zusätzliches Recyclingpotenzial dar.

Weitere Einflussfaktoren auf das Recycling-Volumen sind Fahrzeuglebensdauer, effektive Recyclingquote und Exporte von Kat-Fahrzeugen, insbesondere in die osteuropäischen und afrikanischen Staaten.

⁷ Dies darf - wie später noch gezeigt wird - nicht mit der in Europa verschrotteten Fahrzeugmenge von 7,7 Mio. gleichgesetzt werden.

6 Theorie und Praxis - warum das Recycling-Volumen bisher weit hinter den Erwartungen zurückbleibt

Es gab und gibt noch immer eine erhebliche Überschätzung des tatsächlichen Kat-Recycling-Volumens in Europa. Erste Prognosen gingen von bereits 1000 t Kat-Keramik in 1995 und 8000 t in 2000 aus. Die Realität ist davon weit entfernt. Es wird in den nächsten Jahren einen Anstieg geben, aber selbst in Deutschland werden erst um 2015 alle verschrotteten PKW mit einem Kat ausgestattet sein, und die Gesamtmenge der daraus ins Recycling gelangenden Kat-Keramik wird deutlich geringer sein als ursprünglich angenommen. [3, 27]

6.1 Forschungsprojekt "PGM-Stoffströme"

Es gibt eine Reihe von Gründen für diese enttäuschende Entwicklung, auf die in vorausgegangenen Veröffentlichungen bereits eingegangen wurde [4]. In einem von 2001 bis 2004 gemeinsam von Umicore und dem Öko-Institut durchgeführten Forschungsprojekt⁸ [3] wurden detailliert die Stoffströme von PGM aus Autokatalysatoren analysiert, Defizite und Recyclingpotenziale identifiziert, Optimierungsvorschläge herausgearbeitet sowie zukünftige realistische PGM-Rücklaufmengen aus Autokats und resultierende ökologische Konsequenzen abgeleitet.

Bild 4 zeigt die für die Untersuchung gewählte Methodik. Eine wesentliche Größe bei der Bestimmung der PGM-Mengen aus dem Kat-Recycling stellt die Gesamtzahl der theoretisch dem Recycling zur Verfügung stehenden Alt-Katalysatoren dar. Dieses theoretische Potenzial lässt sich mit Hilfe von statistischen Daten berechnen. Weitere Informationen wurden aus einer empirischen Untersuchung des Recyclingmarktes gewonnen. Aus der Kombination der statistischen und empirischen Daten lassen sich dann die realen Stoffströme des Kat-Recyclings nachvollziehen. Die so ermittelten Recyclingmengen berücksichtigen zunächst nur Stückzahlen an Katalysatoren. In einem weiteren Schritt wurde das Bilanzmodell um spezifische PGM-Beladungsangaben nach Motortyp (Otto/Diesel), Schadstoffklassen (EU I, EU II, ...) und Hubraum der Kat-Fahrzeuge erweitert. Hierbei konnte auf die umfangreiche Umicore Datenbasis zur modellspezifischen PGM-Beladung der Fahrzeuge zurückgegriffen werden, die mit Angaben aus der Literatur [6,7] und Werten eines weiteren Katalysator-Herstellers abgeglichen wurden. Damit können die absoluten PGM-Mengen, aber insbesondere auch der Anteil der Edelmetalle Pt, Pd und Rh an der Gesamtmenge weiter konkretisiert werden. Die gewählte Vorgehensweise ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der verschiedenen Fahrzeugsegmente und berücksichtigt vor allem die erheblichen Verschiebungen über den Zeitraum bei der absoluten PGM-Beladung und dem Verhältnis der PGM zueinander (z.B. Pt zu Pd). Im Vergleich zu den sonst üblichen Berechnungen auf Basis von durchschnittlichen PGM-Beladungen erreichen die Ergebnisse eine signifikant bessere Aussagequalität. Methodik und Ergebnisse sind detailliert im Abschlussbericht des Forschungsprojektes dargestellt [3,5].

⁸ Im Projekt "Stoffströme der Platingruppenmetalle - Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle" wurden dabei neben Autokatalysatoren auch alle anderen Einsatzgebiete für PGM im Detail untersucht. Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF.

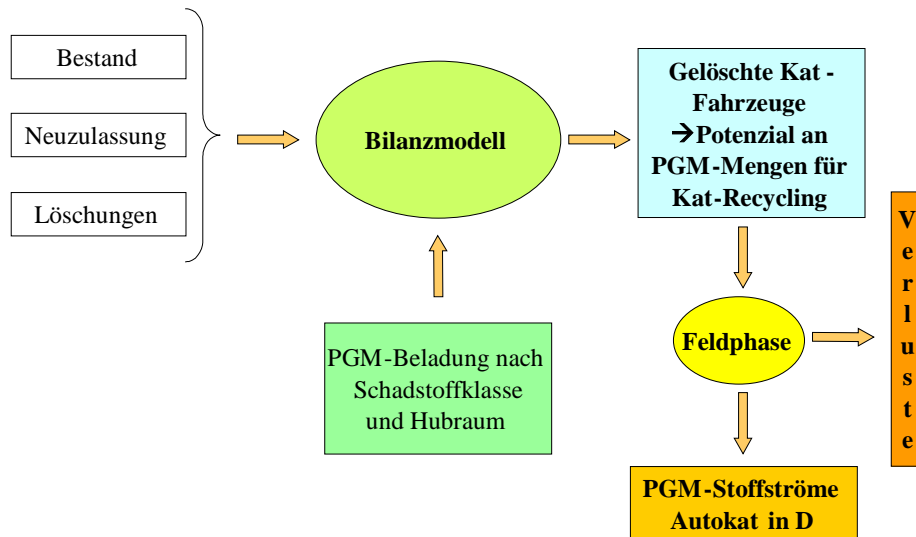


Bild 4: Methodik der Bilanzierung der PGM-Stoffströme beim Autokat [3]

6.2 Rechnerisches Recyclingpotenzial

Wesentliche statistische Datengrundlagen stellen folgende Zahlenreihen dar: Bestandszahlen an Kraftfahrzeugen, Anteil an Kat-Fahrzeugen am gesamten Fahrzeugbestand, Altersverteilung der gelöschten Kraftfahrzeuge und Löschungen der Kraftfahrzeuge. Diese Datenreihen (Bild 5) geben sowohl die bisherige als auch die erwartete zukünftige Entwicklung wieder und sind aus TREMOD [8] und Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes [9] abgeleitet. Wesentliche Erkenntnisse hieraus sind [3]:

- Der steigende Anteil an Dieselfahrzeuge wird aufgrund der unterschiedlichen PGM-Beladungen langfristig auch Einfluss auf das Verhältnis von Pt/Pd/Rh beim Recycling haben.
- Ungefähr 90 % aller Fahrzeuge besaßen im Jahr 2002 einen Katalysator. Bis 2010 werden annähernd 100 % des Fahrzeugbestands Kat-Fahrzeuge sein. In anderen EU-Ländern ist die Entwicklung in der Regel um 3-4 Jahre verzögert, da die Gesetzgebung später erfolgte und die durchschnittliche Fahrzeuglebensdauer oft etwas länger ist.
- Die durchschnittliche Lebensdauer der Pkws in Deutschland beträgt ca. 12 Jahre⁹. Dabei haben ungefähr 30 % der Fahrzeuge eine Lebensdauer von 15 und mehr Jahren. Für die Berechnung der zur Löschung anstehenden Kat-Fahrzeuge wurde, da dies die Realitäten nicht genau genug wiedergeben würde, nicht auf die durchschnittliche Lebensdauer sondern auf die tatsächliche Altersstruktur der zur Löschung anstehenden Fahrzeuge zurückgegriffen.
- Für das Jahr 2001 ergibt sich eine theoretische Anzahl von ca. 1,9 Mio. gelöschten Kat-Fahrzeugen. Dies entspricht 63 % der insgesamt ungefähr 3 Mio. gelöschten Fahrzeuge in 2001. Für die nächsten Jahre errechnen sich folgende Zahlen an gelöschten Kat-Fahrzeugen: 2003 = 2,5 Mio. (73 %); 2006 = 3,0 Mio. (85 %); 2012 = 3,5 Mio. (95 %).

⁹ Betrachtet bis zur Löschung aus der Fahrzeugstatistik Die tatsächliche Lebensdauer bis zur Verschrottung ist bei Export des Fahrzeugs meist deutlich länger.

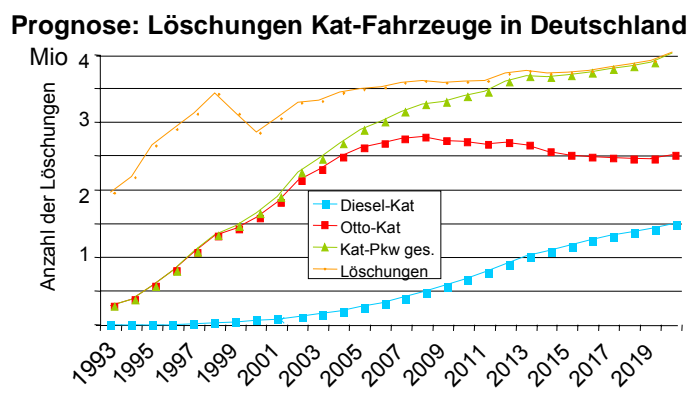
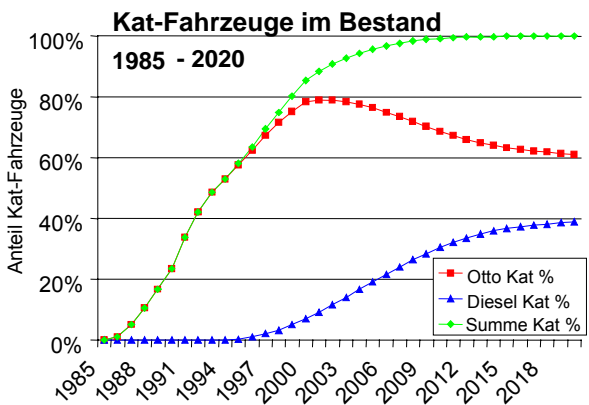
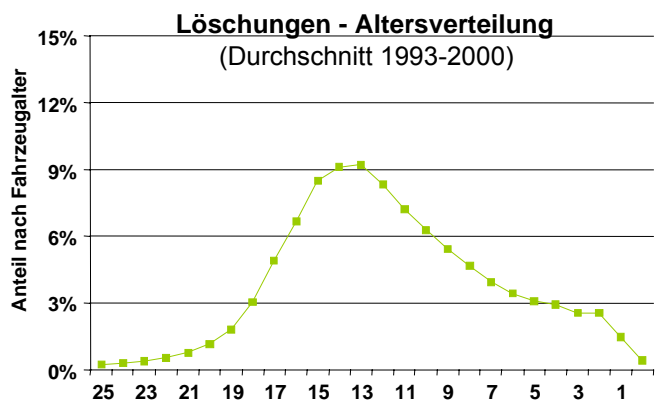
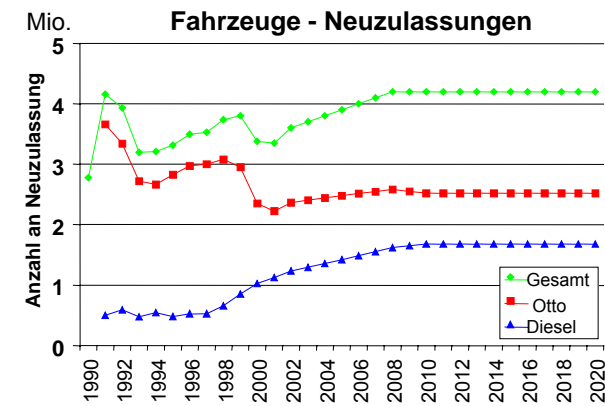


Bild 5: Auswertung der Zulassungsstatistiken für Deutschland [3]

6.3 Reales Recyclingaufkommen

Diese theoretischen Zahlen sind deutlich höher, als die tatsächlich verfügbare Menge an Recycling-Katalysatoren. Eine Prognose, die sich nur auf ein theoretisch errechnetes Recycling-Potenzial stützt, wird zu einer erheblichen Überschätzung der in der Realität verfügbaren Mengen führen. Aus diesem Grund wurden theoretische und empirische Werte in einer Feldphase abgeglichen, in der Daten bei allen in der Recyclingkette relevanten Akteuren erhoben wurden. Das Ergebnis ist in Bild 6 dargestellt. Die Gesamtzahl aller Kat-Fahrzeuge wird hierin mit 100 % angesetzt. Alle nachfolgenden Prozentangaben für Katalysatoren beziehen sich auf diese Ausgangsgröße von 100 %.

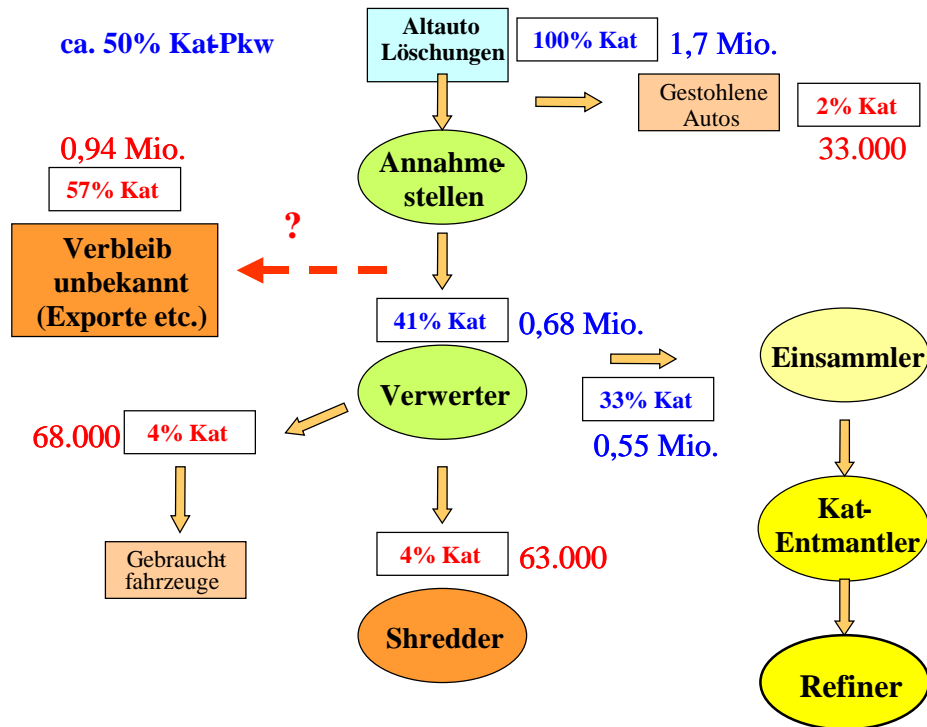


Bild 6: Stoffströme der Verwertung von Katalysatoren aus Altautos in Deutschland 2001/02 [3]

- In der Praxis hatten nur ca. 50% der Altfahrzeuge einen Katalysator, was deutlich unter dem theoretisch ermittelten Wert liegt.
- Wenngleich keine offiziellen Statistiken zur Verfügung stehen, kommen verschiedene Untersuchungen zum Ergebnis, dass jährlich ca. 1,1 bis 1,7 Mio. Altfahrzeuge verschrottet werden [10,11]. Vergleicht man diese Anzahl mit den 3,3 Mio. aus der Statistik gelöschten Fahrzeugen im Jahr 2002, bedeutet dies, dass ungefähr 2 Mio. bzw. 60 % der Altfahrzeuge nicht der Verwertung in Deutschland zur Verfügung standen. Dies ist ein großer Verlust für das Kat-Recycling aber auch für die Altautoverwertungsindustrie im allgemeinen.
- Wie aus Bild 7 ersichtlich, ist das vorgenannte Phänomen auch für andere EU-Staaten gültig. Die Gesamtzahl der in der EU gelöschten Fahrzeuge liegt bei 11,5 Millionen, im gleichen Zeitraum werden in der EU aber nur 7,7 Mio. Fahrzeuge verschrottet [12]. Es verbleibt eine Lücke von 4 Millionen "unidentifizierten Verlusten" aus den europäischen Staaten. Damit kann davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil der nicht in Deutschland verwerteten aber gelöschten Fahrzeuge auch nicht in anderen EU-Staaten verwertet wurde.
- Ungefähr 4 % der Katalysatoren wurden von den Verwertern als Ersatzteil weiterverkauft oder direkt in Gebrauchtwagen eingebaut und sind damit zumindest temporär dem PGM-Recycling in Deutschland entzogen. Weitere 4 % der Katalysatoren wurden weder bei den Verwertern noch bei den nachfolgenden Shredderbetrieben aus dem Altauto ausgebaut. Sie durchlaufen damit den Shredderprozess und sind somit endgültig dem Recycling entzogen.
- Als Ergebnis verbleiben von den 1,7 Mio. gelöschten Kat-Fahrzeugen ca. 550.000 oder 33 % der Katalysatoren, die über Einsammler und Entmantler dem weiteren PGM-Recycling zugeführt werden.

- Hinzu kamen in Deutschland rund 0,3 Mio. Austauschkatalysatoren, sodass sich das reale Recyclingvolumen in Deutschland in 2001/02 auf rund 750 t Kat-Keramik belief.

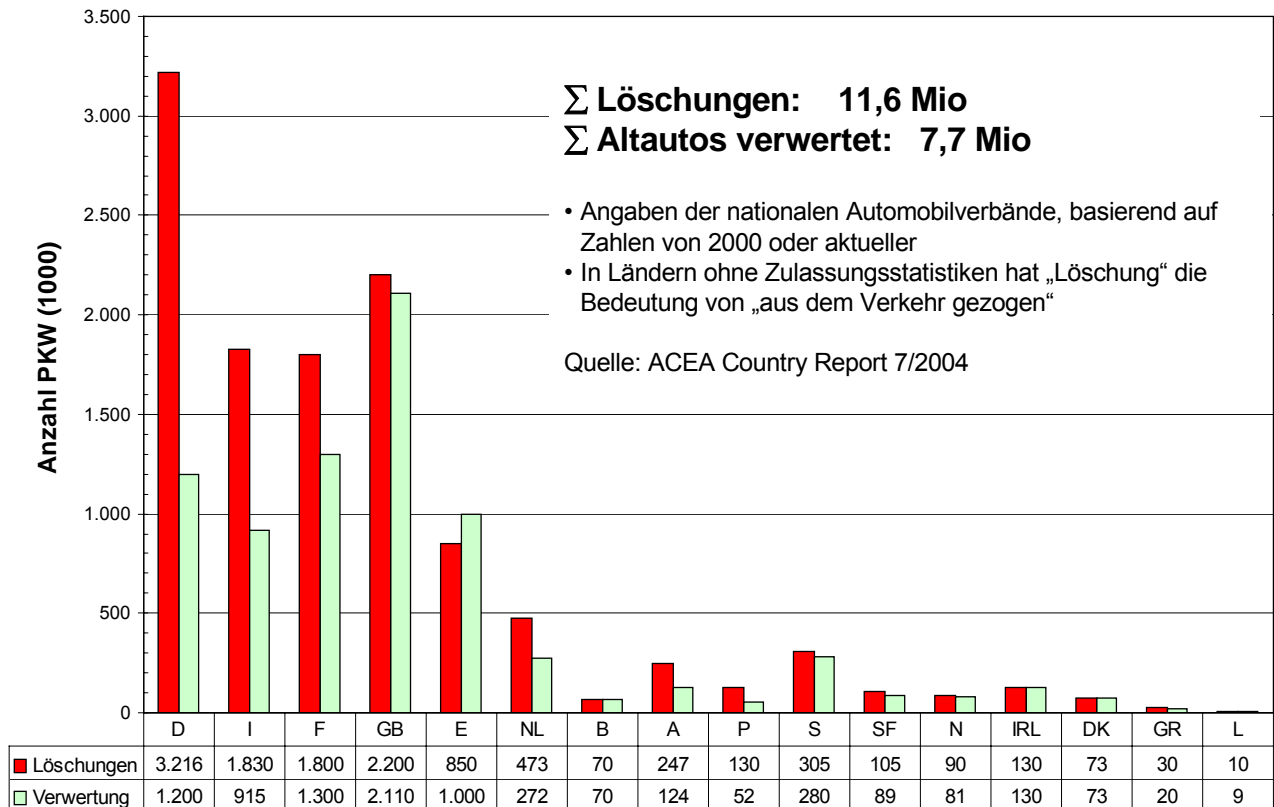


Bild 7: Löschungen und Anzahl der verwerteten Fahrzeuge in Europa [12]

Höhere Recyclingmengen, die oft genannt werden, entsprechen damit nicht der Realität. Die Fehler liegen in der Übernahme von theoretisch ermittelten Zahlen ohne Gegenprobe, in Doppelzählungen (Berücksichtigung der Mengenangaben von vermeintlichen PGM-Refinern, die tatsächlich nur sammeln und entmanteln und dann selbst an Scheidereien liefern) und in den Tendenzen einiger Marktteilnehmer zum Übertreiben der eigenen Mengen. [3]

6.4 Verluste

Insgesamt kann derzeit ein großer Teil des rechnerischen Recyclingpotenzials nicht realisiert werden. Die größten Verluste treten allerdings nicht in, sondern bereits vor der Recyclingkette auf. Hierbei werden nur die Ströme betrachtet, die tatsächlich zu Verlusten führen - ein Export von Katalysatoren z.B. aus Deutschland oder Europa hinaus in eine andere Region, wo dann eine effiziente PGM-Scheidung durchgeführt wird, ist kein Verlust.

Verluste vor der Recyclingkette

Der größte Verlust resultiert aus Exporten nach Afrika, Osteuropa und in weiter entfernte Regionen. Die Zahl der Exporte aus Deutschland wird auf bis zu zwei Millionen jährlich geschätzt (in 2001 davon rund eine Million mit Kat), aus Westeuropa insgesamt werden rund 4 Millionen Fahrzeuge exportiert. Zwar hat in vielen angrenzenden osteuropäischen Ländern die Sensibilisierung für das Kat-Recycling nicht zuletzt wegen der attraktiven Preise für Altkats stark zugenommen, viele Altfahrzeuge wandern (im "3. Leben") heute aber noch weiter nach Osten bis in den asiatischen Raum. Zusätzlich gibt es seit einigen Jahren massive Altfahrzeug-Exporte nach Afrika. Da hiervon vor allem Mittel- und Oberklassefahrzeuge mit höheren PGM-Beladungen betroffen sind, ist hier insgesamt mit erheblichen Einflüssen auf die PGM-Bilanz zu rechnen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil dieser Altfahrzeug-Exporte tatsächlich auch zu späteren PGM-Verlusten führen wird, der Grund liegt vor allem in den Betriebsbedingungen. Bei modernen Fahrzeugen mit effizienten Wartungs- und Überprüfungs-systemen ("TÜV", "AU") kommt es während des Betriebes nur zu sehr geringen Verlusten. Bei mangelnder Wartung, schlechten Straßenverhältnissen sowie fehlender Sensibilität und Kontrolle kann es allerdings zu einem hohen Austrag von PGM-haltiger Kat-Kermik kommen (durch Fehlzündungen, Stoßbeanspruchung, schadhafte Aufhängung des Abgasstranges etc.). Genau diese Randbedingungen treffen für viele afrikanische und östliche Länder zu, zusätzlich fehlt dort oft sowohl eine Abgasgesetzgebung als auch eine effiziente Recycling-Infrastruktur. Dies bedeutet, dass in diesen Ländern tatsächlich hohe Betriebsverluste an PGM auftreten werden und auch ein Kat-Recycling am Ende des Autolebens¹⁰ eher unwahrscheinlich ist.

Bisher wurde lediglich der Materialfluss von Kat-Fahrzeugen betrachtet. Der Materialfluss aus Altfahrzeugen ist quantitativ allerdings nicht identisch mit dem Materialfluss von Edelmetallen aus Autokatalysatoren. Es gilt:

- Je größer der Hubraum eines Fahrzeuges, desto größer ist in der Regel der Katalysator und desto höher ist der Edelmetallinhalt.
- Mittel- und Oberklassenfahrzeuge haben oft höhere spezifische Edelmetallbeladungen (d.h. PGM-Inhalt pro Kat-Volumen).
- Die ersten in Deutschland mit Katalysatoren ausgestatteten Fahrzeuge gehörten vor allem dem Mittel-/Oberklassen-Segment an. Diese werden oft länger gefahren als kleinere Autos und werden häufiger exportiert.

Der Schluss daraus ist, dass der Abfluss der Edelmetalle höher ist als der Abfluss an Fahrzeugen selbst. Vor allem Oberklasse-Autos mit ihren höheren Edelmetallgehalten in den Kats werden systematisch dem Recycling in Europa entzogen. [3]

PGM-Verluste innerhalb der Recyclingkette

Die innerhalb der Recyclingkette auftretenden Verlustmöglichkeiten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Sie sind in Bild 8 entlang der Recyclingkette dargestellt. Der größte

¹⁰ Bei Reisen in diesen Ländern lässt sich oft sehr anschaulich feststellen, dass ein Autoleben gegen "unendlich" tendieren kann. Der Katalysator (und die Abgasanlage insgesamt) wird dabei in der Regel nicht als wichtige Fahrzeugkomponente angesehen, entscheidend ist die Fahrtüchtigkeit.

Einfluss geht dabei von zum Teil unprofessioneller Handhabung bei den Schritten Erfassung, Logistik und Entmantelung aus.

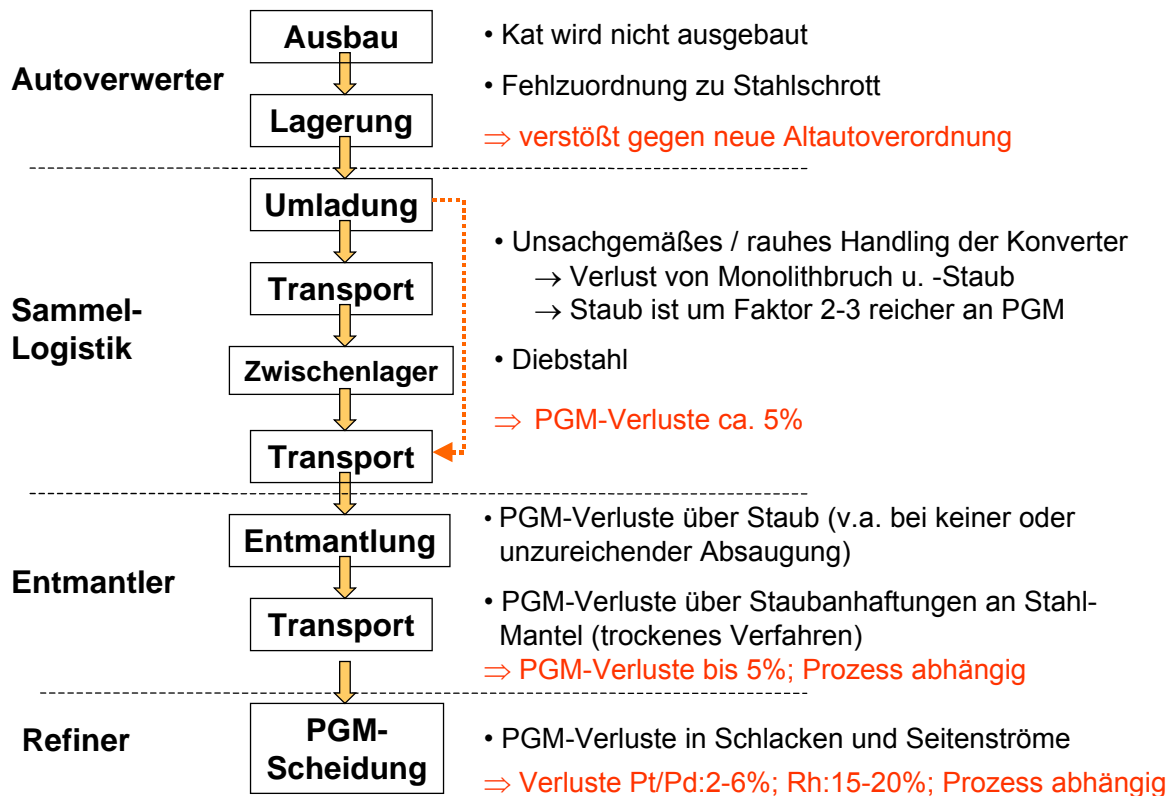


Bild 8: Hauptschritte und PGM-Verluste in der Recyclingkette für Katalysatoren [3]

- Das Unterlassen des Ausbaus des Katalysators vom Altfahrzeug steht nicht mit der neuen europäischen Altautoverordnung in Einklang und sollte zukünftig immer weniger vorkommen. Einige motornah angebrachte Katalysatoren können allerdings auch zukünftig übersehen werden (vor allem wenn zusätzlich ein Unterboden-Kat vorhanden ist).
- PGM-Verluste können bei beschädigten Katalysatoren auftreten, wenn Keramikstücke oder Staub aus dem Konvertergehäuse herausfallen. Derartige Verluste sind beim „werkstattüblichen“ Handling der Kat-Konverter möglich (Konverter werden in Mulden geworfen, mehrmaliges Umladen und Transport der Konverter, Mulde ist Wind und Regen ausgesetzt). Monolithstäube weisen meist einen zwei- bis dreifach höheren PGM-Gehalt auf als der Monolith-Festkörper.¹¹ Entsprechend hohe Verluste können daher beim unsachgemäßen Handling der Kats auftreten. Auf Grundlage der Feldphase wird vom Abtrennen des Altkats vom Altfahrzeug bis zum Eingang des Kats beim Entmantler von einem PGM-Verlust in der Größenordnung von 5 % ausgegangen. Je kürzer und professioneller die Recyclingkette ist, desto geringer können die angegebenen Verluste gehalten werden. In der heutigen Praxis sind jedoch oft zu viele Akteure in die Recyclingkette eingebunden. Weiterhin erfolgt die Bezahlung der Altkatalysatoren meist zunächst auf

¹¹ Dies ist plausibel, weil sich die Edelmetallbeschichtung im "Washcoat" auf der Oberfläche des Trägermaterials befindet und Oberflächenmaterial im Staub überproportional enthalten ist.

einer Pro-Stück-Basis und solange keine sichtbare Beschädigung auftritt, ist der Anreiz für einen vorsorglichen Umgang mit den Katalysatoren gering.

- Beim Öffnen des Altkatalysators beim Entmantler bricht der Keramikmonolith normalerweise auseinander und es kommt zur Staubentwicklung. Professionelle Entmantlungsaggregate sind mit einer ausreichend dimensionierten Staubabsaugung ausgestattet, so dass der Staub gesammelt und ebenfalls dem PGM-Recycling zugeführt werden kann. Da es sich beim Entmanteln um einen Trockenprozess handelt, lassen sich geringe PGM-Verluste z. B. durch Staubrückstände im Kat-Gehäuse (das als Fe-Schrott verwertet wird) nicht vermeiden. Auch bei diesem Prozessschritt wird insgesamt von einer PGM-Verlustrate von bis zu 5 % ausgegangen, die wiederum stark von der Professionalität beim Entmanteln abhängig ist.
- Beim PGM-Refiner wird, meist zum ersten Mal, eine Homogenisierung und repräsentative Beprobung des Materials durchgeführt. Auf der Basis des daraus ermittelten PGM-Gehalts erfolgt auch die Abrechnung mit dem Kat-Keramiklieferanten. In Abhängigkeit von der Prozesstechnologie, der Erfahrung des Refiners und auch der Qualität der Kat-Keramik wird – bezogen auf den gesamten Refining-Prozess – eine Ausbeute von 95–98 % bei Pt und Pd sowie 80–85 % bei Rh erzielt. Da der Ablauf des Refiningprozesses mittels Analysen verfolgt wird, liegen hier zuverlässige Daten zu den PGM-Ausbeuten vor. Der gesamte Refiningprozess wurde über Jahre hinweg optimiert, daher ist eine weitere Verbesserung der Ausbeuten nur sehr schwer zu erzielen und für die Gesamtausbeute weit weniger relevant als eine Optimierung der vorgelagerten Schritte.

Der gesamte PGM-Stoffstrom bei der Verwertung von Autokatalysatoren und die dabei auftretenden Verluste sind in Bild 9 zusammengefasst. Die Prozentangaben beziehen sich auf 100% PGM im Altkatalysator¹². Das Ergebnis ist ernüchternd - nur rund 30% des Recyclingpotenzials in Deutschland werden real zurückgewonnen. Weitere PGM-Mengen aus dem Export können prinzipiell auch im Ausland recycelt werden, es ist aus den zuvor beschriebenen Gründen aber unwahrscheinlich, dass es sich um signifikante Mengen handelt. [3]

Plausibilisierung der Verluste

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse wurde ein "Top-Down"-Ansatz gewählt. Hierfür wurde methodisch ein vereinfachter dynamischer Ansatz zur Ermittlung der Recyclingquote gewählt. Basis sind die statistischen Angaben zu PGM-Nachfrage und Recyclingmengen für Autokats nach Region [1,2]. Hieraus wurde die PGM-Bruttonachfrage für Autokats in Europa zwischen 1988 und 1990 mit den aus dem Autokat-Recycling zurückgewonnenen Mengen 2000–2002 verglichen. Bei Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer von 12 Jahren ergibt sich eine dynamische Recyclingquote von nur 32 %, bei 13 Jahren von 38 %, was in der gleichen Größenordnung wie die zuvor für Deutschland mit dem "Bottom-Up"-Ansatz ermittelten Ergebnisse liegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in die genannten Recyclingmengen der veröffentlichten Statistiken auch PGM aus Austauschката einfließen (während diese für die Bruttonachfrage 1988—1990 kaum von Bedeutung waren), d. h. für die PGM nur aus Altkatalysatoren ergäbe sich sogar eine noch geringere dynamische

¹² Beispielsweise ist beim Refiningprozess ein Verlust von 1% ausgewiesen (dies entspricht 3% auf den Input von 30% in den Refiningprozess)

sche Recyclingquote. Auf globaler Ebene sieht das Bild nicht viel besser aus und führt, bei gleichen Annahmen zur Lebensdauer, zu Recyclingquoten zwischen 45 % und 49 %. Die globalen Zahlen sind sehr stark von Nordamerika dominiert, wo der Recyclingmarkt für Autokats eine deutlich höhere Marktreife als in Europa erlangt hat. Dort ist nahezu jedes verschrottete Fahrzeug auch mit einem Kat ausgestattet, trotzdem bleibt die dynamische Recyclingquote mit rund 50 % unbefriedigend.

Insgesamt kann durch den gewählten Top-Down-Vergleich die Größenordnung der für Deutschland ermittelten dynamischen Recyclingquote bestätigt werden. [3]

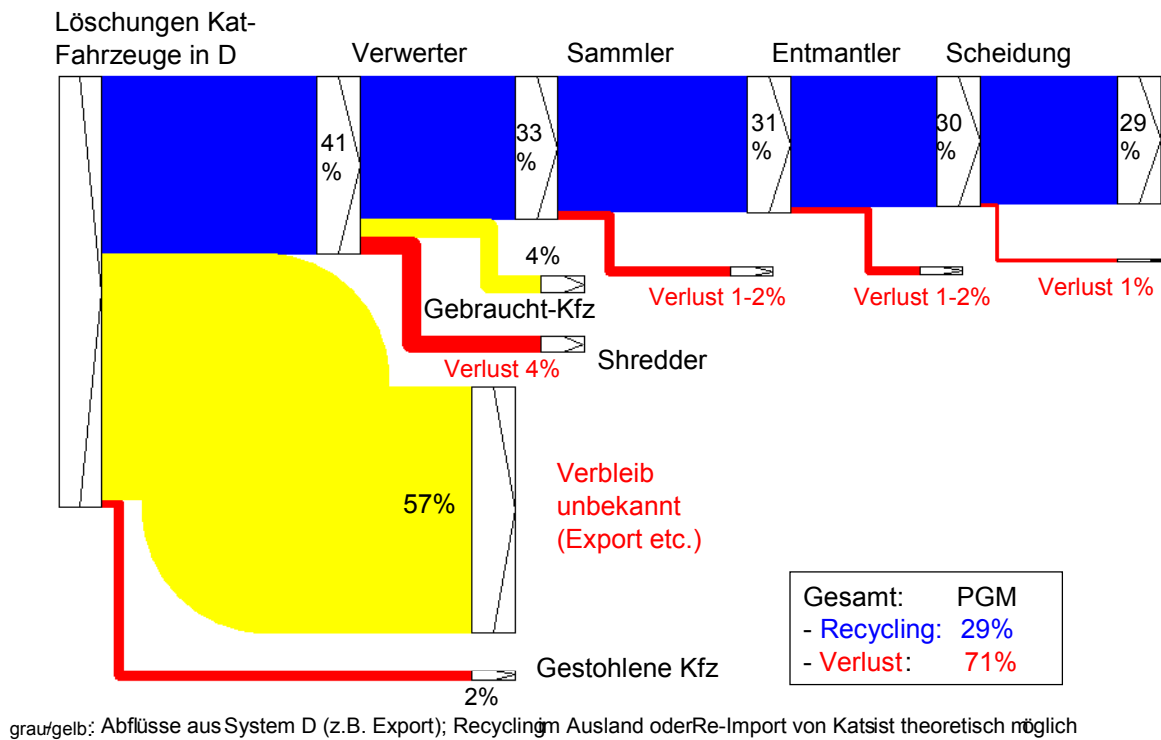


Bild 9: PGM-Fluss und -Verlustverteilung für Altauto-Katalysatoren, Deutschland [3]

6.5 Prognose von Recyclingpotenzial und PGM-Rückläufen

Hieraus ergeben sich weitreichende Folgen für die zukünftige Versorgung mit Sekundär-PGM aus Autokatalysatoren. In Bild 10 ist das PGM-Potenzial aus Fahrzeuglöschungen den zu erwartenden Recyclingmengen gegenübergestellt. Wenn es nicht gelingt, die gegenwärtige schlechte dynamische Recyclingquote zu verbessern, dann wird die Schere zwischen beiden Kurven immer weiter auseinander klaffen. Von einem Potenzial von über 20 t PGM im Jahr 2020 würden nur knapp 7 t tatsächlich durch Recycling zurückgewonnen werden.

Damit würde die Chance vertan, einen hohen Anteil der zukünftigen PGM-Versorgung aus dem Recycling zu decken. In Bild 11 sind hierzu für die Ausstattung von Neufahrzeugen PGM-Bruttobedarf, PGM-Recyclingmengen (aus ELV-/Alt-Kats) und resultierender Nettobedarf dargestellt.

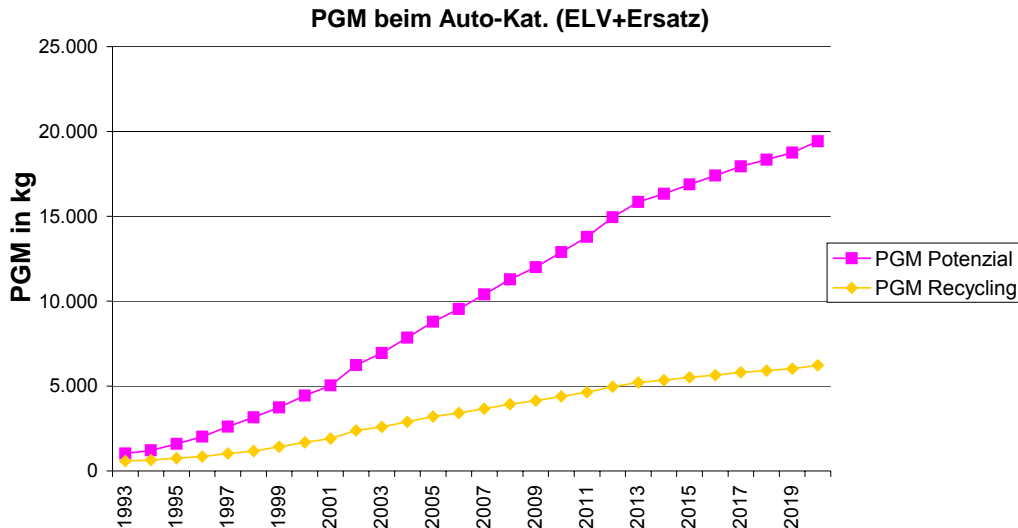


Bild 10: PGM-Recyclingpotenzial und tatsächlich erwartete Mengen bei konstanter Recyclingquote (Altfahrzeuge + Austauschkatalysatoren) [3]

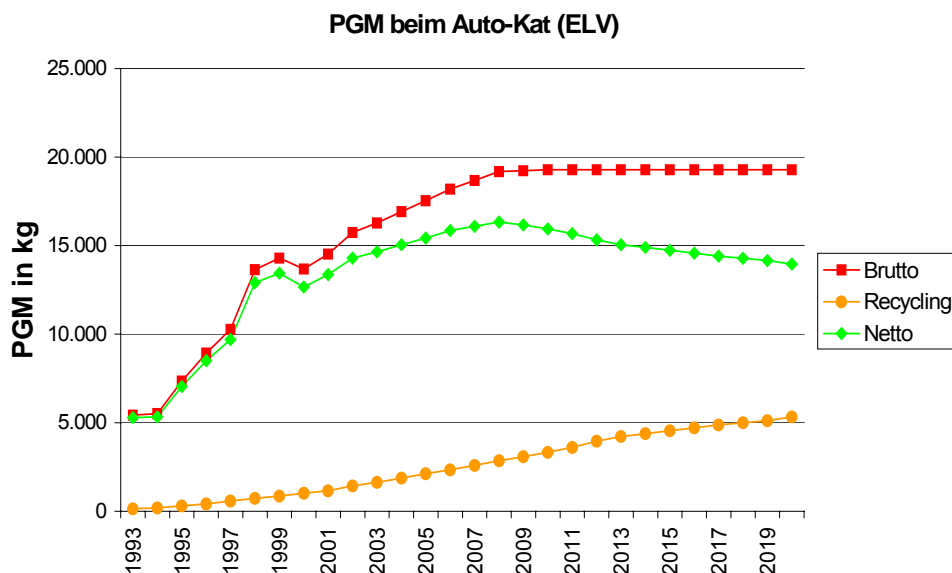


Bild 11: Deckung des PGM-Bruttobedarfs durch Recycling aus Altfahrzeugen (ohne Austauschkatalysatoren, bei konstanter Recyclingquote) [3]

Deutlich günstiger sieht das Bild für Austauschkatalysatoren aus (Bild 12), da hier die Exportströme entfallen und industrielle Strukturen etabliert sind. Die ausgewechselten Katalysatoren werden mit hohem Wirkungsgrad bei den Werkstätten erfasst und in die Recyclingkette gegeben. Für die Recyclingkette selbst werden die gleichen Verluste wie bei Kats aus Altfahrzeugen angenommen. Dadurch ergeben sich dynamische Recyclingquoten von 89 % bei Pt/Pd und von 77 % bei Rh.¹³

¹³ Hierbei wird unterstellt, dass sich zwei gegenläufige Effekte weitgehend kompensieren: Da die Austauschkatalysatoren "auffällig" geworden sind, kann ein größerer Anteil an PGM während der Gebrauchphase verloren gegangen sein. Auf der anderen Seite läuft ein großer Anteil der Austauschkatalysatoren über interne Recyclingketten der Automobilhersteller bis zum Refiner, so dass hier mit größerer Professionalität und Sorgfalt gearbeitet wird und Verluste innerhalb der Kette geringer ausfallen dürften als bei ELV-Kats.

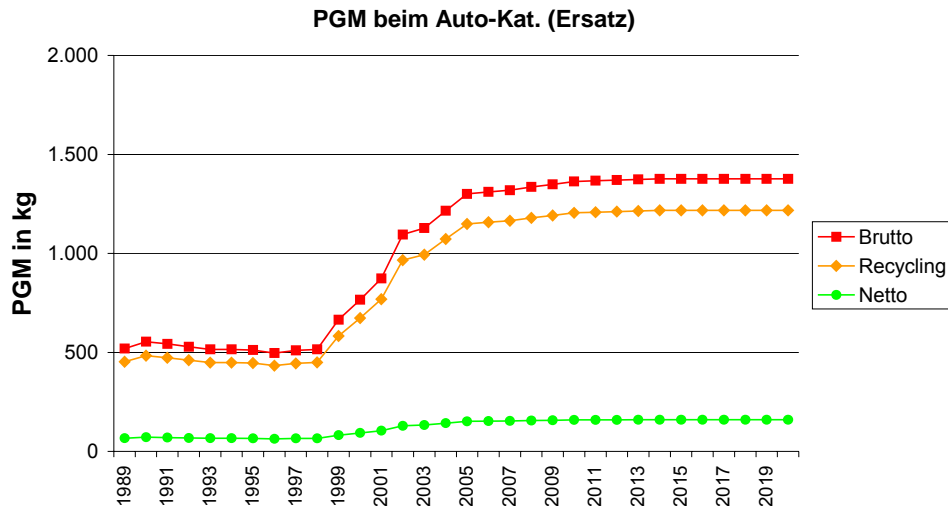


Bild 12: Deckung des PGM-Bruttobedarfs durch Recycling bei Austausch-katalysatoren [3]

Die durch das Forschungsprojekt herausgearbeiteten erheblichen PGM-Verluste vor und innerhalb der Recyclingkette wurden bisher in dieser Dimension kaum erkannt. Verschiedene Prognosen, auch von erfahrenen Edelmetall-Analysten, sagen eine große zukünftige Sekundärversorgung mit PGM aus dem Autokat-Recycling voraus. In einem viel zitiertem Feature für das Platinum Yearbook der Standard Bank [13,14] prognostizieren J. Fairley und R. Normann bereits für 2008 eine Rückgewinnungsmenge aus dem weltweiten Recycling von Autokatalysatoren von rund 100 t Palladium und 35 t Platin. Sie gehen dabei von einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 Jahren aus, was besagt dass von ca. 150 t Pd, die 1998 weltweit in Autokats eingesetzt wurden, 65 % als Sekundär-Pd zurückgewonnen werden können. Eine Recyclingquote in dieser Größenordnung ist nach den Erkenntnissen des vorliegenden Projektes absolut unrealistisch. Bei Platin werden für 2008 rund 35 t Sekundärproduktion aus Autokats vorausgesagt (bei 55 t Einsatz im Jahr 1998 = 60 % Recyclingquote). Hauptfehler in der dieser Prognose zu Grunde liegenden Studie sind der Ansatz einer durchschnittlichen Lebensdauer (statt einer Verteilungskurve), die Gleichsetzung von Fahrzeugglöschung und Verschrottung (wodurch die durchschnittliche Lebensdauer zu kurz gesehen wird) sowie die Unterschätzung des Einflusses von Exportströmen und Verlusten innerhalb der Recyclingkette. Große Bedeutung wurde der europäischen Altautoverordnung mit den hohen vorgeschriebenen Recyclingquoten beigemessen, obwohl deren Relevanz für die PGM aus Katalysatoren nur gering ist. [3]

Durch die im Forschungsprojekt gewählte sehr detaillierte Analyse der Statistiken und Datengrundlagen und die enge Verknüpfung mit der Recyclingpraxis konnten hingegen wertvolle Erkenntnisse für eine realistischere Prognose gewonnen werden.

6.6 Direkte und indirekte Recyclingkreisläufe

Ein Vergleich mit anderen Anwendungen von Platingruppenmetallen zeigt, dass sich auch bei Produkten mit langer Lebensdauer deutlich höhere dynamische Recyclingquoten erzielen lassen. Ein typisches Beispiel dafür sind heterogene Prozess-Katalysatoren in der Ölraffination oder in der chemischen Industrie (Bild 13), wo über den gesamten Produkt-Lebenszyklus PGM-Rückgewinnungsraten von über 90% erreicht werden.

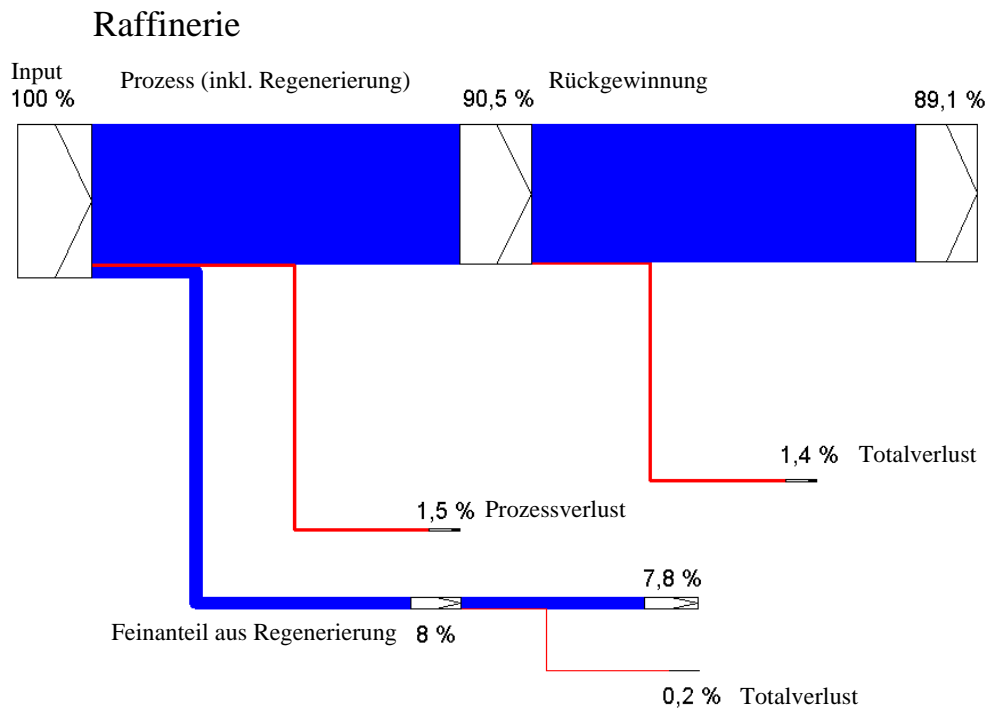


Bild 13: PGM-Stoffströme und Verlustverteilung für Katalysatoren in der Ölraffination

Entscheidender Unterschied ist die Art der Kreislaufführung - bei den genannten Ölkatalysatoren handelt es sich um "direkte Kreisläufe" zwischen industriellen, professionell agierenden Akteuren. Bei Autokatalysatoren, ebenso wie bei Elektronikanwendungen, ist der industrielle Kreislauf durch private Nutzer und - zu Beginn der Recyclingkette - oft nicht-industrielle Akteure unterbrochen, hierfür wurde der Begriff "indirekter Kreislauf" eingeführt [3,15]. Hieraus ergeben sich eine Reihe von Konsequenzen, die insgesamt zu den unbefriedigenden Recyclingquoten führen. In Bild 14 und 15 sind die wichtigsten Merkmale der beiden Kreislaufarten dargestellt.

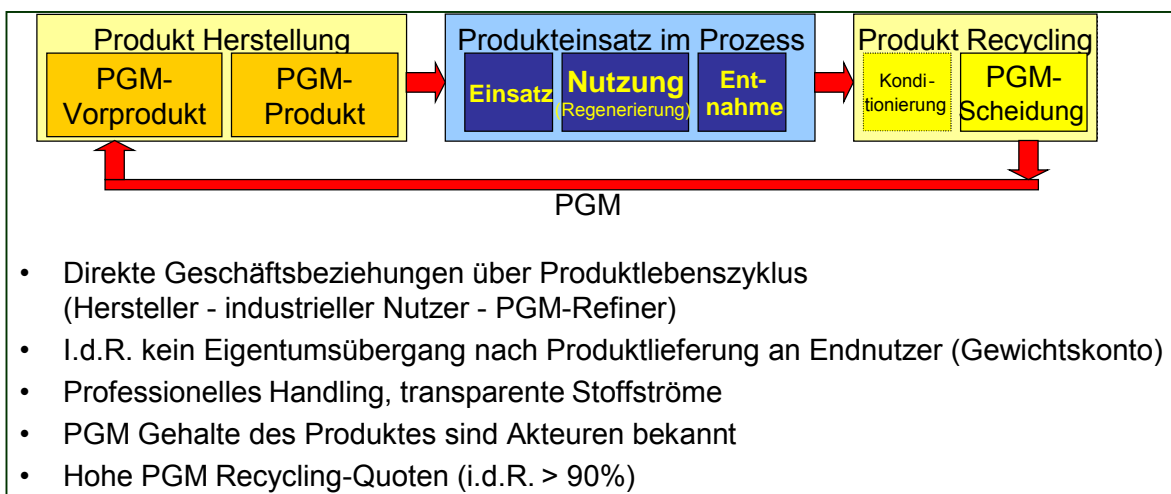


Bild 14: Merkmale von direkten Produktkreisläufen (z.B. Chemiekatalysatoren, Ölkatalysatoren, PGM in der Glasindustrie) [3,15]

- "Pfandsysteme", wie sie von einigen Automobilfirmen für Austauschkatalysatoren aus Werkstätten erfolgreich praktiziert werden, könnten auch bei Kats aus Altfahrzeugen eine stärkere Erfassung fördern und vor allem unseriöse Geschäftspraktiken unterbinden.

Die Erfahrungen beim Autokatalysator können auch für neue Anwendungssegmente genutzt werden. Brennstoffzellen für den mobilen Bereich werden noch größere PGM-Mengen pro Fahrzeug enthalten als Katalysatoren. Hier sollte von Anfang an auch auf Instrumente für eine möglichst effiziente Kreislaufführung geachtet werden, ansonsten wird es zu gleichen Verlustanteilen kommen wie derzeit beim Autokat.[16]

7 Technische Verfahren der PGM-Rückgewinnung

Grundsätzlich können zwei Verfahrenstypen für die Katalysatorscheidung unterschieden werden. Beim *hydrometallurgischen Verfahren* wird der PGM-haltige „Washcoat“ mit starken Säuren oder Laugen vom keramischen Träger gelöst. Anschließend werden die Platinmetalle, z.B. durch Fällungsreaktionen, aus der Lösung abgetrennt. Nachteilig bei diesem Verfahren sind höhere Edelmetallverluste, sowie große Mengen an Abwasser und Laugungsrückständen und das Problem von deren Entsorgung. Wegen dieser Nachteile haben die hydrometallurgischen Verfahren heute in der Praxis keine Bedeutung mehr.

Beim *pyrometallurgischen Verfahren* erfolgt die Abtrennung der Edelmetalle durch Einschmelzen von Kat-Keramik und Washcoat in einem Hüttenprozess. Der keramische Anteil wird in eine Schlackenphase überführt und abgestochen, die Edelmetalle werden in ein Sammlermetall legiert (aufkonzentriert), welches ebenfalls abgezogen und weiterverarbeitet wird. Nach verschiedenen Trennungs- und Raffinationsschritten werden am Ende die Edelmetalle mit hoher Reinheit ausgebracht. Bild 16 zeigt den grundsätzlichen Verfahrensablauf und die damit verbundenen Prozessanforderungen.

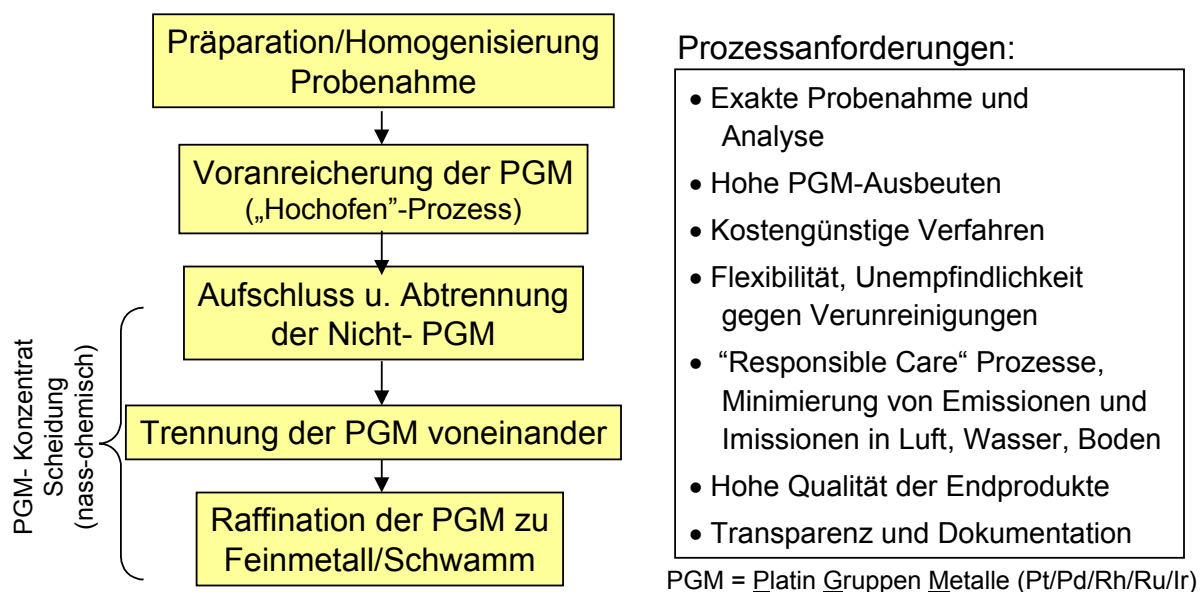


Bild 16: Prinzip der PGM-Scheidung

Grundsätzlich geeignete Sammlermetalle für PGM sind z.B. Kupfer, Eisen oder Nickel. Es existieren verschiedene pyrometallurgische Verfahren und Ofentypen, die - in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Edelmetallkonzentration des Einsatzmaterials – individuelle Vorteile bieten können. Zu unterscheiden sind auf PGM spezialisierte pyrometallurgische Verfahren von Basismetallhütten für Kupfer oder Nickel mit einer nachgeschalteten Edelmetall-Scheidung.

Bei den spezialisierten Verfahren haben sich in den 1990-er Jahren *Hochtemperatur-Elektroöfen*, ausgelegt als Plasma-, Lichtbogen oder Schlacke-Widerstandsofen durchgesetzt. Ein solcher Typ wurde von Degussa in Hanau als Gleichstromofen mit in das Bad eingetauchter Elektrode betrieben. Die Arbeitstemperatur liegt bei 1600-1800° C, was bei Zudosierung von Kalk als Flussmittel ausreichend ist, um auch hochschmelzende Keramiken zu verarbeiten. Die elektrische Energie wird über eine Bodenelektrode, die mit dem Beschickungsgut bzw. der Schmelze Kontakt hat, und eine zentral im Ofendeckel angeordnete, vertikal bewegbare Graphitelektrode eingebracht (Bild 17). Das keramische Einsatzmaterial wird auf Grund seines hohen elektrischen Widerstandes durch die entstehende Joulesche Wärme erhitzt und letztlich verflüssigt. Über die Position der Graphitelektrode sowie die eingestellte Spannung und Stromstärke können - abgestimmt auf das Einsatzmaterial – Schmelztemperatur, Schmelzgeschwindigkeit sowie der Ablauf des Gesamtprozesses gesteuert werden. Die Ofenschlacke wird an Kupferhütten abgegeben, wo Restgehalte von Kupfer und noch enthaltenen Edelmetallen zurückgewonnen werden. Die PGM werden in Kupfer als Sammlermetall aufkonzentriert und nach Erreichen einer definierten Konzentration aus dem Elektroofen als sogenanntes Werkkupfer abgestochen.[18] Andere Elektroöfen werden in den USA betrieben, hier wird häufig Eisen als Sammlermetall verwendet. Spezialisierte Verfahren sind in der Regel anfällig gegen Verunreinigungen. Besonders kritisch unter Sicherheitsgesichtspunkten sind Feuchte (Wasserstoffbildung bei hohen Temperaturen) sowie flüchtige Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoff, höhere Gehalte im Einsatzmaterial an Ni, Cr, Pb etc. können die Kosten der nachfolgenden Verarbeitungsschritte des PGM-Konzentrats erhöhen.

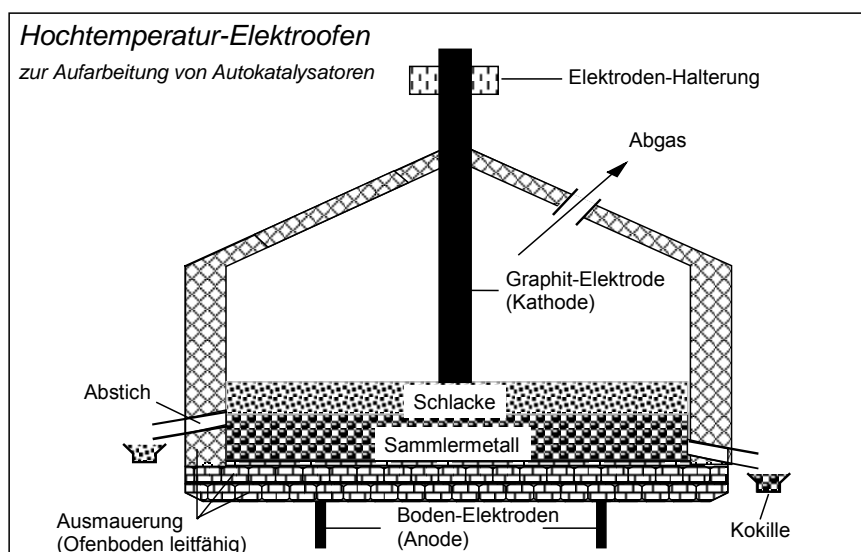


Bild 17: Prinzipdarstellung eines Elektroofens

Niedrighaltige Edelmetall-Katalysatoren werden häufig, zusammen mit anderen primären oder sekundären Metallkonzentraten, in *Basismetall-Hütten* (vor allem Kupfer-Hütten) verarbeitet. Aufgrund des sehr hohen Durchsatzes dieser Basismetallhütten sind die spezifischen Kosten für die Voranreicherung gering, allerdings sind die Edelmetallverluste vor allem bei Rhodium höher und die Durchlaufzeiten länger als bei den auf Platinmetalle spezialisierten Verfahren. Durch den Einsatz der Katalysatoren im Schmelzofen zusammen mit den Basismetall-Konzentraten findet zunächst eine Verdünnung der PGM-Gehalte statt. Nach verschiedenen Verarbeitungs- und Konzentrationsschritten gelangen die Edelmetalle schließlich in den Anodenschlamm der (Kupfer-)Elektrolyse, der nach Abtrennung der Halbmetalle Selen, Tellur, Arsen etc. im Treibkonverter mit den weiter unten beschriebenen hydrometallurgischen Verfahren für PGM-Konzentrate weiterverarbeitet wird.

Moderne, integrierte (Edel-)Metallhütten ("Smelter & Refiner"), wie der Ende der 90er Jahre neu installierte Prozess von Umicore Precious Metals in Hoboken, Belgien, verbinden heute die Vorteile von Hüttenprozessen mit denen von spezialisierten Edelmetallscheidereien (Bild 18). Die Prozessführung wurde hier hinsichtlich der Edelmetalle optimiert, so dass Durchlaufzeiten und Edelmetallausbeuten (auch bei Rh) erreicht werden, die Spezialprozessen vergleichbar sind. Durch die kombinierte Verarbeitung einer großen Bandbreite komplexer, edelmetallhaltiger Materialien lassen sich zusätzlich hohe Durchsätze und damit günstige Produktionskosten bei gleichzeitig hoher Flexibilität und Unempfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen erzielen¹⁴. Dazu wurde als Eingangsaggregat 1997 ein "Isa-Smelt"-Prozess installiert, bei dem über eine eingetauchte Lanze Luft, Sauerstoff, und Brennstoff in das geschmolzene Bad injiziert wird. Das im Einsatzmix enthaltene Kupfer bindet als Sammlermetall die Edelmetalle (s.o.), es wird beim Abstich direkt granuliert und einem "Electro-Winning" Prozess zugeführt, der einen schnellen Zugriff auf die Edelmetalle ermöglicht.¹⁵ Die Primärschlacke durchläuft im Schachtofen einen zweiten Hochofenprozess, bei dem Blei und andere NE-Metalle abgetrennt und verbleibende Edelmetallanteile zurückgewonnen werden. Anfallende Seitenströme können ebenfalls intern wieder eingesteuert und verarbeitet werden. Neben den Edelmetallen Gold, Silber, Platin, Palladium, Rhodium, Ruthen und Iridium werden auch die NE-Metalle Kupfer, Nickel, Blei, Zinn, Arsen, Selen, Tellur, Wismut, Antimon und Indium zurückgewonnen, was unter ökologischer Sicht große Vorteile aufweist. Abgasseitig ist der Prozess mit leistungsfähiger Nachverbrennung, Wäscher- und Filtersystemen ausgerüstet, so dass auch bei im Vergleich zu Autokatalysatoren weit problematischeren Materialien (z.B. Elektronikschrott) die strengen Emissionsgrenzwerte sicher eingehalten werden können. [19]

¹⁴ Die Umicore Anlage in Hoboken bei Antwerpen verarbeitet jährlich rund 250.000 t Einsatzmaterial und gewinnt daraus 17 verschiedene Metalle zurück. Neben Consumer-Altprodukten wie Autokatalysatoren oder Elektronikschrott werden industrielle Recyclingmaterialien (z.B. Chemie- und Ölraffinationskatalysatoren, edelmetallhaltige Rückstände aus der Schmuck-, Dental, Glas- und Fotoindustrie) sowie Beiprodukte und Rückstände anderer NE-Metallhütten und Edelmetallscheidereien verarbeitet (z.B. Anodenschlämme, Schlacken/Dross, Flugstäube, Schlämme, Metallkonzentrate).

¹⁵ Anders als bei der klassischen Kupferelektrolyse wird hier nicht vom Anodenkupfer ausgegangen. Das Kupfergranulat wird statt dessen zunächst in Schwefelsäure gelöst, aus der Kupfersulfatlösung wird dann Kupfer kathodisch abgeschieden, während die Edelmetalle und Verunreinigungen als Löserückstand verbleiben, der dann in Edelmetall-Konverter und Edelmetallscheiderei weiterverarbeitet wird.

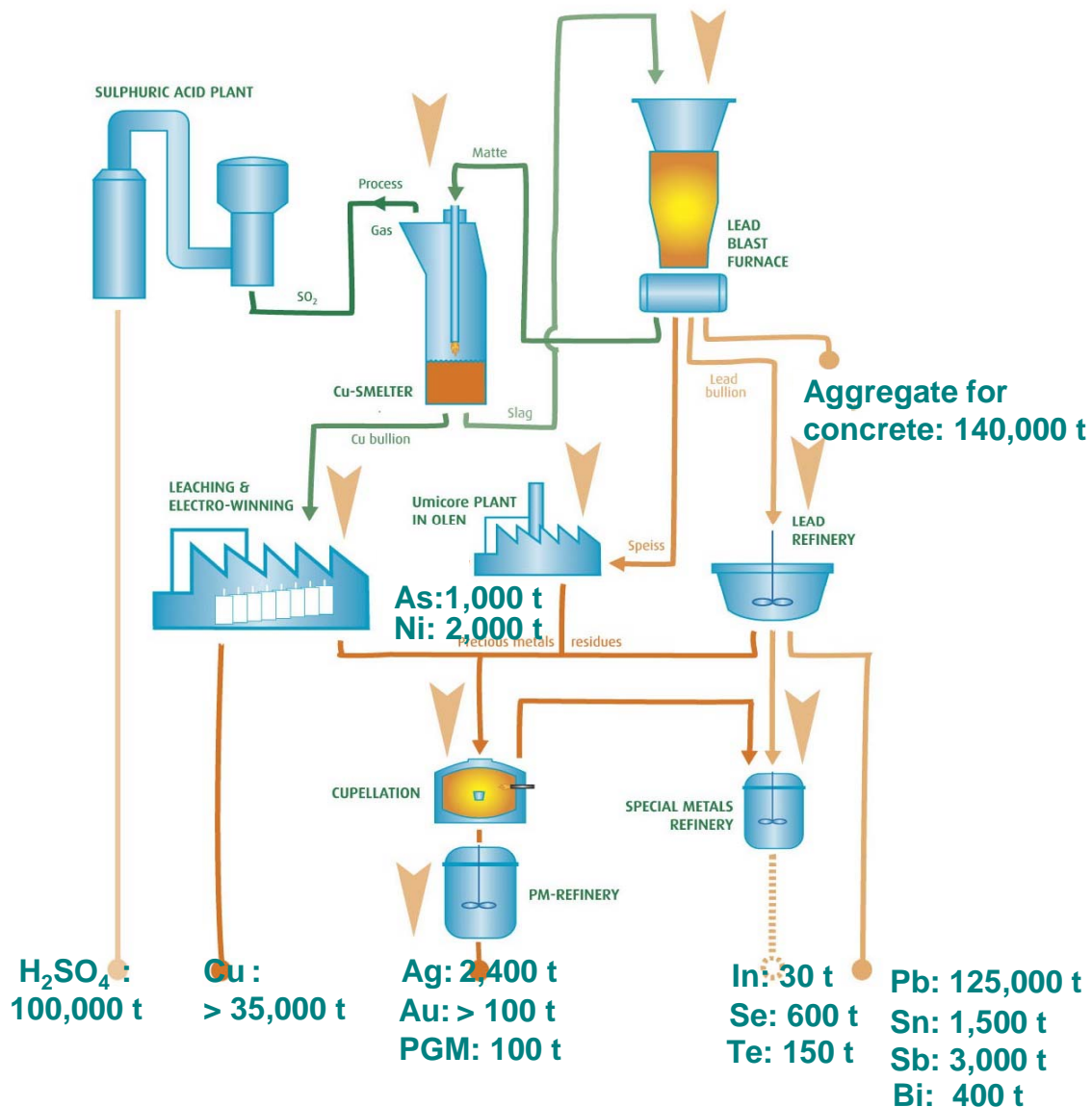


Bild 18: Prinzipieller Verfahrensablauf in einer integrierten Edelmetallhütte ("Smelter & Refiner"), (Beispiel Umicore Precious Metals, Hoboken/Antwerpen) [20]

Am Schluss der Voranreicherung liegt (unabhängig davon, wie diese durchgeführt wurde) ein verunreinigtes Edelmetall-Konzentrat vor. Dieses durchläuft anschließend mehrstufige hydrometallurgische Batch-Prozesse. Zunächst wird das Konzentrat mit HCl/Cl_2 oder Königswasser vollständig in Lösung gebracht.

Die PGM-Scheidung aus der Lösung erfolgt in drei Hauptschritten:

- Abtrennung der verbliebenen Nicht-Edelmetalle
- Trennung der Platinmetalle voneinander
- Raffination und Feindarstellung der einzelnen Platinmetalle

Um hohe Edelmetallausbeuten sicherzustellen, müssen alle bei der Raffination auftretenden Seitenströme sorgfältig nachbehandelt werden. Auf diese Weise können über die gesamte Verfahrenskette (inkl. Ofenprozess) bei Pt und Pd Ausbeuten von bis zu 98%, bei Rh > 80% realisiert werden (Bild 19).

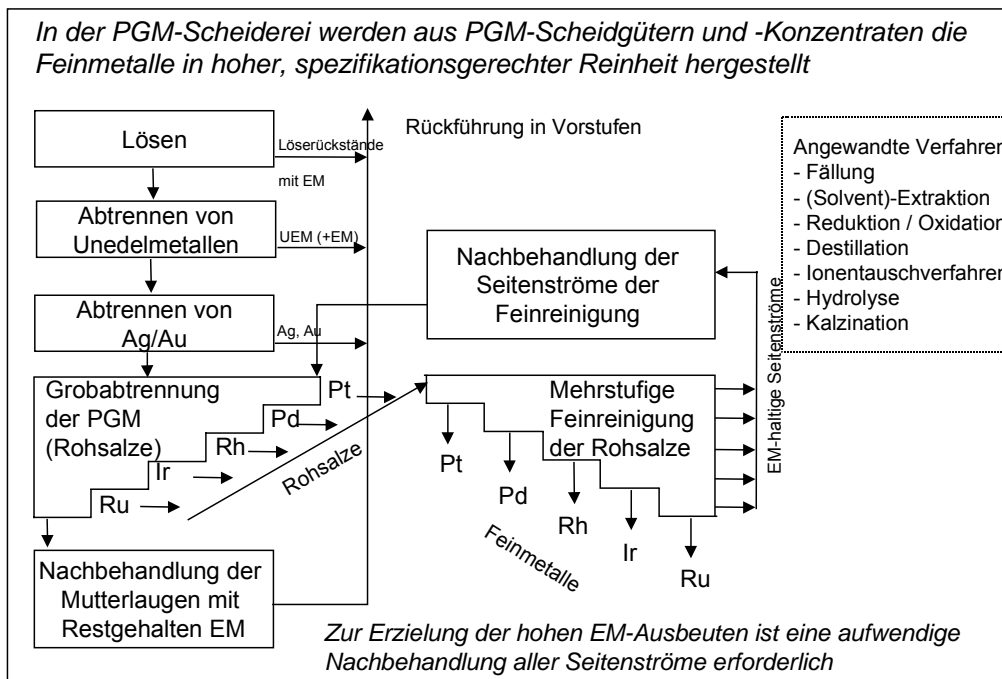


Bild 19: Raffination und Feindarstellung der einzelnen Platinmetalle

Vorteilhaft ist, wenn sowohl Voranreicherung als auch die nachfolgenden Raffinationsschritte innerhalb des gleichen Unternehmens durchgeführt werden können. Die Prozesse lassen sich dadurch optimal aufeinander abstimmen, Prozessströme können gut dokumentiert und aufwendige Probenahmen und Analysen von Zwischenprodukten vermieden werden.

Recycling von Dieselpartikelfiltern

Dieselpartikelfilter (DPF) können je nach Ausführung mit PGM, vorzugsweise Platin, beschichtet sein. Das Recycling dieser DPF ist grundsätzlich möglich und auch wirtschaftlich, die bestehende Infrastruktur zum Kat-Recycling kann dafür genutzt werden. Beschichtete Dieselpartikelfilter haben meist einen Träger aus Silizium-Karbid (SiC), dieser hat im Vergleich zum Kordieritträger des Autokats etwas ungünstigere Eigenschaften, die Edelmetallscheidung ist daher aufwendiger:

- Die größere Härte des SiC bedingt einen höheren Verschleiß beim Mahlen.
- Der deutlich höhere Schmelzpunkt erfordert vor allem für Elektroofenprozesse besondere Maßnahmen. Bei Temperaturen oberhalb von 1500° C zersetzt sich SiC (ohne zu Schmelzen) und wirkt als starkes Reduktionsmittel auf im Aufgabegut enthaltene Basismetalle (erhöht die Kosten der nachfolgenden Prozesse), auch ist mit einem stärkeren Verschleiß der Ofenausmauerung zu rechnen. Zur Herabsetzung des Schmelzpunktes und zur Ausbildung einer geeigneten Schlackenphase sind zusätzliche Zuschlagsstoffe (Kalk, SiO₂) erforderlich. Bei Temperaturen um 1500° C liegen SiC-Träger und PGM nicht wirklich frei, sondern in einer Art Suspension vor, was negative Auswirkungen auf die Abtrennung der PGM ins Sammlermetall haben kann (PGM-Ausbeute).
- Gebrauchte Partikelfilter sind mit Ruß und Aschen verunreinigt, diese können sich bei der Verarbeitung ebenfalls kostenerhöhend auswirken.

Aus den genannten Gründen sind beim Recycling von PGM-beschichteten DPF die Verarbeitungskosten tendenziell etwas höher und die PGM-Ausbeuten etwas niedriger. Genauere Aussagen können erst auf Basis von Praxisversuchen ermittelt werden, für die bisher aber noch keine ausreichenden Mengen verfügbar sind. Wegen ihrer höheren Durchsätze (Verdünnungseffekt) und der größeren Unempfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen weisen integrierte Edelmetallhütten bei der pyrometallurgischen Verarbeitung Vorteile gegenüber spezialisierten Elektroöfen-Prozessen auf.

Alt-DPF enthalten Aschen mit Zn, Cd, Mg und anderen Spurenelementen. Diese stammen aus dem Treibstoff, Öl oder Motorabrieb. Beim Handling von DPF müssen diese Aschen aus Gesundheitsgründen entweder kontrolliert entfernt werden, oder es muss sichergestellt sein, dass durch Wahl geeigneter Lager- und Transportgebäude keine Emissionen auftreten.

8 Geschäftsabwicklung beim PGM-Refining

Auf den verschiedenen Stufen der Recyclingkette haben sich unterschiedliche Geschäftsmodelle etabliert, die nachfolgend erläutert werden.

8.1 Ankauf von Recycling-Katalysatoren

Durch den Wert der enthaltenen Edelmetalle erhält die Anfallstelle vom Kat-Sammler in der Regel einen Preis für die Überlassung des Konverters. Die Höhe des Übernahmepreises ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Edelmetallbeladung des Katalysators: Diese schwankt wie zuvor ausgeführt stark je nach Motorentyp (Otto-Diesel), Motorvolumen (Kat-Volumen), Kfz-Hersteller und Baujahr des Katalysators.
- Edelmetallnotierungen für Pt, Pd, Rh: Wie in Kapitel 4 dargelegt, treten auch hier kurzfristig erhebliche Schwankungen auf.
- Füllgrad an Kat-Keramik: Ist der Monolith noch vollständig enthalten oder ging bei Betrieb oder Ausbau des Kats Keramik und damit auch Edelmetall verloren?
- Metallwert des Stahlgehäuses (unlegiert, Fe/Cr, Fe/Cr/Ni).
- Erforderlicher Logistikaufwand: Sind an einer Anfallstelle nur wenige Kats vorhanden oder kann bei einer Anfahrt eine größere Menge übernommen werden.

Folgende Ankaufsmodelle existieren in der Praxis:

Telquel-Ankauf

Hierbei handelt sich um den Ankauf zu einem Pauschalpreis¹⁶ pro Stück oder pro Gewichtseinheit, im Gegensatz zum weiter unten beschriebenen Ankauf auf Basis einer individuellen Edelmetallanalyse. Der Telquel-Ankauf ist (derzeit noch) das Standardgeschäft für die Übernahme von Kat-Konvertern aus dem End-of-Life Bereich oder bei Werkstätten.

¹⁶ Der Begriff „prendre la chose *telle quelle*“ stammt aus dem Französischen und bedeutet, eine Sache so nehmen wie sie (gerade) ist, d.h. ohne Preisbildung über eine nachträgliche individuelle Wertbestimmung.

Am häufigsten erfolgt der *Ankauf zu Stückpreisen*, wobei diese mehr oder weniger stark differenziert sein können. In Deutschland haben die Kat-Sammelfirmen in der Regel Stückpreislisten, die nach Fahrzeugmarken differenziert sind und teilweise noch Unterkategorien für die Baugröße des Konverters („groß“, „mittel“, „klein“) aufweisen. Wegen der Vielzahl der Katalysatortypen macht eine noch stärkere Differenzierung in der Praxis wenig Sinn, auch wenn innerhalb einer Herstellermarke die PGM-Beladungen verschiedener Kat-Typen (und Baujahre) zum Teil erhebliche Schwankungen aufweisen können. In anderen Ländern oder bei großen Stückzahlen gibt es oft auch Einheitspreise unabhängig von der Fahrzeugmarke oder nur nach Baugröße differenziert. Bei Übernahme wird in der Regel geprüft, ob der Kat-Monolith noch vollständig im Konverter enthalten ist, ansonsten gibt es Preisabschläge. In Abhängigkeit von der Entwicklung der PGM-Preise werden die Ankaufspreise regelmäßig überprüft und angepasst.

Bei größeren Partien, wenn eine Sortierung nach Typen und das Zählen zu aufwendig wäre, wird nach Sichtung und Stichprobenprüfung häufig *ein Preis pro Tonne* (Konvertermaterial) vereinbart. Die Firma Zimmer Schrott- und Metallhandels-GmbH bietet ihren regelmäßigen Vorlieferanten auch den sogenannten „Ankauf nach Zerlegung“ an. Dabei wird die Altkonverter-Partie eines Vorlieferanten separat entmantelt, die dabei erhaltene Katalysator Keramik wird gewogen und mit einem vereinbarten Kilopreis vergütet.[21].

Der Ankauf von Kat-Konvertern unterliegt erheblichen *Risiken*, die beim Telquel-Ankauf durch entsprechende Risikoabschläge berücksichtigt werden müssen. Diese sind:

- Das *Katalysator-Füllmengenrisiko*, d.h. welche Menge an Kat-Keramik oder Metall-Monolith ergibt sich tatsächlich nach der Entmantelung einer Katalysatorpartie? Wie zuvor ausgeführt, kann Monolithmaterial (und damit PGM) aus Kat-Konvertern - durch Schäden während des Fahrzeugbetriebs oder beim Ausbau, Lagern und Transport des Kats - verloren gegangen sein. Auch weisen viele Kat-Typen unterschiedliche Kat-Volumina und damit Monolithmassen auf. Beim Ankauf von größeren Partien zu Tonnenpreisen muss zudem abgeschätzt werden, wie viel PGM-freies Fremdmaterial (Rohre, Krümmer bis hin zu Schalldämpfern etc.) enthalten ist.
- Das *PGM-Inhaltsrisiko*, d.h. welche Beladung mit Platinmetallen (PGM-Gehalte) hat eine Partie nach Entmantelung und Homogenisierung tatsächlich? Sind in größerem Umfang Diesel-Kats enthalten (nur Pt), sind vor allem ältere Pt/Rh-Beladungen dominierend, oder gibt es nennenswerte Anteile Pd-reicher Typen, wo liegt die resultierende durchschnittliche PGM-Beladung? (Die Bandbreite in Europa reicht von 20 bis zu 200 g/ft³). In welchem Verhältnis Pt:Pd:Rh stehen die einzelnen PGM? Ende 2004 lag der Platin-Kurs rund viermal höher als der von Palladium, Automobilhersteller haben zum Teil für ihre Modelle bei Ottomotoren sowohl Pd- als auch Pt-dominierte Kats eingesetzt. Entsprechend groß kann die Bandbreite des Wertinhaltes eines Altkats ausfallen (vgl. Abschnitt 2).
- Das *PGM-Kursrisiko*; der Zeitbedarf von Ankauf einer Konverterpartie bis zur physischen Ausbringung der PGM als Feinmetall beim Refiner liegt bei mindestens 5 Monaten. In dieser Zeit kann das Preisniveau für PGM sich völlig verändert haben (vgl. Kapitel 4).

Zum Teil werden deutlich überhöhte Ankaufspreise für Altkatalysatoren geboten, die bisweilen beim Edelmetallwertinhalt oder sogar noch darüber liegen (so dass die in der Recyclingkette entstehenden Kosten nicht mehr gedeckt werden können).

Gründe dafür sind zum einen Unwissenheit der Akteure bzw. Spekulation auf steigende PGM-Preise. Viele - auch große - Kat-Sammelfirmen sowohl in Europa als auch in Nordamerika sind aus diesem Grund nach einiger Zeit wieder vom Markt verschwunden. Zum anderen können überhöhte Ankaufspreise aber auch ein Indiz für unseriöse Geschäftspraktiken sein.

Durch die zunehmende Bandbreite bei den Edelmetallbeladungen von Altkats, die große Typenvielfalt sowie die aktuell signifikanten Kursunterschiede zwischen Platin und Palladium wird der Telquel-Ankauf sehr viel schwieriger als früher und birgt erhebliche Risiken für Käufer und Verkäufer. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei steigenden Anfallmengen an Altkatalysatoren und einer Professionalisierung der Recyclingkette mittelfristig der Telquel-Ankauf durch Analyse-basierte Modelle abgelöst wird.

Ankauf auf Basis einer individuellen Edelmetallanalyse

Hierbei wird eine Partie entmantelt, die resultierende Keramik gemahlen, homogenisiert und beprobt und die Probe in einem darauf spezialisierten Labor auf die PGM-Gehalte analysiert. Bewertet mit den aktuellen PGM-Kursen kann so der exakte Wertinhalt ermittelt werden, aus dem sich nach Abzug von Logistik- und Verarbeitungspreisen sowie den technischen Edelmetallverlusten beim Refining ein Ankaufspreis bestimmen lässt. Ein solches Verfahren ist Standard beim PGM-Refining größerer Mengen bereits entmantelter Katalysator-Keramik (s.u.), wird für die Übernahme von Kat-Konvertern bisher aber nur sehr selten angewendet, da eine individuelle Analyse hier - von Kostenaufwand und Zeitverzug her - sehr aufwendig ist.

8.2 Toll-Refining von Katalysator-Keramik

Ein typischer Geschäftsprozess für das Edelmetallrecycling bei einem PGM-Refiner ist in Tabelle 3 dargestellt.

Beim *Toll-Refining* liefert der Kunde ein edelmetallhaltiges Material zur „Umarbeitung“ an den PGM-Refiner, der zunächst den analytischen Inhalt des Postens bestimmt, das Material verarbeitet und die PGM dem Kunden vergütet und zwar entweder physisch oder geldlich. Während des gesamten Verarbeitungsprozesses bleibt der Kunde (Lieferant der Katalysatoren) Eigentümer der in seinem Posten enthaltenen Edelmetalle. Der PGM-Refiner verkauft damit die Dienstleistung der PGM-Rückgewinnung, er ist in der Regel kein Einkäufer von edelmetallhaltigem Material. Die Abrechnung des PGM-Postens, d.h. Bezahlung der Dienstleistung und Vergütung (Menge und Zeitpunkt) der PGM wird auf Basis von Postenanalyse und vereinbartem Dienstleistungspreis (Aufarbeitsvertrag) durchgeführt.

Vor der eigentlichen Aufarbeitung muss somit der genaue Edelmetallinhalt des Katalysators festgestellt werden. Um eine repräsentative Probe für die Analyse zu erhalten, wird die Kat-Keramik nach exakter Wiegung auf eine Korngröße von ca. 1-2 mm gemahlen, homogenisiert und eine Teilmenge als Rohprobe abgetrennt, feinpräpariert und analysiert.¹⁷ Der analytisch ermittelte Edelmetallgehalt ist Grundlage für

¹⁷ Da es sich bei Autokat-Keramik um ein relativ homogenes Material handelt, ist für die Rohprobe diese Korngröße ausreichend. Eine stärkere Feinmahlung der Rohprobe kann bei Beschickung des Schmelzprozesses zu starker Flugstaubbildung führen, was sich negativ auf Prozesskosten und PGM-Ausbeuten auswirken kann.

die Abrechnung mit dem Anlieferer. Die Güte von Probenahme und Analyse ist damit ein entscheidendes Kriterium für das wirtschaftliche Ergebnis des Kundenpostens und damit für die Wettbewerbsfähigkeit des Aufarbeiters. Jeder Fehler hier kann einen vermeintlich günstigeren Preis eines anderen Verarbeiters bei weitem überkompensieren, da dann real weniger Edelmetall vergütet wird. Ein seriöser PGM-Refiner legt großen Wert auf die Transparenz dieses Schrittes, der Kunde kann bei der Probenahme anwesend sein oder sich durch einen neutralen Probenehmer vertreten zu lassen. Für die Abrechnung kann der Kunde entsprechend seinen Bedürfnissen wählen: Gutschrift der Edelmetalle auf ein Gewichtskonto oder Verkauf an den Refiner zu Tageskursen.

<u>Wesentliche Inhalte</u>	
1 Anfrage an PGM-Refiner*	Art, Zusammensetzung (Edelmetalle, Matrix, Beimetalle) und Menge des Recyclingmaterials, geplanter Lieferzeitpunkt
2 Angebot*	Refining Preise, PGM-Vergütung, PGM-Fälligkeit, PGM-Ankaufskonditionen, Lieferzeitpunkt, allg. Lieferbedingungen
3 Auftrag an PGM-Refiner	verbindliche Zusage von Material, Liefermenge und -zeitpunkt
4 Vereinbarung über Probenahme*	Treuhändlerische oder gemeinsame Bemusterung? Wenn gemeinsam, Abstimmung über Probenehmer und Zeitpunkt
5 Materialanlieferung	bei Eingang: Prüfung von Begleitdokumenten, Transportgebinden, Ermittlung des Bruttogewichts. Erfassung als individueller Posten im EDV-System mit eigener Postennummer als Ident.
6 Auftragsbestätigung	Mitteilung von Eingangsdatum und -gewicht, Materialart, Postennummer und der zu analysierenden Edelmetalle
7 (gemeinsame) Bemusterung	Öffnen der versiegelten Gebinde; Prüfung des Materials; Präparation/ Homogenisierung und Probenname des Postens; Feststellung von Netto- und Taragewicht sowie Gewicht nach Homogenisierung; Dokumentation im Probenahmeprotokoll
8 Analyse	bei gem. Bemusterung: i.d.R. Austausch der Analyseergebnisse mit kreuzender Post, Abstimmung des Abrechnungsgehalts
9 Abrechnung des Postens	Rechnung (Refining Preis) durch PGM-Refiner mit detaillierten Postenangaben (Gewichte, Analysen, PGM-Vergütung und -Fälligkeit); Begleichung des Rechnungsbetrags durch Kunden.
10 PGM-Fälligkeit	Gutschrift der PGM auf Kunden-Gewichtskonto, Ankauf zu Tageskursen oder physische Rücklieferung
<p>-----</p> <p>* Nach Probeauftrag wird i.d.R. ein längerfristiger Refining-Vertrag geschlossen, sodass auf zeitaufwendige Spotanfragen und Abstimmungen verzichtet werden kann. Ziel ist eine möglichst regelmäßige Lieferung, wodurch für Kunden und Refiner Kapazitäten fest eingeplant und die Abläufe optimiert werden können.</p>	

Tabelle 3: Geschäftsprozesse beim PGM-Refining

Der Aufarbeitungsvertrag enthält die Komponenten Verarbeitungs-/Raffinationspreis (Basis: Prozesskosten), PGM-Vergütung (Basis: technische Ausbeuten des Prozesses) und PGM-Fälligkeit (Basis: technisch-organisatorische Durchlaufzeit)¹⁸. Um aus verschiedenen Angeboten das tatsächlich günstigste auszuwählen, darf nicht nur eine dieser Komponenten herangezogen werden, sondern muss eine Gesamtbeurteilung (Bottom Line) durchgeführt werden. In einer sogenannten „Bottom-Line“-Rechnung werden PGM-Vergütung und -Fälligkeit monetär bewertet und dem Verarbeitungspreis hinzugefügt. Ein niedriger Verarbeitungspreis allein führt nicht automatisch zum günstigsten Angebot. Besonders wenn die PGM-Preise oder Leiherraten hoch sind, kann ein billigerer Verarbeitungspreis z.B. durch eine bessere Vergütungsquote kompensiert werden. Zusätzlich müssen Transport, Versicherung und sonstige Kosten sowie weiche Faktoren wie Zuverlässigkeit und finanzielle Stabilität des PGM-Refiners, Güte von Probenahme und Analyse etc. mit berücksichtigt werden. Ein Fehler bei der Bestimmung des wahren PGM-Gehalts von nur 5% (0,21% statt 0,22% PGM) kann bereits einen Verlust von 2.000 €/t Kat bedeuten. Dabei ist unerheblich, ob dieser Fehler durch unkorrekte Analyse, Probenahme, Feuchtigkeitsbestimmung, Gewichtsfeststellung oder auch durch Staubverluste aufgetreten ist [22]. Tabelle 4 zeigt – beispielsweise aus Sicht einer Automobilfirma – welche Kostenkomponenten in Zusammenhang mit dem Autokatalysator-Recycling zu berücksichtigen sind.

Nachstehende Überschlagsrechnung soll aufzeigen, dass das Katalysatorrecycling - über die erhöhte Versorgungssicherheit und den in Abschnitt 9 beschriebenen ökologischen Vorteil hinaus - auch in hohem Maße wirtschaftlich ist: Angenommen sei eine „Durchschnittskat“-Partie von 1 t Keramik mit 0,12% Pt, 0,07% Pd und 0,015% Rh (vgl. Abschnitt 2). Daraus können mit einem modernen Refining-Verfahren rund 2 kg PGM zurückgewonnen werden. Die Kosten inklusive Entmantelung, Transport, Versicherung und Lagerung sowie des PGM-Refinings¹⁹ liegen bei unter 8.000 €, d.h. pro kg PGM bei etwa 3.500 €. Dies ist, verglichen mit dem rückgewinnbaren PGM-Wert des Postens von etwas über 30.000 €, sehr gering²⁰. Nicht berücksichtigt sind – weil stark von den jeweiligen Randbedingungen abhängig – bei dieser Rechnung Zinskosten, Abwicklungskosten sowie die Kosten der Katsammlung, die aber zu keiner grundsätzlich anderen Relation führen.

¹⁸ Der Verarbeitungspreis bezieht sich auf das Nettogewicht des Postens und spiegelt den mengenproportionalen Aufwand wider (Annahme, Präparation, Schmelzlohn). Der Raffinationspreis bezieht sich auf die Menge der vergüteten Edelmetalle, d.h. den Aufwand der vom PGM-Konzentrat bis zur Darstellung der einzelnen PGM als Feinmetall erforderlich ist. Da dieser zwischen den PGM variiert, sind in der Regel auch die Raffinationspreise für Pt, Pd und Rh unterschiedlich, wobei die Rh-Raffination mit Abstand am teuersten ist. Wenn die PGM-Gehalte eines Postens im Vorfeld in der Größenordnung bekannt sind, kann der Raffinationspreis auch in den Verarbeitungspreis eingerechnet werden. Es handelt sich aber genau genommen um zwei unterschiedliche Kostenpositionen (Extreme: ein PGM-freier Kat erzeugt für Präparation und Schmelzen die gleichen Kosten, wie ein hoch beladener Kat ↔ ein reines PGM-Konzentrat hat nur ein geringes Gewicht und minimale Schmelzkosten, aber einen hohen Raffinationskostenanteil). Häufig wird in Angeboten eine weitere Preiskomponente „Handling und Analyse“ angegeben. Diese bezieht sich auf den Posten und ist ein Maß für den Mengen unabhängigen Aufwand für Analytik (die Laborprobenanalyse für einen 1 t Posten ist nicht weniger aufwendig, als für 10 t) und Abwicklungsaufwand („Papierspur“, Buchungskosten etc.). Wegen der mit dem PGM-Recycling verbundenen hohen Werte ist für Analytik und Abwicklung sehr große Sorgfalt mit entsprechenden Kosten unabdingbar.

¹⁹ Eine Unterscheidung der Recyclingkosten zwischen Pt, Pd und Rh macht wenig Sinn, da bis auf den Raffinationsschritt die Verarbeitungsschritte und -kosten für alle Metalle gleich sind.

²⁰ beim Preisniveau von Ende 2004: Pt ≈ 20.000 €/kg, Pd ≈ 4.500 €/kg, Rh ≈ 31.000 €/kg.

<ul style="list-style-type: none">• <i>Erfassungskosten</i> Übernahme (Ankauf), Transportlogistik und Lagerkosten für Kat-Konverter• <i>Entmantelungskosten</i> (€/t Kat-Konverter)• <i>Transportkosten</i> (zum Verarbeiter)• <i>Kosten für das PGM-Refining</i><ul style="list-style-type: none">- Handling + Analyse (€/Posten)- Verarbeitung (€/Kg Kat-Keramik)- Raffination (€/Kg vergütetes EM)• <i>EM-Zinskosten</i><ul style="list-style-type: none">- für Sammeln/Lagern bis Abgabe an Entmantelung- für Periode nach Abgabe Entmantelung bis Eingang Aufarbeiter- für Periode nach Eingang Aufarbeiter bis Fälligkeit der EM- für Periode zwischen EM-Fälligkeit und Gutschrift auf Gewichts-Konto des Neukatherstellers bzw. physischer Verfügbarkeit bei diesem• <i>Kosten für physische Bereitstellung des EM an Kat-Hersteller</i><ul style="list-style-type: none">- Transport und Versicherung des EM-Schwamms- Annahme und Analysekosten bei Kat-Beschichter• <i>Kosten für internen Abwicklungsaufwand</i> (Angebotseinholung und Auswertung, Überwachung der Einzelaufträge, Koordination zwischen allen beteiligten Parteien etc)

Tabelle 4: Mit dem Katalysator-Recycling verbundene Kosten aus Sicht eines Automobilherstellers

9 Ökologische Aspekte

Neben dem wirtschaftlichen Aspekt hat das Katalysator-Recycling klare ökologische Vorteile. Für die Gewinnung von 1 kg Platinmetallen z.B. aus einer südafrikanischen Mine müssen 150 t Erz aus 1000 m Tiefe abgebaut und zutage gefördert werden. Dort werden sie fein aufgemahlen, flотиert und schließlich pyrometallurgisch und hydrometallurgisch verarbeitet. Die Erze enthalten neben den PGM große Mengen an Kupfer und Nickel sowie auch nennenswerte Gehalte anderer abzutrennender Metalle (Chrom, Eisen, Kobalt, Wismut, Arsen, Selen, Tellur etc.), in der Regel als sulfidische Verbindungen. Während des Prozesses werden pro kg PGM knapp 400 t Tailings und Schlacken erzeugt, welche deponiert werden müssen. Neben der mit dem Bergbau einhergehenden Naturbelastung und dem Flächenverbrauch ist damit ein sehr hoher Energiebedarf verbunden. Im Vergleich dazu ist die Edelmetallkonzentration in einem Altkatalysator ausgesprochen hoch (ca. 1 kg PGM pro 2 t Kat-Konverter bzw. pro 0,5 t Kat-Keramik), das Material „sauber“ und der Verarbeitungsprozess weniger aufwendig. Alle Komponenten des Kats einschließlich Schlacken und Abwässer der Verarbeitung werden nachbehandelt und weiterverwertet. Unabhängig von einander kamen zwei zum Autoabgaskatalysator erstellte umfassende Ökobilanzen (s. Kap. 11) zu ähnlichen Ergebnissen: Energiebedarf und Umweltbelastung sind beim Kat-Recycling (inklusive der Sammellogistik) um ein Vielfaches geringer als beim Primärbergbau [23,24].

Trotzdem sollte von Kunden wie z.B. der Automobilindustrie die Recyclingkette unter „Responsible Care“-Gesichtspunkten kritisch überprüft und Transparenz über den

gesamten Ablauf erzielt werden. In diesem Zusammenhang sind einige - im Namen meist nur vordergründiger wirtschaftlicher Vorteile praktizierte - Recycling-Abläufe sicherlich zu hinterfragen. Wenn komplette Kat-Konverter einschließlich Stahlgehäuse z.B. von Europa nach Nordamerika verschifft werden, um dort entmantelt und an einen dritten Ort der Welt schließlich aufgearbeitet zu werden (unter kaum transparenten Umweltstandards), dann macht das unter ökologischen Gesichtspunkten wenig Sinn. Darüber hinaus eliminiert eine sorgfältige Betrachtung wirklich aller Kosten des Prozesses in der Regel auch die vermeintlichen wirtschaftlichen Vorteile.

10 Der PGM-Kreislauf aus Autokatalysatoren – eine Chance für die Automobilindustrie

Grundbedingung für die Erzielung hoher Recyclingquoten für PGM aus Autokatalysatoren sind effiziente Logistiksysteme, moderne Refining-Verfahren und den jeweiligen Randbedingungen optimal angepasste Abläufe, d.h. ein optimiertes Zusammenspiel aller an der Recyclingkette beteiligten Akteure. Wenn dies gelingt, können in zunehmendem Maß die Edelmetalle Platin, Palladium und Rhodium aus dem Recycling von Altkatalysatoren gedeckt werden.

Für die Automobilindustrie sollte ein professioneller Ansatz zum Kat-Recycling folgende Elemente beinhalten [25]:

- Eine ganzheitliche Strategie, welche sowohl die Recyclingkette für Autokatalysatoren als auch die Entwicklungs- und Herstellungskette für neue Katalysatoren einschließt: In einigen Automobilfirmen sind heute noch Kat-Recycling und Kat-Einkauf in unterschiedlichen, oft weit voneinander entfernten Verantwortungsbereichen angesiedelt, wodurch Synergien verschenkt werden.
- Eine umfassende Bewertung und korrekte Bottom-Line-Betrachtung zur Auswahl des am besten geeigneten Partners für das PGM-Refining: Häufig werden noch die Refining-Kosten übergewichtet, während der Einfluss von Entmantelungs- und Probenahmegüte, PGM-Verlusten oder interner Abwicklungskosten vernachlässigt wird.
- Ein professionelles PGM-Management: Der Fokus dabei muss auf langfristiger Sicherstellung der PGM-Versorgung und dem Vermeiden von Spekulationsrisiken bei gleichzeitiger Begrenzung von Preisspitzen, z.B. durch PGM-Kreisläufe, liegen. Zusätzlich sollte in der Vorphase der Zertifizierung neuer Katalysatoren das PGM-Management mit einbezogen werden und darlegen, welche mittelfristigen (Preis-)auswirkungen aus der Entscheidung für eine bestimmte PGM-Kombination entstehen können. Das PGM-Management muss dabei nicht zwangsläufig im eigenen Konzern durchgeführt werden, sondern kann auch an einen erfahrenen Partner vergeben werden.
- Maßgeschneiderte, an die jeweiligen Randbedingungen und individuellen Prioritäten angepasste Modelle: Es gibt nicht eine beste Lösung für die Automobilindustrie, aber es kann für jede Automobilfirma eine individuell beste Lösung entwickelt werden.
- Ein zuverlässiger, erfahrener und innovativer Partner, der möglichst viele Stufen der Recyclingkette abdeckt. Dabei hat eine langfristige Kooperation und gemeinsame Entwicklung der organisatorisch-technischen Abläufe ein sehr viel höheres

Erfolgspotenzial als eine kurzfristige Lösung durch vermeintlich „billige“ Spot-Geschäfte.

Sofern eine Automobilfirma selbst Katalysatoren sammelt oder sich dafür vorhandener Logistik-Systeme bedient, besteht als ein wichtiger Schritt die Möglichkeit eines direkten Edelmetall-Kreislaufs (s. Kap. 4, Bild 11). Die beim PGM-Refiner zurückgewonnenen Platinmetalle bleiben Eigentum des Anlieferers und können ohne jegliche Qualitätseinbußen wieder für die Beschichtung von Neu-Kats verwendet werden, wobei die Verrechnung wertneutral über ein Edelmetall-Gewichtskonto erfolgt. Besonders einfach und mit geringem Verwaltungsaufwand lässt sich dieser PGM-Kreislauf darstellen, wenn der PGM-Refiner gleichzeitig Hersteller von neuen Katalysatoren ist.

Neben dem Imagegewinn eines echten, als geschlossenen Stoffstrom darstellbaren Recycling-Kreislaufs bietet dieses Verfahren weitere Vorteile für den Anlieferer, wenn er gleichzeitig Käufer von Neukatalysatoren ist:

- Da die zurückgewonnenen Platinmetalle in seinem Besitz bleiben, erhöht sich die Versorgungssicherheit. Unabhängig von der aktuellen Angebots-/Nachfragesituation auf dem PGM-Markt fließen regelmäßig PGM aus dem Kreislauf zurück. Die verschiedentlich erwähnte hohe Konzentration der PGM-Versorgung auf wenige Primärproduzenten wird durch Recyclingkreisläufe vermindert, die Abhängigkeit von den Primärproduzenten reduziert (sofern als PGM-Refiner ein Sekundärproduzent gewählt wird).
- Für die Kreislaufmetalle besteht kein Kursrisiko, da sie nur gewichtsmäßig transferiert werden²¹. Ein Teil der für Katalysatoren benötigten PGM kann damit zu den sehr günstigen, oben abgeschätzten Recyclingkosten, „eingekauft“ werden, die auch langfristig vergleichbar stabil sind. Der Automobilhersteller kann die aus dem Recycling zurückfließenden PGM unmittelbar wieder für neue Katalysatoren einsetzen, kann diese z.B. aber auch „ansparen“, um damit Preisspitzen bei den PGM auszugleichen.
- Die Handelsspanne zwischen An- und Verkauf der Metalle entfällt.

Die etablierten Kreislaufsysteme und die dabei gewonnenen Erfahrungen können in einigen Jahren auch für PGM-Kreisläufe aus Brennstoffzellen genutzt werden. Marktstruktur sowie mögliche Akteure und Logistikwege sind dort grundsätzlich ähnlich, wegen der höheren Platinbeladung einer Brennstoffzelle (im Vergleich zum Autokatalysator) sind effiziente Recyclingkreisläufe hier aber sogar noch wichtiger.

Den in Deutschland bislang konsequentesten Ansatz beim Autokat-Recycling (auch in Verbindung mit den eigenen Canning-Aktivitäten) hat die Volkswagen AG gewählt. Europaweit werden aus den VAG-Vertragswerkstätten Altkatalysatoren zum Logistikzentrum Dieburg zurückgeführt. Auf dem Werksgelände in Kassel wurde im Jahr 2000 eine eigene Kat-Entmantelung in Betrieb genommen („Global Recycling“), die entmantelten Kat-Monolithen werden in regelmäßigen Abständen dem PGM-Refining

²¹ Dafür bieten Hersteller von Katalysatoren und PGM-Refiner ihren Kunden sogenannte Edelmetall-Gewichtskonten an, auf die - vergleichbar mit einem Währungskonto – PGM zu- und abgebucht werden können. Anders als bei Geldkonten sind allerdings bei Transfers zwischen Konten bei unterschiedlichen Unternehmen tatsächliche physische Bewegungen erforderlich, Giroüberträge sind wegen der damit verbundenen Steuerproblematik nur sehr eingeschränkt darstellbar.

zugeführt, bei Fälligkeit werden die PGM über Gewichtskonto unmittelbar für vom gleichen Unternehmen bezogene Neukatalysatoren genutzt und vermindern damit entsprechend die Zukaufsmengen an PGM. Die eigene Entmantelung stellt nicht nur eine enge Kontrolle dieses für die Edelmetall-Gesamtausbeute wichtigen Schrittes sicher, sie ermöglicht darüber hinaus eine sehr zeitnahe Auswertung der Kat-Rückläufe aus den Werkstätten: welche Konvertertypen fallen besonders häufig an, welche Schäden treten auf, wie alt sind die zurücklaufenden Konverter etc.? Da Volkswagen auch selber das Canning von Katalysatoren durchführt, können daraus wichtige Erkenntnisse zur dessen Optimierung gewonnen werden.[26]

11 Literatur

- [1] Johnson Matthey, Platinum 2004, Interim Review, London, Nov. 2004
- [2] GFMS, Platinum & Palladium Survey 2004, London, Mai 2004
- [3] C. Hagelüken, M. Buchert, H. Stahl: Stoffströme der Platingruppenmetalle, GDMB Medienverlag, Clausthal-Zellerfeld, 2005
- [4] C. Hagelüken: Recycling von Autoabgaskatalysatoren - Stand und Perspektive für Europa: Metall 49 (1995) 486-490.
- [5] C. Hagelüken, M. Buchert, H. Stahl: Substantial Outflows of PGMs Identified - Spent Autocatalysts are Systematically Withdrawn from the European Market, Erzmetall 56 (2003), H. 9, S. 529-540.
- [6] M. Nurdin: EU-Legislation on mobile source emission and their impact on PGM-demand, in: Proceedings of 3rd European Precious Metals Conference, Florence, 1997.
- [7] BOE Securities: PGMs and Eurocats, Oct. 2001.
- [8] Umweltbundesamt: TREMOD Transport Emission Estimation Model, Datensatz und Kalkulationsmodell für den motorisierten Verkehr, Berlin, 2002.
- [9] Kraftfahrzeugbundesamt (KBA) Flensburg: Statistische Daten über Fahrzeugzulassungen und Bestand in Deutschland, Information erhalten vom KBA 17.12.2001.
- [10] Arbeitsgemeinschaft Altauto (ARGE): 1. Monitorbericht zur umweltgerechten Entsorgung von Altfahrzeugen, Kap. 6.2 Altautoaufkommen (der Bundesregierung vorgelegt am 31.3.2000).
- [11] BDSV: Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen, mündl. Information 19.2.2002.
- [12] ACEA: ELV Country Report Charts, 30.7.2004 (www.acea.be).
- [13] J. Fairly, R. Norman: PGM Recycling - a supply time bomb?, in: Standard Bank London, Platinum Yearbook, 2003 edition, London Febr. 2003, S. 19-22.
- [14] C. Black: Scrap palladium seen flooding market by 2008, Reuters 27.2.2003.
- [15] C. Hagelüken: Material flow of platinum group metals - system analysis and measures for a sustainable optimisation, in: Proceedings of 27th International Precious Metals Conference (IPMI), 2003.
- [16] R. Zuber et. al.: Recycling of Precious Metals from Fuel Cell Components, 2004 Fuel Cell Seminar Abstracts, San Antonio, Tx, Nov. 1-5, 2004

- [17] C. Hagelüken et al: Verfahren zur Wiedergewinnung von Platinmetallen aus Fahrzeugabgaskatalysatoren, Patentschrift DE 4331 948 C1, 15.12.94.
- [18] V. Jung: Automotive exhaust catalysts: PGM usage and recovery, EMC 1991, Non-ferrous Metallurgy, Elsevier, London 1991, 231-239
- [19] M. Beck: Umicore focuses on precious metals, Recycling International, Oct 2002, S. 32-35.
- [20] www.preciousmetals.umicore.com
- [21] H.-O. Zimmer: Kat-Sammellogistik in der Praxis, Lehrgang Autoabgaskatalysatoren, Vortrag an der Technischen Akademie Esslingen, April 1999
- [22] C. Hagelüken: Platinum for nothing and Gold for free? - about technological miracles and business obstacles, in: Proceedings of the 28th International Precious Metals Conference (IPMI), 2004.
- [23] M. Schuckert et. al.: Optimization of Three-Way Catalyst Systems by Life-Cycle Engineering Approach, SAE paper 980100, 1998.
- [24] C. Hochfeld, Bilanzierung der Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Platingruppen-Metallen für PKW-Abgaskatalysatoren, Öko-Institut e.V., Darmstadt 1997.
- [25] C. Hagelüken: Securing the supply for tomorrow - Precious metals recycling from automotive catalysts, Metall 55 (2001), H.3, S. 104-111.
- [26] P. Ponke: Edles aus dem Kat, Volkswagen Magazin, Okt. 2000, S.16-19.
- [27] O.V.: Jäger des verlorenen Schatzes, Sekundär-Rohstoffe Dez. 2004, S.352-352.

Dr. Christian Hagelüken und 16 Mitautoren

Autoabgaskatalysatoren

Grundlagen – Herstellung – Entwicklung – Recycling – Ökologie

2., aktualis. u. erw. Aufl. 2005, 395 S., 309 Abb., 65 Tab., € 56,00, CHF 95,00
(Kontakt & Studium, 612)

ISBN 3-8169-2488-3

Zum Buch:

Es vermittelt einen umfassenden Überblick über den erreichten Entwicklungsstand und die Entwicklungstendenzen beim System Autoabgaskatalysator. Dabei wird besonders das komplexe Zusammenspiel vieler am »Kat« beteiligter Komponenten und Disziplinen herausgearbeitet, ohne die eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung an neue Randbedingungen (Gesetzgebung, Motorkonzepte, Treibstoffqualitäten) nicht möglich wäre. Autoren namhafter am Kat-System beteiligter Firmen erläutern anschaulich Funktion, Bedeutung und Herstellung der einzelnen Komponenten – vom Katalysatorträger über Beschichtung, Canning und Steuerungselektronik bis zur Abstimmung des Gesamtsystems beim Fahrzeughersteller. An Hand von Feldmessungen des Schweizer Touring Clubs werden die erzielten Ergebnisse dargestellt. Ergänzend werden die Aspekte Edelmetallmärkte, Ökobilanz, Katalysator-Recycling, Platinmetall-Emissionen und Kraftstoffe behandelt. Der Leser erhält hierdurch eine fundierte Grundlage und ein anschauliches Nachschlagewerk zu allen Fragen, die mit dem Thema Autokatalysator in Verbindung stehen.

Inhalt:

Allgemeine Grundlagen – Katalysatorträger und Dieselpartikelfilter – Aufbau, Herstellung, Testverfahren und Entwicklungstendenzen – Die Märkte der Katalysatormetalle Platin, Palladium, Rhodium – Integration und Betrieb in Abgasanlagen – Einsatz von Sensoren bei der Abgasreinigung – Katalysatoreinsatz im Fahrzeugbetrieb – Katalysator-Recycling – Edelmetall-Emissionen – Abgasmessungen des Schweizer Touring Clubs – Ganzheitliche Bilanzierung – Kraftstoffe – Anhang: Emissionsgesetzgebung

Die Interessenten:

- Fach- und Führungskräfte aus den Bereichen Automobilindustrie, Zulieferbetriebe und Recycling
- Mitarbeiter aus Forschungseinrichtungen, Universitäten und Fachhochschulen
- Mitarbeiter von mit dem Thema befassten Behörden und Verbänden
- Fachjournalisten

»Das interessante Buch sei allen empfohlen, die sich täglich mit dem Thema Abgasreinigung beschäftigen.«

MTZ Motortechnische Zeitschrift

✂-----

Bestellzettel

_____ Ex. Dr. Christian Hagelüken und 16 Mitautoren
Autoabgaskatalysatoren
ISBN 3-8169-2488-3

Anschrift

expert buch service
Postfach 20 20

71268 Renningen

Bestellzeichen

Datum

Unterschrift