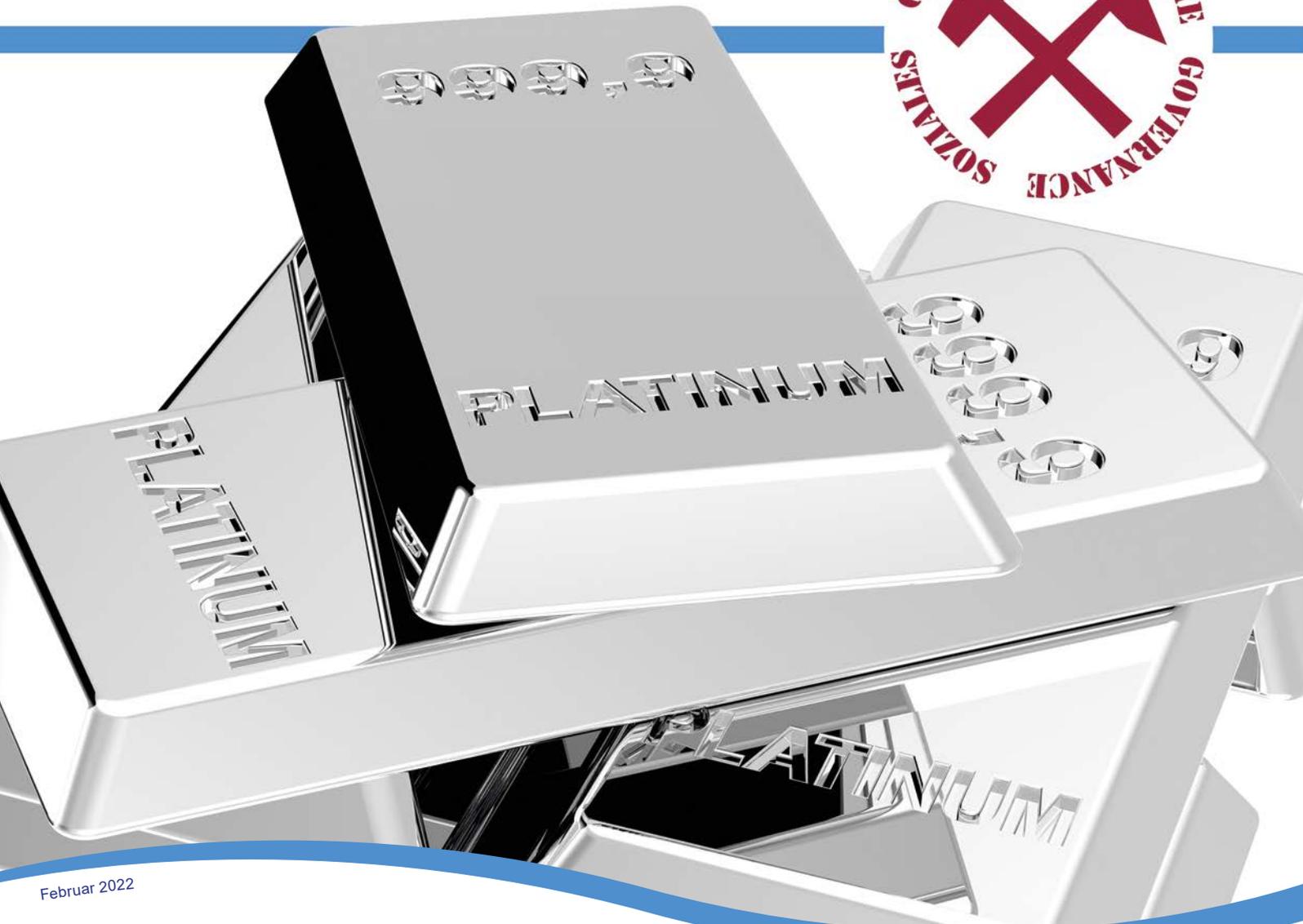


Platingruppenmetalle

Informationen zur Nachhaltigkeit



AUF EINEN BLICK

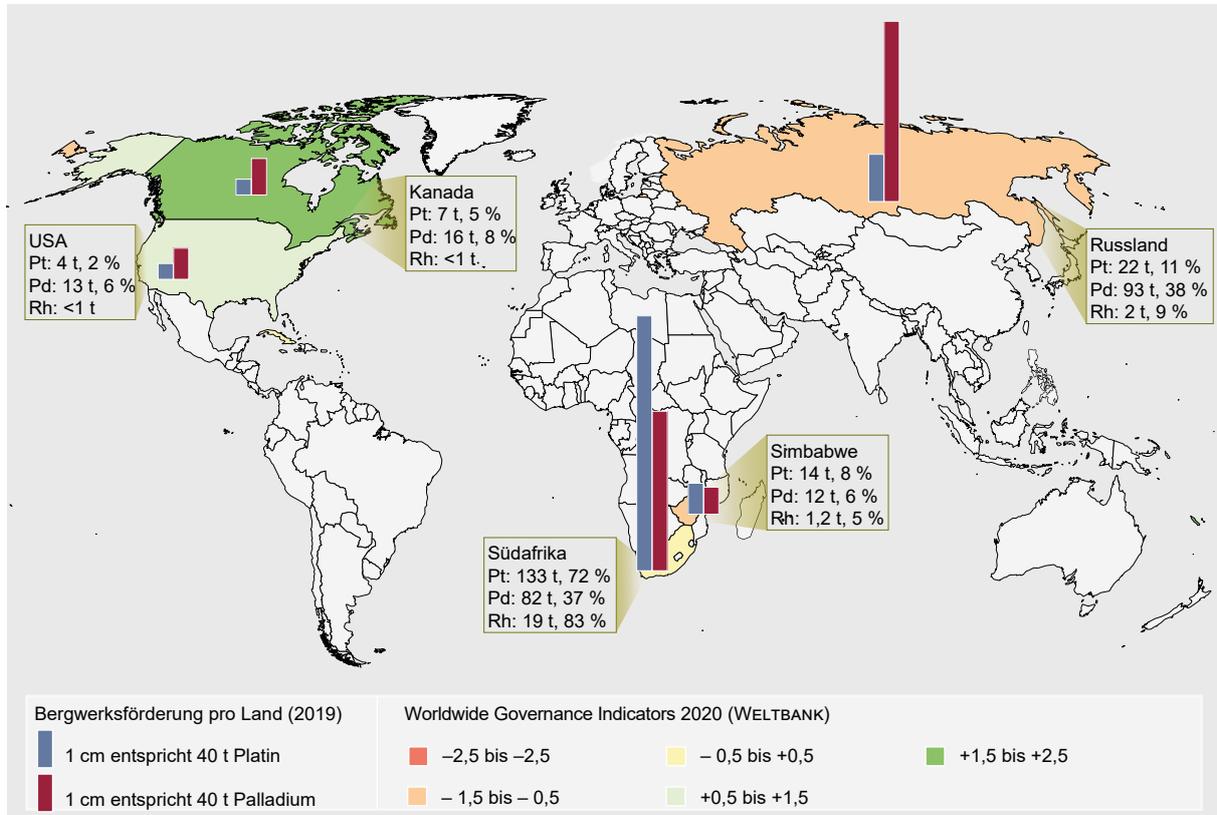


Abb. 1: Länder mit signifikanter Produktion an Platingruppenmetallen (PGM), Bergwerksförderung (2019), deren Anteil an der globalen Förderung sowie deren Indikatoren der Regierungsführung (WGI, World Bank 2021) (BGR-Datenbank) und deren governance laut WGI der Weltbank (WORLD BANK 2021).

- Die wirtschaftlich wichtigsten Platingruppenmetalle (PGMs) sind Platin (Pt) und Palladium (Pd), gefolgt von Rhodium (Rh). Die übrigen drei PGMs Osmium (Os), Iridium (Ir) und Ruthenium (Ru) nehmen wirtschaftlich nur eine untergeordnete Rolle ein. Rund ein Drittel des Platins und der Großteil des Palladiums und Rhodiums wird in Autokatalysatoren eingesetzt.
- Die wichtigsten Lagerstätten sind der Bushveld Komplex in Südafrika und die Norilsk-Talnakh Lagerstätte in Russland, aus denen praktisch die komplette Produktion an PGMs aus Südafrika und ein Großteil der russischen Produktion stammen. Beide Länder werden hinsichtlich ihrer allgemeinen Governance eher im mittleren bis unteren Bereich eingestuft. Weitere wichtige Produktionsländer sind Simbabwe, Kanada und die USA
- Die Lagerstätten in Russland (und Kanada) haben sehr hohe Sulfidgehalte, was bei der Verhüttung entsprechend gute Abgasreinigungssysteme voraussetzt und auch bei den Absetzbecken (Tailings) besondere Sicherungen erfordert.
- Die bei der Verhüttung der PGMs in Südafrika (auch in Simbabwe) eingesetzte elektrische Energie stammt zu einem Großteil aus der Kohleverstromung und ist daher mit entsprechend hohen CO₂-Emissionen verbunden. Die Gewinnung in Russland erfolgt als Beiprodukt der Nickelproduktion, wobei weniger elektrische Energie eingesetzt wird.

INHALT

1	Relevanz von PGMs	3
2	Von der Lagerstätte zum Metall	4
3	Recycling	8
4	Nachhaltigkeitsaspekte des Bergbaus und Weiterverarbeitung	10
5	Quellennachweis	14

1 RELEVANZ VON PGMS

Die Platingruppenmetalle können in die leichten PGMS (Ruthenium, Rhodium, Palladium) und die schweren PGMS (Osmium, Iridium, Platin) unterteilt werden. Die wirtschaftlich wichtigsten Elemente sind Platin, Palladium und Rhodium. Diese drei PGMS werden alle in Abgaskatalysatoren eingesetzt, der Anteil der Verwendung in Abgaskatalysatoren von PKWs von Palladium und Rhodium ist aber im Verhältnis zu Platin wesentlich größer (JOHNSON MATTHEY 2020).

Der Einsatz von **Platin** in PKW-Abgaskatalysatoren für Diesel-Verbrennungsmotoren ist besonders seit den 1980er Jahren von 20 t auf ca. 100 t im Jahr 2003 gestiegen und hatte im Jahr 2007 sein Maximum mit 127 t erreicht. Ein Standard-Katalysator enthält dabei im Durchschnitt 5 g PGMS, kann aber je nach Katalysator und Fahrzeug deutlich schwanken. Trotz steigender Mengen in den Katalysatoren ist der Einsatz seit 2007 wieder leicht zurückgegangen, da Palladium aufgrund seines hohen Wertes teilweise durch Platin substituiert wurde. Die wichtigste Region für den Einsatz von Diesel Katalysatoren ist Europa mit einem relativ hohen, wenn auch sinkenden Anteil an Dieselfahrzeugen. Im Jahr 2019 lag der Anteil der Verwendung von Platin in Abgaskatalysatoren bei 34 %, in industriellen Anwendungen (Chemie, Elektrotechnik, Glas, Medizin, Ö Raffinerien) bei 28 %, als Schmuck bei 24 % und im Investment bei 14 % (JOHNSON MATTHEY 2020).

Hauptanwendungsgebiet für **Platin** (Abb. 2) wird weltweit in den nächsten Jahren trotz stagnierender Nachfrage der Markt, für Abgaskatalysatoren bei Dieselfahrzeugen bleiben, ein Rückgang ist bei der Verwendung nach Platinschmuck zu beobachten. Die Nachfrage nach Platin-Schmuck ist in den letzten Jahren zurückgegangen. Die Nachfrage in den Bereichen Erdöl und Chemie ist steigend, wobei der zusätzliche Bedarf hauptsächlich aus China kommt. Mittel- bis langfristig wird die Nachfrage aus dem Automobilssektor aufgrund der Verschiebung zu Elektroautos deutlich nachlassen. Ein möglicherweise stark steigender Bedarf von Platin durch den rasanten Anstieg von Speicherkapazitäten in Rechenzentren bis zum Jahr 2040 wird diskutiert (DERA 2021). Dieser könnte demnach auf das 1,2 – 4,3-Fache der heutigen Produktion, also 230 – 800 t im Jahr 2040 steigen.

Ein neues Anwendungsgebiet für die Verwendung von PGMS, besonders von Platin und **Iridium**, sind Brennstoffzellen bei mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen. Der zukünftige Bedarf ist jedoch derzeit schwer zu beziffern. Eine Studie von INDWEDE (2018) schätzt den maximalen Bedarf im Jahr 2050 allein in Deutschland auf 2,65 t, was mehr als einem Drittel der heutigen Bergwerksförderung von Iridium entspricht (7,1 t 2016). Die Studie selber macht allerdings die Einschränkung, dass davon auszugehen ist, dass durch zu erwartende Innovationen der Einsatz von Iridium auf 0,2 t gesenkt werden könnte – unabhängig vom

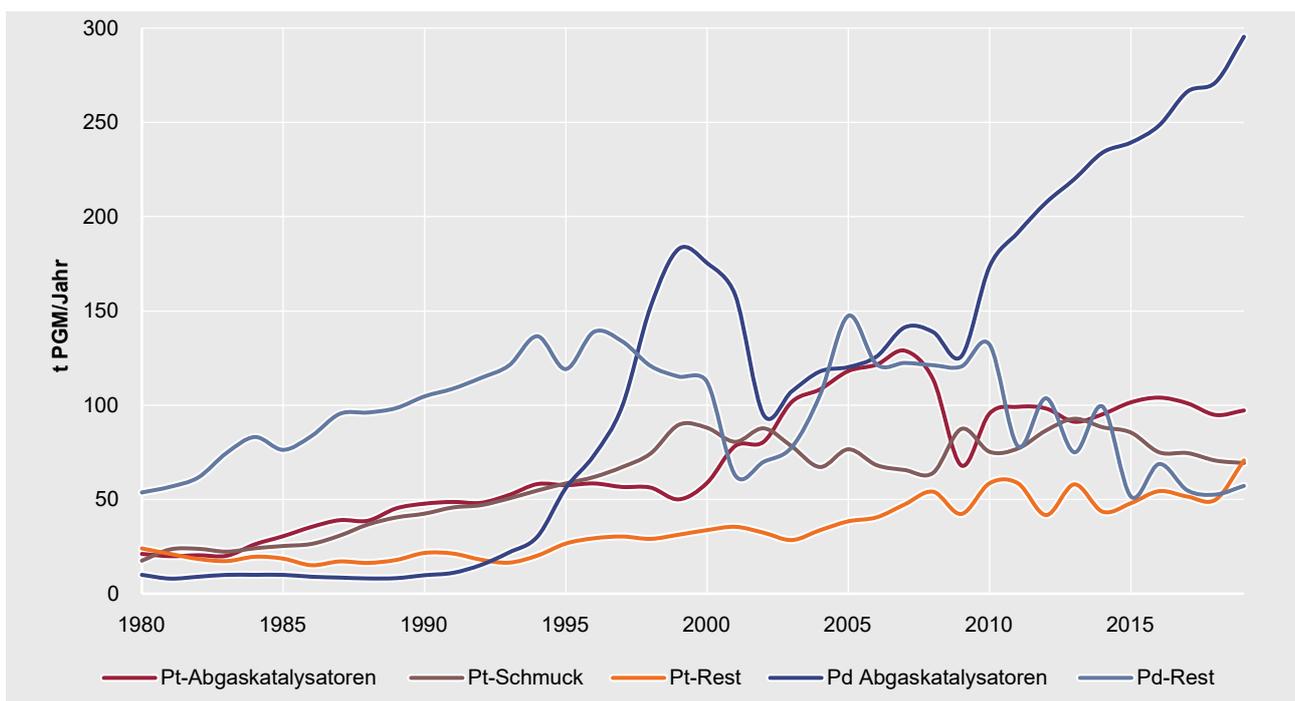


Abb. 2: Hauptanwendungsgebiete von Platin und Palladium weltweit seit 1980 (BGR Datenbank 2021).

tatsächlichen Eintreten der Annahmen in 30 Jahren (SIEVERS et al. 2020). Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Erzeugung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse. Die DERA (DERA 2021) geht davon aus, dass der Bedarf 2040 das 3-5 Fache der heutigen Bergwerksproduktion erreichen könnte. Neben Iridium wird auch Platin in Brennstoffzellen eingesetzt. Es liegen Studien vor, die im Labormaßstab den Einsatz von Platin von 30 – 50 g in Brennstoffzellen auf rund 5 g pro Fahrzeug reduzieren konnten. Selbst PGM-freie Brennstoffzellen sind möglich, aufgrund der geringen Stabilität und des schnellen Zerfalls der Zellen jedoch im Moment nicht wirtschaftlich umsetzbar (WAN et al. 2020).

Eine weitere Anwendung von Platin und Palladium besteht im Investment. Platin und Palladium werden beide in sogenannten Exchange Trade Funds (ETF) gehandelt. Dabei handelt es sich um physisch gesicherte Investitionen, bei denen das Metall (Platin und Palladium) in Tresoren hinterlegt ist. Seit dem Jahr 2007 sind im Durchschnitt jährlich rund 15 t Platin in solche ETFs geflossen, bei Palladium im selben Zeitraum im Mittel rund 3 t pro Jahr (BGR DATENBANK 2021). Aufgrund der hohen Preise für Palladium wurden von 2014 – 2019 im Durchschnitt 12 t Palladium pro Jahr aus ETFs abgezogen, um Gewinne mitzunehmen.

Palladium wird hauptsächlich in PKW-Abgaskatalysatoren von Benzinmotoren verwendet. Der Anteil am Gesamteinsatz lag 2019 bei 85 % mit steigender Tendenz. Im Jahr 2003 wurden 107 t in Abgaskatalysatoren verwendet, diese Zahl stieg bis 2019 relativ konstant auf 295 t. Die verbleibenden 15 % fielen 2019 fast ausschließlich auf industrielle Anwendungen (Chemie, Elektronik, Zahnmedizin). Nicht nur der steigende Anteil an Benzinmotoren hat zu der starken Zunahme des Einsatzes von Palladium geführt, sondern auch die höhere Beladung der Katalysatoren im Zuge strengerer Abgasvorschriften. Hinzu kommt, dass Platin in den 2000er Jahren, aufgrund relativ niedriger Preise für Palladium durch dieses Metall substituiert wurde. Dieser Trend ist mit den nun deutlich höheren Preisen von Palladium nicht nur gestoppt worden, sondern hat sich sogar umgekehrt, es wird also Palladium durch Platin substituiert.

Fast 90 % des 2019 zur Verfügung stehenden **Rhodiums** (35,5 t) wurden in Abgaskatalysatoren verwendet. Der Rest hauptsächlich in der Chemie und Glasindustrie.

Palladium und **Rhodium** werden v. a. in Abgaskatalysatoren eingesetzt, die über 80 % der Anwendungen mit weiter steigender Tendenz ausmachen. Steigende

Anforderungen an die Abgasreinigung führen dabei tendenziell zu höheren Gehalten von PGMs in Katalysatoren. Ein weiter steigender Bedarf wird aber im Falle eines zunehmenden Umstiegs auf die Elektromobilität begrenzt.

Der Einsatz von PGMs insbesondere in Abgaskatalysatoren ist unabdingbar, um Stickoxide und Kohlenmonoxid zu entfernen bzw. umzuwandeln. Je mehr PGMs in den Katalysatoren eingesetzt werden, desto bessere Abgaswerte werden erhalten. Je strenger also die gesetzlichen Anforderungen sind, desto mehr PGMs werden in diesem Sektor verwendet. Der heutige Einsatz von Platin in Abgaskatalysatoren liegt bei knapp 100 t, deutlich unter dem Maximum im Jahr 2007 von knapp 130 t. Bei Palladium hat sich der Einsatz von 2007 bis 2019 von 140 t auf fast 300 t fast verdoppelt. Aufgrund der Preisschwankungen, gibt es Bestrebungen entsprechend teure PGMs (Pd und Rh) mit günstigeren (Pt) zu ersetzen. Dies ist aber aufgrund der zwar ähnlichen, aber eben nicht gleichen katalytischen Eigenschaften der PGMs nur begrenzt möglich.

Trotz Zunahme der Verkaufszahlen im Bereich Elektromobilität ist in den nächsten Jahren nicht mit einem deutlichen Rückgang des Einsatzes von Palladium im Fahrzeugmarkt auszugehen. Besonders in Europa und China sind hier in den letzten Jahren deutliche Zuwächse zu verzeichnen gewesen (JOHNSON MATTHEY 2020) Bei Platin wird der Trend zu einem geringeren Bedarf wahrscheinlich anhalten.

2 VON DER LAGERSTÄTTE ZUM METALL

Platingruppenmetalle kommen in Lagerstätten gemeinsam vor. Daher wird oft nicht der Gehalt der einzelnen Elemente angegeben, sondern dies als **4E** oder **6E** angegeben. Dabei bezieht sich das E in 4E auf die Gehalte der Elemente Platin, Palladium, Rhodium und Gold. Bei 6E kommen noch Iridium und Ruthenium hinzu. Osmium wird aufgrund des geringen Gehaltes meistens nicht mit angegeben. Das Verhältnis der wirtschaftlich wichtigsten Elemente Platin und Palladium kann in den Lagerstätten deutlich variieren.

Hauptproduzenten von PGMs sind Südafrika, Russland, Simbabwe, Kanada und die USA (Abb. 1). Bei der Produktion stehen hauptsächlich drei verschiedene Lagerstättentypen im Abbau:

- Geschichtete Intrusionen (Layered Intrusions) (Südafrika, Simbabwe, USA)

- durch Meteoriteneinschlag entstandene sogenannte Impaktstrukturen (Kanada)
- Flutbasalte (Russland)

Bei den sogenannten Layered Intrusions handelt es sich um sehr große Intrusionskörper, in denen PGMs in einzelnen Schichten angereichert sind. Die PGMs sind in einer oder mehreren Lagen mit einer Mächtigkeit von 20 cm bis 200 m angereichert (2 – 25 g/t). Die mit Abstand größte Layered Intrusion ist der Bushveld Komplex in Südafrika, der auch die weltweit größten Lagerstätten für PGMs beinhaltet. Hier werden untertägig das Merensky Reef und das UG2 abgebaut (ca. 4 – 6 g/t PGMs) und übertägig das Platreef (2 – 3 g/t PGMs). Im benachbarten Simbabwe befinden sich ebenfalls PGM Vorkommen, die im „Great Dyke“ im Untertagebau abgebaut werden (3 – 4 g/t). Eine weitere Layered Intrusion befindet sich in Montana (USA). Hier wird das sogenannte „JM Reef“ mit Gehalten von knapp 20 g/t untertägig abgebaut. Dieser Lagerstättentyp weist geringe Gehalte an Ni und Cu und geringe Sulfidgehalte auf, was einen hohen Energieaufwand bei der Verhüttung erfordert.

An eine große Impaktstruktur gebunden sind die Lagerstätten im Gebiet des kanadischen Sudbury (Ontario). Hauptbestandteile dieser Lagerstätten sind Nickel und Kupfer mit Gehalten im Bereich von 2 – 4 %. Die PGMs sind ein Beiprodukt, das aber bei Gehalten von 1 – 3 g/t einen wichtigen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit

leisten kann. Auch diese Lagerstätten werden untertägig gewonnen.

Ein weiterer sehr wichtiger Lagerstättentyp sind sogenannte Flutbasalte. Bei diesen Flutbasalten sind große Mengen magmatischen Gesteins entweder ausgetreten oder liegen knapp unter der Erdoberfläche als Lagergänge (Sills). Die wichtigste Lagerstätte dieses Typs ist der Norilsk-Talnakh Distrikt auf der Taimyr Halbinsel in Russland. Die Lagerstätte enthält Kupfer und Nickel als Hauptmetall (3 – 5 %) und hat erhebliche Gehalte an PGMs (im Durchschnitt 5 g/t), die untertägig gewonnen werden.

Die Lagerstätten in Kanada und Russland weisen sehr hohe Cu- und Ni-Gehalte und sehr hohe Sulfidgehalte auf. Der Schwefel dient bei der Verhüttung als Energieträger, so dass weniger Energie zugeführt werden muss. Die Abgase sind allerdings sehr SO₂ reich, und aus den Rückständen (hauptsächlich Tailings) können saure Grubenwässer entstehen.

Nicht nur die Gehalte, sondern auch die Verhältnisse von Platin zu Palladium zueinander variieren in den erwähnten Lagerstätten deutlich. Platin dominiert die Lagerstätten des Merensky Reefs mit einem relativ konstanten Verhältnis zu Palladium von 2:1. Im UG2 liegen die Verhältnisse von Platin zu Palladium zwischen 2:1 und 1:1 und im Platreef (Abb. 3) ähnlich wie im Great Dyke bei 1:1. Die Ni-Cu dominierten Lager-



Abb. 3: Bohrkern aus dem Platreef, Südafrika, mit einem sehr großen Pentlanditmineral (linker Bereich, bräunliches Mineral), dem Hauptträger von Palladium. Foto: BGR.

stätten weisen dagegen deutlich mehr Pd auf (Pt/Pd = 0,3). Auch die Lagerstätte von Stillwater ist deutlich von Palladium dominiert.

Verarbeitung von PGMs aus Layered Intrusions

Die mit Abstand größte Lagerstätte mit der ebenfalls mit Abstand größten Produktion ist der Bushveld Komplex in Südafrika. Die wichtigsten Abbaunternehmen sind Anglo American Platinum, Sibanye-Stillwater, Impala Platinum und Northam Platinum. Lediglich die Norilsk-Talnakh Lagerstätte in Russland, die von dem Unternehmen Nor Nickel betrieben wird, hat eine ähnliche Größe. Die wichtigsten Lagen im Bushveld Komplex sind das Merensky Reef und der UG2 (Upper Group 2) Chromit, sowie das Platreef im nördlichen Bereich der Intrusion. Merensky Reef und UG2 sind unter einem Meter mächtig, erstrecken sich aber relativ konstant über mehr als 100 km. Der Abbau findet hauptsächlich in Tiefen von einigen 100 m statt. Das Platreef hat eine deutlich größere Mächtigkeit von mehreren Metern bis zu 200 m und kann aufgrund der Mächtigkeit und der Nähe zur Oberfläche im Tagebau gewonnen werden. Die PGMs kommen zusammen mit Chalcopyrit (Cu-Fe-Sulfid), Pentlandit (Ni-Fe-Sulfid) und Pyrrhotin (Fe-Sulfid) vor.

Die Gehalte von Ni und Cu im Merensky Reef und Platreef liegen bei ca. 0,3 %, im UG2 allerdings nur bei rund 0,1 %. Dafür sind die Chromitgehalte im UG2 deutlich höher, was beides (wenig Sulfid und viel Chromit) einen höheren Energiebedarf bei der Verhüttung zur Folge hat. Die Lagerstätten des Bushveld Komplexes, des Great Dykes und des Stillwater Komplexes werden ähnlich aufbereitet. Den Prozess der Aufbereitung zeigt Abb. 4. Nach dem Abbau und der Zerkleinerung des Erzes folgt die Flotation. Dabei werden die Platinlegierungen und die Buntmetallsulfide in ein Konzentrat überführt. Der Gehalt der PGMs steigt von wenigen g/t auf 100 – 400 g/t im Konzentrat (JONES 2005, THE THWAYO 2018). Das Konzentrat wird anschließend getrocknet und in Elektroöfen (Schmelzhütten, die mit elektrischer Energie das Erz schmelzen) aufgeschmolzen, um die Silikate und Oxide von den PGMs zu trennen. Die Buntmetallsulfide, mit denen die PGMs vergesellschaftet sind, bilden Tröpfchen, die sich nicht mit der silikatischen und oxidischen Schmelze vermischen können. Sie schließen sich zu größeren Tropfen zusammen und sinken aufgrund ihres größeren spezifischen Gewichts während dieses Prozesses nach unten und bilden die sogenannte Matte (Fe-Ni-Cu-S-PGMs). Die übrigen Bestandteile des geschmolzenen Konzentrats, die Schlacke, ist leichter und schwimmt auf der Matte. Die Schlacke kann nach dem Abkühlen noch einmal aufbereitet werden, um noch enthaltene Sulfid-

tröpfchen zurückzugewinnen. Die Konzentrate aus dem Merensky Reef haben einen Chromitgehalt von deutlich unter 1 % und einen Buntmetallgehalt von bis zu 0,3 % (JONES 2005). Die Konzentrate aus dem UG2 weisen dagegen mehrere Prozent Chromit und niedrigere Gehalte an Buntmetallsulfiden auf. Die Sulfidgehalte dürfen einen bestimmten Prozentsatz nicht unterschreiten, weil die Schmelztröpfchen sonst isoliert in der Schmelze vorliegen und sich nicht zu größeren Tropfen verbinden und dann nicht absinken können. Entsprechend bildet sich weniger PGM-reiche Matte und es findet keine Anreicherung der Wertmetalle statt. Ein weiterer Nachteil der UG2 Erze ist der hohe Cr-Gehalt. Dieser bildet eine Spinellstruktur, die nur bei deutlich höheren Temperaturen geschmolzen werden kann (JONES 2005). In Südafrika werden die Konzentrate aus dem UG2 und dem Merensky Reef meistens verschnitten und gemeinsam verhüttet. Der Prozess ist kostenintensiver und schwieriger in der Prozessführung, allerdings können so Konzentrate mit deutlich höheren Chromitgehalten verarbeitet werden.

Historisch wurde zunächst das Merensky Reef abgebaut, da die Verhüttung chromithaltiger Konzentrate problematisch ist. Da sich das UG2 durchgängig einige 100 m unterhalb des Merensky Reefs befindet und heutige Verhüttungsprozesse einen bestimmten Chromitgehalt tolerieren, werden die Konzentrate oft miteinander verschnitten. Für den zusätzlichen Abbau des UG2 kann der Abbau an den gleichen Standorten mit etwas tieferen Schächten fortgesetzt werden, was relativ kostengünstig ist.

Im Platreef liegt über dem sulfidischen Erz, was zu Konzentraten aufbereitet wird meistens ein unterschiedlich mächtiger oxidischer Bereich vor. Die vormalig sulfidischen, PGM-haltigen Erzminerale sind oxidiert, was eine Anreicherung über das Verfahren der Flotation unmöglich macht. Dieses PGM-haltige Material wird häufig separat aufgehaldet und wird momentan als nicht wirtschaftlich aufbereitbar angesehen. Es gibt eine Reihe von Forschungsarbeiten, in denen Möglichkeiten zur Gewinnung mittels Laugung diskutiert werden. Die BGR war in diesem Feld aktiv. HEDRICH et al. (2020) beschreiben eine Kombination von Biolaugung als Vorbehandlung mit anschließender chemischer Laugung (HNO₃/NaCl mit anschließender Zyanidlaugung), was zu einem Ausbringen von 89 % Pt und 96 % Pd geführt hat.

Nachdem die Konzentrate verschnitten sind und die Verhüttung stattgefunden hat, erhält man eine PGM-haltige Matte (0,2 – 0,4 % PGMs). Diese wird im Konverter mit Sauerstoff umgewandelt. Dabei wird ein Teil des Schwefels zu Schwefeldioxid oxidiert und geht

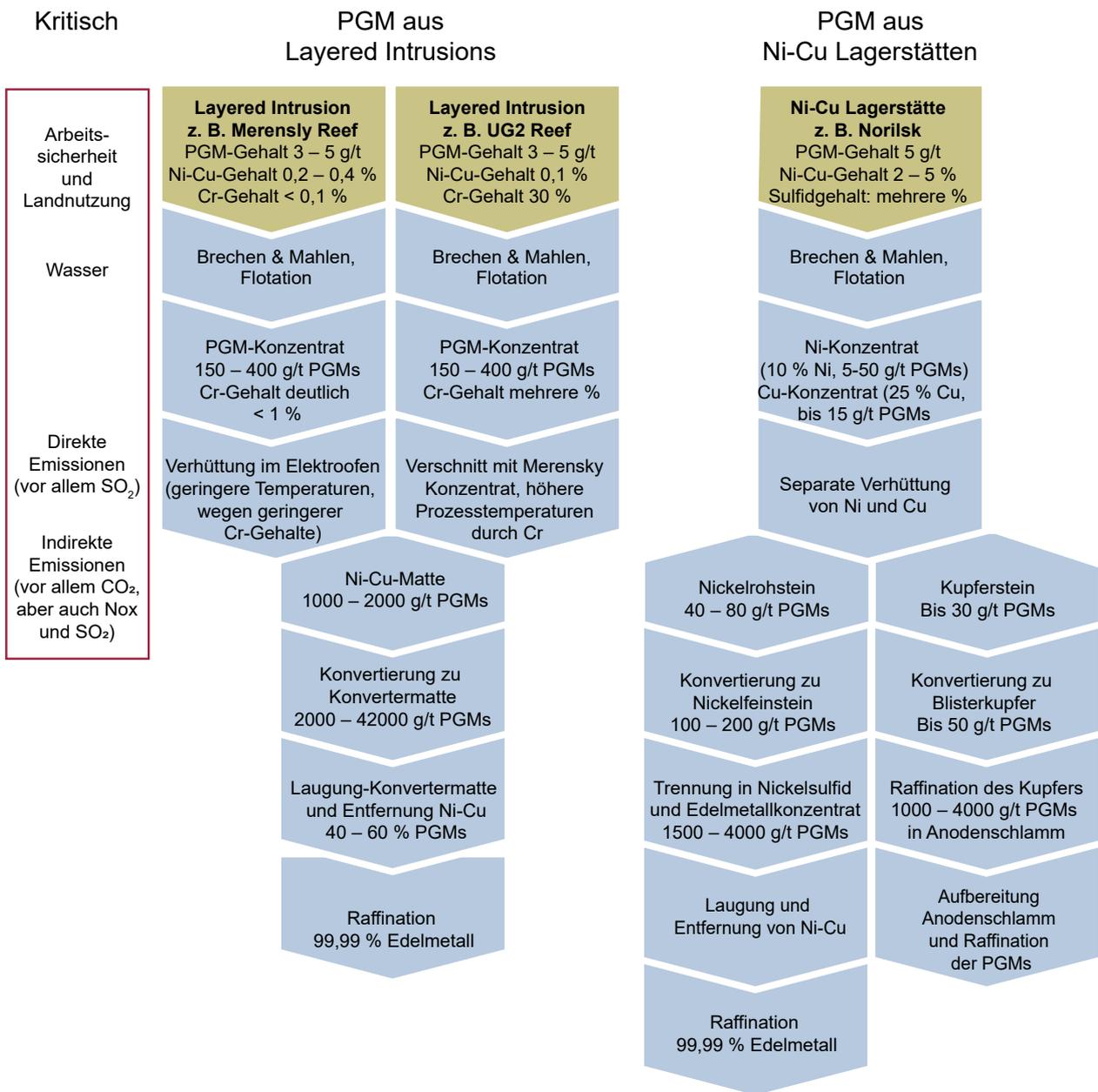


Abb. 4: Die wichtigsten PGM-Erze und typische Aufbereitungspfade und Gehalte an PGMs in den verschiedenen Zwischenprodukten.

in die Abluft. Gleichzeitig wird das Eisen verschlackt. Das erhaltene Produkt hat einen PGM-Gehalt von ca. 0,4 – 0,6 %. Die Hauptbestandteile sind Nickelsulfid, Kupfersulfid und gewisse Bestandteile an Eisensulfid.

Die nun vorliegende Konverter-Matte wird anschließend in einer Nickel-Kupfer-Raffinerie weiter aufbereitet. Dabei werden Nickel und Kupfer mit Schwefelsäure gelaugt und anschließend zu reinem Metall raffiniert oder zu Zwischenprodukten verarbeitet. Der Nickel- und Kupferfreie Rückstand hat einen PGM-Gehalt von 30 – 65 % PGMs, die dann in einer Edelmetallraffinerie

in die jeweiligen Metalle mit einer Reinheit von 99,90 bis 99,95 % getrennt werden.

Verarbeitung von PGMs aus Kupfer-Nickel-Erzen

Bei der Produktion von PGMs aus Kupfer-Nickel-Erzen werden zunächst ein Kupferkonzentrat und ein Nickelkonzentrat erzeugt, die beide PGMs in unterschiedlichen Konzentrationen enthalten. Zusätzlich kann über Dichtesortierung (Zentrifuge) direkt ein Konzentrat mit bis zu 1.000 g/t PGMs erzeugt werden. Dies verringert die Verluste in die Tailings und zusätzlich müssen die PGMs nicht mehr über die Buntmetallverhüttung gewonnen werden, sondern können direkt weiterverar-

beitet werden (BLAGODATIN et al., 2000). Die übrigen PGMs aus den Kupfer- und Nickelkonzentraten werden ähnlich den Verfahren der südafrikanischen PGM-Verhüttung geschmolzen und konvertiert. Dabei werden allerdings keine Elektroschmelzöfen eingesetzt, sondern verschiedene andere Schmelzöfen, die den hohen Schwefelanteil in den Konzentraten als Energiequelle nutzen.

Der Schwefel stammt aus sulfidischen Mineralen (hauptsächlich Kupfer- und Nickelminerale, sowie Pyrrhotin) und ist beim Aufschmelzvorgang ein essentielles Element, da er Energieträger ist und sich die PGMs in der sulfidischen Matte sammeln. Ein Teil des Schwefels reagiert bei diesem Aufschmelzvorgang zu SO_2 und geht ins Abgas. Um den Eisenanteil in der Matte zu verringern und den Schwefelgehalt weiter zu verringern muss die geschmolzene Matte zum Konverter transportiert werden. Dort wird Luft oder Sauerstoff eingeblasen. Ein Teil des Eisens wird dabei verschlackt und ein Großteil des Schwefels reagiert zu Schwefeldioxid und geht ins Abgas. Dies ist auch bei der Kupferverhüttung der Fall, allerdings ist es hier möglich mittels eines kontinuierlichen Prozesses einen konstanten Abgasstrom mit entsprechend konstanten Gehalten an SO_2 zu produzieren. Dieses Abgas wird dann mit dem sogenannten Doppelkontaktverfahren mit Wasser vom Schwefel befreit und es wird Schwefelsäure produziert. Bei der PGM Produktion besteht heute auch die Möglichkeit den Konverter kontinuierlich zu betreiben. Dadurch kann ebenfalls Schwefelsäure produziert werden und die SO_2 Mengen im Abgas können um mindestens 96 % reduziert werden. Da dieses kontinuierliche Verfahren in der PGM-Verhüttung relativ neu ist, verfügen die meisten Hütten noch nicht über diese Technik. Einige werden bereits umgerüstet, bei anderen ist dies in Planung.

Weitere Unterschiede zur Verhüttung von PGM-Konzentraten aus Layered Intrusions sind die niedrigeren Schmelztemperaturen und dass prozentual deutlich mehr Kupfer- und Nickelmatte entsteht. Die PGMs werden nach der Konvertierung der Kupfer- oder Nickelmatte und der Raffination aus dem Rückstand der Kupfer- und Nickelraffination gewonnen (Anodenschlamm).

Eine Schematische Zusammenfassung der Aufbereitungsprozesse ist in Abb. 4 zu finden.

Generell ist die Gewinnung von PGMs eher mit der Verhüttung von Buntmetallen zu vergleichen, als mit der Gewinnung anderer Edelmetalle wie Gold und Silber. Dies führt entsprechend auch zu ähnlichen Risiken, wie der Emission von Stickoxiden, Schwefeldioxid und des Wasser- und Energieverbrauchs (siehe Kapitel 4).

3 RECYCLING

Recycling ist ein wichtiger und steigender Bestandteil der Versorgung mit PGMs (Abb. 5). Die Recyclingquoten in den unterschiedlichen Anwendungsgebieten unterscheiden sich teilweise deutlich voneinander.

Nach Johnson Matthey (2020) stammten 2019 aus dem weltweiten Gesamtangebot von gut 250 t Platin knapp 70 t (27 %) aus dem Recycling. Bei Palladium waren es 2019 gut 100 t aus dem Gesamtangebot von fast 330 t (33 %). Dieser Anteil ist besonders bei Palladium in den letzten Jahren deutlich gestiegen, weil immer mehr Material vor allem aus den Abgaskatalysatoren dem Recycling zur Verfügung steht.

Haupttreiber des Recyclings ist die Wirtschaftlichkeit aufgrund des hohen Wertes der PGMs und der relativ hohen Konzentration in den unterschiedlichen Typen von Katalysatoren. Nachgeordnet sind rechtliche Maßnahmen wie die WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) Richtlinie der Europäischen Union. Hagelüken (2012) gibt an, dass auf den Platinen von Computern und Mobiltelefonen neben Gold auch 80 – 130 g/t Pd vorkommen. In Autokatalysatoren können die Werte sogar 2.000 ppm, also 0,2 % erreichen. Diese Werte sind um mehr als das 10-fache bis das 1.000-fache höher, als in geologischen Lagerstätten. Leiterplatten und Mobiltelefone haben also einen PGM-Gehalt, der mit einem Erzkonzentrat vergleichbar ist, Abgaskatalysatoren einen Gehalt, der mit der eingeschmolzenen sulfidischen Matte vergleichbar ist. Dadurch ist das Recycling nicht nur wirtschaftlich, sondern schont auch natürliche Ressourcen. Es vermeidet SO_2 und NO_x Emissionen, die bei der Verhüttung der primären Erze entstehen und spart Wasser, das sonst für Abbau und Aufbereitung verwendet werden müsste. Nach Mudd et al. (2009) entfallen 2/3 des Energie- und ein Großteil des Wasserverbrauchs beim Primärbergbau auf Abbau und Aufbereitung. Dies entfällt beim Recycling. Ähnliche Werte werden von Bossi und Gediga (2017) berichtet, die auf eine Reduktion von 72 % kommen.

Grundvoraussetzung für das Recycling ist ein funktionierendes System des Sammelns, Sortierens und des Auseinanderbauens der Komponenten. Dies ist besonders bei bestimmten elektronischen Bauteilen ein Problem, wenn diese an schlecht zugänglichen Stellen verbaut sind oder entsprechend klein sind, sodass sich die Demontage nicht rechnet. Können die Geräte aufgrund der Zugänglichkeit oder der Größe nicht demontiert und sortiert werden, werden sie normalerweise geschreddert. Eine anschließende Sortierung der werthaltigen PGM-haltigen Bauteile ist dann normalerweise nicht

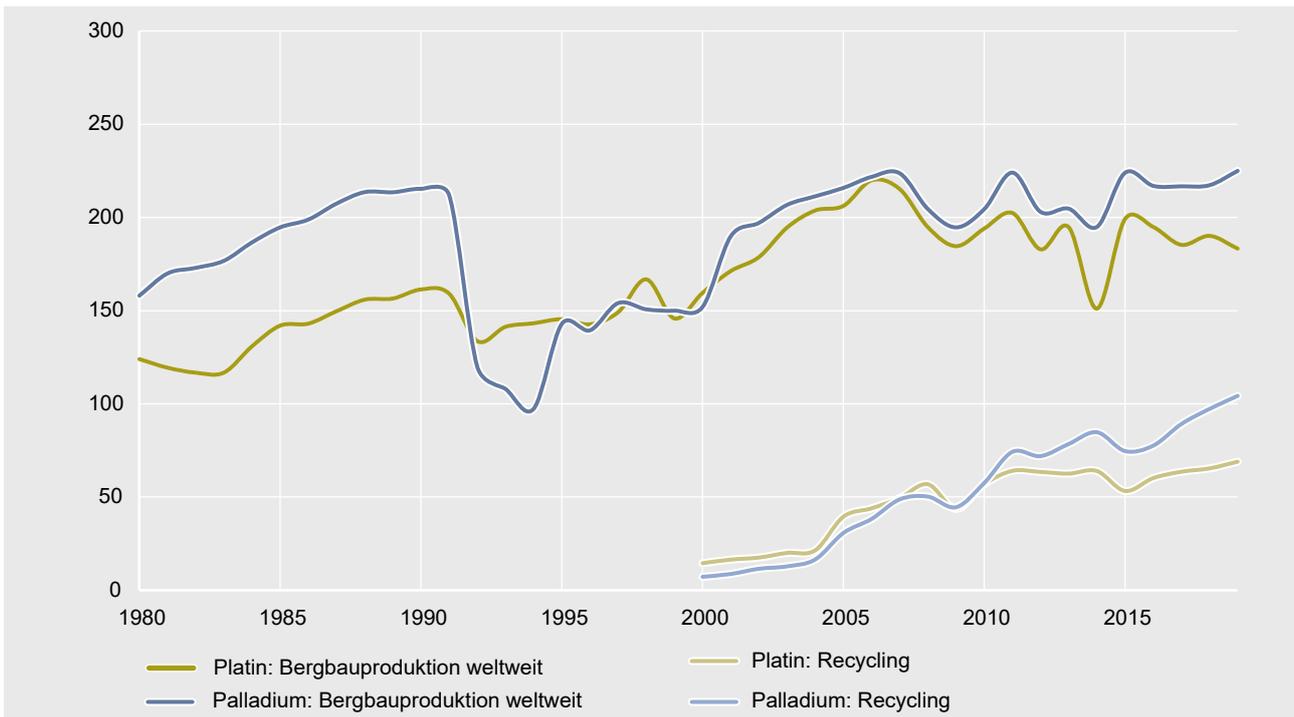


Abb. 5: Entwicklung der Bergbauproduktion und des Recyclings von Platin und Palladium.

mehr möglich, weil sie zu fein verteilt und mit anderen Materialien verdünnt sind. Entsprechend wird bei elektronischen Bauteilen oft nur eine niedrige zweistellige Recyclingquote erreicht (HAGELÜKEN 2012).

Bei Katalysatoren wird nach HAGELÜKEN (2012) eine Recyclingquote von 50 – 60 % erreicht. Die Katalysatoren sind aufgrund der guten Erreichbarkeit, Demontierbarkeit und hohen Gehalte sehr gut für das Recycling geeignet, allerdings verlassen viele Gebrauchtwagen die EU nach Afrika und Asien, wo die Katalysatoren bei der Verschrottung der Autos oft nicht getrennt gesammelt und recycelt werden. Dadurch geht dem Kreislauf ein großer Anteil verloren. Im Zuge der deutlich gestiegenen Preise besonders für Palladium und Rhodium könnte sich dies ändern, denn auch in den Abnehmerländern der Exporte stellen die Katalysatoren einen Wert dar, der bei einer reinen Verschrottung des gesamten Autos verloren gehen würde (HAGELÜKEN 2004, 2012; DERA 2015). Aufgrund der Größe des Marktes und der Recyclingquote von lediglich gut 50 % finden die mit Abstand größten Verluste bei den Abgaskatalysatoren statt. Das bedeutet auf der anderen Seite, dass hier auch die größten Potenziale zur weiteren Vergrößerung der Recyclingquote der PGMs bestehen. Dies gilt insbesondere für Palladium, dessen Einsatz in Abgaskatalysatoren in den letzten 10 Jahren verdoppelt wurde. Somit wird in Zukunft auch die Verfügbarkeit von Palladium steigen, jedoch ist dies erst am Ende der Lebensdauer eines Autos der Fall. Um die Recyclingquote zu erhöhen, sollten daher auch Katalysatoren, die ins

außereuropäische Ausland exportiert wurden entweder zurückgebracht oder vor Ort in entsprechende Recyclingsysteme überführt werden, so dass eine möglichst sortenreine Sammlung und Wiederverwendung ermöglicht wird. Bei 300 t Palladium und 100 t Platin, die 2019 in Abgaskatalysatoren verbaut wurden, würde eine Erhöhung der Recyclingquote um nur 10 % einer zusätzlichen Wiederverwendung von 40 t PGMs pro Jahr entsprechen, und einen Wert (Durchschnittspreise 2020) von ca. 2,4 Mrd. USD haben.

Die höchste Recyclingquote dürfte im Juwelierbereich liegen. Aufgrund der extrem hohen bis praktisch reinen Verarbeitung können die Rohstoffe sehr gut eingeschmolzen und neu verarbeitet oder in Scheideanstalten in reine Metalle getrennt werden.

Wie bei den oxidierten Platinerzen wird auch im Recycling versucht das Ausbringen mittels Mikroorganismen zu verbessern. So testet das deutsche Unternehmen Brain Biotech. Die Versuche laufen bereits im Pilotmaßstab und laut Unternehmen sind Ausbeuten von bis zu 100 % möglich. (BRAIN BIOTECH 2022).

4 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DES BERGBAUS UND DER WEITERVERARBEITUNG

Bei den PGMs werden Bergbau und Weiterverarbeitung (Verhüttung) häufig von den gleichen Firmen an den Bergbaustandorten durchgeführt. Die Erfassung von Energie- und Wasserverbrauch macht eine Unterscheidung von Bergbau und Verhüttung oft unmöglich. Daher werden diese beiden Bereiche hier zusammen betrachtet.

4.1 Umweltaspekte

Flächenbedarf und Bergbaurückstände

Eine Tonne PGM-haltiges Erz enthält nur wenige Gramm der Edelmetalle, kann aber einen sehr hohen Wert haben. Daher ist es wirtschaftlich, PGMs aus relativ großen Tiefen und in relativ dünnen Lagen untertägig abzubauen. Die Lagerstätte Mogalakwena in Südafrika (Abb. 6) ist die einzige große Tagebaumine, in der mehrere Tonnen PGMs pro Jahr gefördert werden. Fast der gesamte Rest der PGM Produktion stammt aus untertägigem Abbau. Für die Umwelt ist dieser Untertageabbau vorteilhaft, da kein Abraum, der die Lagerstätte überdeckt entfernt und aufgehaldet werden muss und nur relativ geringe Mengen an taubem Gestein an die Oberfläche gefördert werden müssen. Trotzdem fallen auch bei Erzen aus dem Untertagebau bei der Aufbereitung sehr große Mengen an Rückständen an, die als Tailings in Schlamnteichen abgelagert werden. Als Vergleichsgröße zwischen Tagebau und Untertagebau kann hier aus den oben beschriebenen Gründen nur die Tagebaumine Mogalakwena herangezogen werden. Die Fläche des Tagebaus und des Abraums betragen nach einer Auswertung mit Google Earth (2021) ca. 29 km² (80 %), die Fläche für die Tailings knapp 6 km² (16 %) und die Fläche für die Aufbereitungsanlagen 1,4 km² (4 %). Bis einschließlich 2020 wurden ca. 370 t PGMs in dem Tagebau gefördert (div. Jahresberichte Anglo American Platinum), was einem relativen Flächenverbrauch von ca. 100 m² pro kg PGM entspricht. Nähme man diesen Tagebau als Maßstab, so geht daraus hervor, dass der Untertagebau inklusive Aufbereitung und Rückständen nur 20 % der Fläche eines Tagebaus einnimmt, also etwa 20 m² pro kg. Tatsächlich wäre der Flächenverbrauch sogar noch etwas geringer, weil die Gehalte im Untertagebau doppelt so hoch sind und entsprechend weniger Fläche für Tailings und Aufbereitungsanlage benötigt würden, sodass der berechnete Wert von 20 m² als Maximum anzusehen ist. Dies ist vom Erzwert pro genutzter Fläche mit dem Kupferbergbau vergleichbar (vergleiche BGR 2020). Hinzu

kommen noch die Verhüttung und die Raffination der PGMs, die einen deutlich geringeren Anteil am gesamten Flächenverbrauch im Vergleich zum Tagebaubetrieb haben, wenngleich auch hier Abfälle wie Tailings und Schlacke anfallen. Trotz des großen Anteils des Untertagebaus im PGM-Sektor sind die Auswirkungen aufgrund der hohen Dichte der Schächte im Bushveldkomplex und hier insbesondere im Bereich Rustenburg, nordwestlich von Johannesburg groß.

Der absolute Flächenbedarf für Bergwerke unterliegt zeitlichen Änderungen im Laufe von Nutzung und Renaturierung. Zu Beginn des Abbaus liegt bereits Abraum vor und auch die Fläche zur Ablagerung der Tailings ist bereits hergerichtet, ebenso wie die Aufbereitungsanlage. Der entsprechende relative Flächenverbrauch pro geförderter Einheit ist entsprechend hoch. Im Verlauf des Abbaus nimmt der Abraum insbesondere bei Tagebaubetrieben weiter zu, die Halden gehen allerdings stärker in die Höhe, als in die Fläche. Das gleiche gilt für die Tailings, insbesondere in Südafrika, wo diese nicht in Seitentäler mit einem Hauptdamm eingeleitet werden, sondern in relativ flachem Gelände mit ringsum verlaufenden Dämmen abgelagert werden. Diese Dämme werden bis in eine bestimmte Höhe ausgebaut, anschließend werden die Halden abgedeckt und renaturiert und ein neues Tailingsbecken wird errichtet, bis die Mine ausgeerzt ist. Als Beispiel eines Betriebs mit untertägigem Abbau mit einem sehr geringen Flächenverbrauch sei hier die Lagerstätte Stillwater/East Boulder in den USA genannt. Diese weist sehr hohe Gehalte von über 15 g/t PGMs auf. Die genutzte Fläche für die Aufbereitung und die Tailings beträgt gut 3 km². In den letzten 30 Jahren wurden gut 340 t Palladium und ca. 120 t Platin gefördert. Danach läge die Flächeninanspruchnahme bei 6,4 m² pro kg PGM, deutlich unter maximalen Wert von 100 m² für den Tagebau.



Abb. 6: Ausschnitt des Mogalakwena Tagebaus von Anglo American Platinum im Platreef, Südafrika. Foto: BGR.

Wenn man davon ausgeht, dass 80 % der Fläche für den Tagebau und den Abraum verwendet werden, so liegt der Flächenverbrauch in Südafrika (hauptsächlich Untertageabbau) bei einer groben Näherung zwischen 8 und 24 m² pro kg PGM. Da beim Untertageabbau kaum Abraum anfällt, kommen nur die Fläche der Aufbereitungsanlage und die Tailings als Landnutzung zum Tragen. Bei hohen Gehalten nimmt das Tailingsvolumen relativ gesehen ab, je höher der Gehalt des Erzes ist, sodass sich diese Verhältnisse bei Minen mit sehr hohen Gehalten zugunsten eines geringeren Flächenverbrauchs ändert. Die momentan in Südafrika für den Bergbau genutzten Flächen liegen nicht in intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen, oder Wäldern mit sehr hoher Biodiversität. Allerdings sind einige Nationalparks und Landschaftsschutzgebiete in unmittelbarer Nachbarschaft. Teilweise sind die Bergbaubetriebe direkt an Siedlungsgebiete herangebaut, bzw. die Siedlungsgebiete an die Betriebe. Dies macht eine möglichst geringe Staub- und Geräuschbelastung besonders relevant.

Wasser

Aufgrund der eingesetzten Aufbereitungsmethode, der Flotation, liegt der Wasserverbrauch pro Tonne Erz bei ca. 1 m³. Dieser Wert ist relativ unabhängig vom aufbereiteten Rohstoff. Auch bei der Flotation von Kupfererzen liegt der Wasserverbrauch pro Tonne Erz meistens in der Größenordnung von 1 m³. Das Verfahren der Flotation ist die effektivste Methode zur Anreicherung der PGM-haltigen Minerale bzw. Legierungen. Um das Ausbringen weiter zu erhöhen wird heutzutage oft zusätzlich mit Zentrifugen gearbeitet, die PGMs konzentrieren, die nicht in Kupfer- oder Nickelmineralen vorliegen, sondern als PGM-Mineralen oder PGM-Legierungen. Eine Möglichkeit zur Wassereinsparung wäre der Einsatz von Eindickern oder Filterpressen bei der Ablagerung der Tailings. Der Einsatz von Filterpressen kann die Restfeuchte in den Tailings auf 10 – 20 % verringern, benötigt aber relativ viel Energie.

Das Thema Wasser ist in Südafrika seit einigen Jahren aufgrund ausbleibender Regenfälle zunehmend in den Blick geraten. Da Bergbauaktivitäten mit einem hohen Wasserverbrauch einhergehen und gleichzeitig das Risiko von Wasserverunreinigungen mit sich bringen, steht der Bergbau hier unter besonderer Beobachtung. Das gilt aber nicht nur für die PGM-Minen, sondern auch für den Abbau von Chromit, Gold, Eisenerz und Kohle. MUDD et al. (2009) gehen von einem Wasserbrauch bis zur Konzentratproduktion bei der Untersuchung von zehn Minen in Südafrika von ca. 200 – 600 m³ pro kg PGM aus. Höher aggregierte Zahlen auf Firmenebene bis nach der Verhüttung deuten auf ähnliche Zahlen, da der Hauptwasserverbrauch in der Aufbereitung liegt und

die größten Verluste über die Tailings zustande kommen. Dies deckt sich mit den Nachhaltigkeitsberichten der fünf größten Produzenten von 2020 (Jahresberichte Anglo American, Sibanye, Norilsk, Impala, Northam). HAGAARD et al. (2015) gehen in einer Beispielrechnung für zwei Flotationsanlagen und einer PGM-Hütte von einem Wasserverbrauch von 743 m³ pro kg PGM aus. Dabei entfallen 73 % der Verluste auf die Tailings, die das Wasser über Versickerung und Verdunstung verlieren. Die Autoren gehen weiterhin davon aus, dass die Verluste um 10 % gesenkt werden könnten, wenn die freie Wasseroberfläche mit schwimmenden Gegenständen bedeckt wäre. Das reine Wasserdefizit in einigen Bergbauregionen wird durch die saisonale Verteilung der Niederschläge noch verschärft, denn das Bergwerk benötigt eine gleichbleibende Wasserversorgung, auch in der Trockenzeit, wenn Oberflächenwasser knapp ist und die Grundwasserspiegel sinken.

Die Layered Intrusions aus dem südlichen Afrika und den USA haben einen relativ niedrigen Gehalt an Sulfidmineralen, die zusätzlich noch so komplett wie möglich aus dem Erz ins Konzentrat überführt werden, weil sie die Träger der PGMs sind. Entsprechend sind die Tailings sehr schwefelarm und es gehen keine großen Risiken hinsichtlich einer Sauerwasserbildung (acid mine drainage) von ihnen aus. Zusätzlich haben die Erze des J-M Reef aus den USA, des Merensky Reefs und des UG2 aus Südafrika ein beträchtliches Neutralisierungspotenzial (USGS 2017). Bei den Cu-Ni-Lagerstätten, die PGMs als Nebenprodukt produzieren (z. B. Sudbury und Norilsk) liegt dagegen sehr sulfidreiches Erz vor, die neben den Wertmineralen auch eine große Menge an Pyrrhotin (FeS) besitzen können. Dieses Pyrrhotin beinhaltet zwar gewissen Mengen an PGMs und Nickel, wird aber mittlerweile bei der Flotation oft gedrückt, das heißt es wird versucht dieses Mineral in die Tailings abzuscheiden und nicht im Konzentrat anzureichern. Das hat zur Folge, dass bei der Verhüttung weniger Schlacke und SO₂ entstehen. Dies senkt einerseits die Kosten, bedeutet aber andererseits ein hohes Säurebildungspotenzial der Tailings. In Kanada (Sudbury) ist es gute Praxis Sulfidminerale vom restlichen Tailingsmaterial zu trennen und separat abzulagern (BGR 2021, Nachhaltigkeitsinformationen Nickel), um eine spätere Säurebildung des Materials zu verhindern. In Russland wird Pyrrhotin weiterhin flotiert und verhüttet, was große SO₂-Emissionen der Hütten mit sich bringt.

Energie und Emissionen

In einer Studie von GLAISTER und MUDD (2010) stellen die Autoren den Energie- und Wasserverbrauch verschiedener PGM-Bergwerke in Südafrika dar. Der

durchschnittliche Energiebedarf pro t Erz liegt dort bei 300 – 600 MJ. Bezogen auf ein kg PGM liegt der Energiebedarf bei ca. 100 – 250 GJ. Bei dem entsprechenden Strommix in Südafrika entspricht dies 25 – 80 t CO_{2eq} pro kg PGM. Die resultierende Menge CO₂ – durch den Einsatz von Strom bei der Aufmahlung, der Verhüttung und der Raffination ist in Südafrika relativ hoch, da die Energieproduktion zu 90 % auf der Verstromung von Kohle basiert (IEA 2020). Durch den Einsatz von regenerativen Energien ließe sich der CO₂ Ausstoß deutlich reduzieren. Die Daten von GLAISTER und MUDD (2010) sind mit denen aus den Nachhaltigkeitsberichten der größten PGM-Produzenten von 2019 vergleichbar, da die Prozesse nahezu gleichgeblieben sind. Erreichte Effizienzgewinne sind durch leicht gesunkene Gehalte und den größeren Einsatz an Material aus dem UG2 (höherer Chromitgehalt und geringerer Schwefelgehalt erfordern höheren Energieeinsatz) ausgeglichen worden. Grundsätzlich ist ein Vergleich der Daten verschiedener Quellen oft schwierig, weil sich der dort angegebene Energieeinsatz und Wasserverbrauch nicht immer auf das gleiche Produkt beziehen (Konzentrat, Matte, raffinierte PGMs).

Der direkte CO₂-Verbrauch in den Bergwerken resultiert in erster Linie aus dem Kraftstoffeinsatz. Den wesentlich größeren Einfluss auf die CO₂ Emissionen hat allerdings die indirekte CO₂ Emission aus dem Einsatz von elektrischer Energie, die besonders beim Aufmahlen des Erzes und dem Einschmelzen der Konzentrate benötigt wird. Aus den Nachhaltigkeitsberichten der Firmen Impala Platinum und Sibanye-Stillwater von 2019 geht hervor, dass nur gut 10 % des CO₂ Ausstoßes auf direkte Prozesse, also hauptsächlich den Bergbau, zurückzuführen sind.

Südafrika plant eine CO₂-Steuer einzuführen, mit der ab 2023 die Produktion von CO₂ verteuert wird. Die Kosten des CO₂-Ausstoßes steigen dann in einem Zeitraum bis 2030 an. Ziel ist die Verringerung des Ausstoßes, um die Klimaziele zu erreichen. Es bleibt abzuwarten, inwieweit es den Unternehmen gelingt, alternative Energiequellen zu etablieren oder die Effizienz zu erhöhen und somit ihren Ausstoß zu verringern. Für die Verhüttung der sulfidischen Konzentrate in Russland wird generell deutlich weniger Energie/CO₂ aufgewendet, weil hier die Energie durch den Schwefel bereits im Konzentrat vorhanden ist.

Eine weitere Schadstoffquelle bei der Verarbeitung der PGM-Konzentrate tritt bei der Verhüttung in Form von SO₂-Emissionen der sulfidhaltigen Konzentrate auf. Die gesamte PGM-Industrie in Südafrika stößt bei der Verhüttung ca. 60.000 t SO₂ pro Jahr aus, allerdings kommt zusätzlich etwa die gleiche Menge aus

indirekten Emissionen durch den Einsatz elektrischer Energie hinzu. Neben der PGM-Industrie gibt es noch weitere SO₂-Verursacher in Südafrika, hier ist vor allem die Stromerzeugung aus Kohle zu nennen, die alleine in Kriel (Kraftwerksanlage von Eskom, Südafrika) 700.000 t SO₂ pro Jahr ausstößt. (GREENPEACE 2019)

Bei der Verhüttung der Konzentrate der US Minen Stillwater/East Boulder wird nach Angaben des USGS (2017) eine Rauchgasentschwefelungsanlage mit Gipsproduktion eingesetzt, die 99,8 % des SO₂ aus dem Abgas entfernt. Dieser kann sogar als Beiprodukt gewertet werden, denn der Gips wird an lokale Bauern als Bodenzusatz verkauft.

Am grundlegenden Prozess der Verhüttung von PGM-haltigen Konzentraten aus den bekannten Layered Intrusions wird sich auf absehbare Zeit nichts ändern, außer dass evtl. speziell auf die Verhüttung von Konzentraten mit einem geringen Schwefelgehalt und hohen Chromgehalten (UG2) ausgelegte Verfahren verstärkt zum Einsatz kommen. Damit verbunden sind höhere Prozesstemperaturen und entsprechend der Einsatz von mehr elektrischer Energie. Es gilt also besonders in Südafrika nicht nur bei der Konvertierung und der Entfernung von Schwefeldioxid aus diesen Abgasen, sondern auch beim Strommix anzusetzen, um die SO₂ Emissionen und die CO₂-Emissionen zu verringern.

Bei der Verhüttung von Ni- und Cu-Konzentraten, die z. B. in Sudbury, Kanada, und Norilsk, Russland, gewonnen werden, entstehen sehr große SO₂- Emissionen die um ein vielfaches größer sind, als bei der Verarbeitung von PGM-Konzentraten, da der Schwefelgehalt und die durchgesetzten Mengen deutlich größer sind. Während in Kanada heutzutage eine sehr effiziente Abgasreinigung mit nachgeschalteter Schwefelsäureproduktion besteht, ist Norilsk Nickel der weltweit größte Emittent von SO₂. Aus dem Nachhaltigkeitsbericht von Nornickel geht hervor, dass die Hütten von Norilsk im Jahr 2018 fast 1,9 Mio. t SO₂ an die Umwelt abgegeben haben. Das Abgas stammt zwar aus der Verhüttung von Nickel und Kupfer, aber diese Konzentrate enthalten einen bedeutenden Anteil vor allem an Palladium (2019 fast 100 t). Eine Zuordnung der Emissionen zu den Produkten nach Wert, wie dies bei Mehrproduktprozessen bei Ökobilanzen üblich ist, würde der PGM-Produktion bei Nornickel einen Anteil von 40 % an den Emissionen (2019) zuschreiben. Dies entspräche gut 8 t SO₂ pro kg Palladium. Bei den südafrikanischen Produzenten liegt die Emission im Bereich von 0,2 bis 0,6 t SO₂ pro kg PGM. Nornickel plant allerdings den SO₂ Ausstoß bis 2025 um über 85 % zu reduzieren (auf rechnerisch 1,25 t pro kg). Die Firma läge dann immer noch über

den Emissionen aus Südafrika, allerdings zumindest in der gleichen Größenordnung.

4.2 Soziale und sozioökonomische Bedeutung

Der PGM-Sektor ist vom Produktionswert her der wichtigste Bereich der Bergbauproduktion mineralischer Rohstoffe (abgesehen von Kohle) in Südafrika. Der Wert der Palladiumproduktion hat aufgrund deutlich gestiegener Preise in den letzten Jahren erstmals den Wert der Platinproduktion erreicht und diesen im Jahr 2020 übertroffen. Die südafrikanische Bergbauvereinigung (CHAMBER OF MINES 2018) gibt an, dass 2017 ca. 175.000 Menschen direkt im PGM-Abbau und der Verarbeitung beschäftigt waren. Deutlich mehr als im zweitgrößten Bergbausektor, der Goldindustrie mit rund 110.000 Beschäftigten. Besonders der Untertageabbau der dünnen PGM-führenden Horizonte ist arbeitsintensiv. Aufgrund der Teufen von einigen 100 m sind die Arbeitsbedingungen allerdings nicht so hart, wie im Goldbergbau, wo in einigen 1.000 m Teufe sehr hohe Temperaturen herrschen. In früheren Jahrzehnten waren Staublungen (Silikose) ein verbreitetes Problem bei Beschäftigten in Untertagebetrieben. Dieses Problem tritt so heute aufgrund eines verbesserten Arbeitsschutzes kaum noch auf. Trotzdem kommt es in den PGM-Bergwerken jedes Jahr zu tödlichen Unfällen. Die Anzahl ist allerdings auf alle Bergbausektoren Südafrikas gerechnet von über 700 Toten pro Jahr Ende der 1980er Jahre (LEGER 1991) auf heute deutlich unter 100 Tote pro Jahr gesunken. Im Jahr 2020 kamen im gesamten südafrikanischen Bergbau 60 Menschen ums Leben, 16 davon im PGM-Sektor (MINERALS COUNCIL SOUTH AFRICA 2021). Dies ist absolut gesehen immer noch ein relativ hoher Wert. Da der PGM-Bergbau in Südafrika allerdings durch geringmächtige Erzlagen und eine damit verbundene hohe Arbeitsintensität gekennzeichnet ist, ist es sinnvoll, die Daten ins Verhältnis zu den geleisteten Arbeitsstunden zu setzen. Im Jahr 2019 lag die Anzahl der tödlichen Unfälle bei 0,3 pro 1 Million Arbeitsstunden. Ein historischer Tiefstwert, vergleichbar etwa mit dem Wert von Chile und nur leicht über dem Durchschnittswert der ICMM Mitglieder (ICMM 2018).

Seit einigen Jahren findet ein Strukturwandel im PGM-Sektor statt. Zum einen wird angestrebt den Untertagebetrieb durch modernere Bohr- und Ladetechnik sowie Automatisierungen weniger arbeitsintensiv zu gestalten. Und zum anderen hat Anglo American Platinum mit dem Tagebau Mogalakwena das heute produktivste Bergwerk mit einer Produktion von über 30 t PGMs. Diese Menge wird von ca. 3.000 Mitarbeitern gefördert und aufbereitet, wogegen im Raum Rustenberg

15.000 – 20.000 Arbeiter für die gleiche PGM-Produktion beschäftigt werden. Dies hat zur Folge, dass besonders gering qualifizierte Arbeiter weniger Beschäftigung in neuen Bergwerken finden und bei der Modernisierung bestehender Betriebe ihre Arbeit verlieren. Wie sich die Situation durch die seit 2018 deutlich gestiegenen PGM-Preise weiterentwickelt, ist schwer vorherzusagen. Neue Bergwerke, die besonders im Platreef, also im nördlichen Bereich des Bushveldkomplexes entstehen, werden auf jeden Fall eine deutlich höhere Produktivität und damit weniger Beschäftigte haben, als die alten Bergwerke, unabhängig davon, ob sie im Tagebau oder Untertageabbau betrieben werden.

Ende 2014 gingen die Beschäftigten von Anglo American Platinum, Impala Platinum und Lonmin in einen unbefristeten Streik, weil sie eine Verdoppelung ihres Lohns forderten. Die zu diesem Zeitpunkt aufgrund gefallener Platinpreise stark unter Kostendruck stehenden Unternehmen lehnten diese Forderungen ab, was dazu führte, dass der Streik 150 Tage anhielt. Die Unternehmen produzierten in diesem Zeitraum daher fast 30 t weniger PGMs. Das Ergebnis sah deutliche Lohnerhöhungen über drei Jahre vor, war jedoch weit von der geforderten Verdoppelung der Gehälter entfernt. Bereits 2012 kam es bei einem 42 Tage andauernden Streik bei Lonmin (Bergwerk Marikana) zu gewalttätigen Übergriffen der Polizei, bei denen 34 Arbeiter von der Polizei erschossen wurden. Dies hatte zur Folge, dass unter anderem BASF, das einen großen Anteil der Produktion von Lonmin aufkauft und daraus Katalysatoren herstellt, ebenso wie Abnehmer dieser Katalysatoren, z. B. VW, Daimler und BMW, unter anderem von der Organisation „Brot für die Welt“ scharf kritisiert wurden. Da sie weiterhin Platin von Lonmin kauften und verarbeiteten, wurde ihnen vorgeworfen, dass sie die Anforderungen des „Nationalen Aktionsplans Wirtschaft und Menschenrechte“ verfehlten (u. a. BROT FÜR DIE WELT 2018).

4.3 Governance

Die Governance Indikatoren der Weltbank (WORLD BANK 2021) werden vielfach als Indikator für die Qualität der Regierungsführung eines Landes herangezogen. Dabei liegen die Spannbreiten zwischen -2,5 („poor governance“) und +2,5 („good governance“). Da Südafrika (WGI 0,16) und Russland (WGI -0,58) die mit Abstand größten Produzenten von PGM-Metallen sind, stammen damit rund 80 % der Produktion (2019) aus Ländern mit mittlerer bis schwacher Governance.

Wichtige Initiativen, bei denen PGM-Produzenten Mitglied sind, sind ICMM (Anglo American und Sibanye

Stillwater) und TSM (Impala Platinum) ebenso wie IRMA (Anglo American, Norilsk). Anfang 2021 wurde die Unki Mine von Anglo American in Zimbabwe mit IRMA Level 75 zertifiziert. Bei Norilsk handelt es sich um eine bevorstehende Mitgliedschaft, sofern in den nächsten 12 Monaten ein Bergbaubetrieb nach IRMA Kriterien zertifiziert wird.

Aufgrund der Sanktionen gegen Russland wegen des Ukraine-Krieges haben internationale Initiativen russische Firmen von der Liste zertifizierter Produzenten genommen bzw. prüfen dies. Der London Platinum & Palladium Market erlaubt vorerst weiter den Handel mit russischen PGMs. Grundsätzlich ist es aber fraglich, ob Norilsk unter diesen Umständen z. B. IRMA zertifiziert wird und ob oder in welchem Umfang russisches Palladium und Platin dem Weltmarkt zur Verfügung stehen. Nicht nur aufgrund von Sanktionen, sondern auch wegen zu zu erwartender Einwände von Endverbrauchern. Momentan ist die Mitgliedschaft von Norilsk bei IRMA "pausiert".

Für die weiterverarbeitenden Betriebe, Hütten und Scheideanstalten, sowie Goldschmiede und Edelmetallhändler ist insbesondere der Responsible Jewellery Council (RJC) von Bedeutung, der eine Zertifizierung vom Bergbau bis zum Endkunden ermöglicht. Zertifiziert werden hier vor allem Scheideanstalten auf die Einhaltung von Umwelt-, Sozial- und Governance-Standards (ESG) nach dem RJC Code of Practices (RJC 2019). Es sind zwar keine Bergbaubetriebe nach RJC Standards zertifiziert, RJC erkennt aber die Zertifizierung nach ICMM an und umgekehrt. Außerdem ist der TSM Standard von ICMM als äquivalent eingestuft. Der RJC Standard ist bei PGMs auch über die Lieferkette mit der Chain of Custody (CoC) abgedeckt, sofern z. B. eine Scheideanstalt oder ein Juwelier über RJC zertifiziert ist. Nach dem CoC Standard wird die Transparenz der Lieferkette geprüft, auch hinsichtlich einer legitimen und konfliktfreien Herkunft (entsprechend OECD, 2016). Mitglied beim RJC sind über 100 Gold- und PGM-Scheideanstalten und Edelmetall-Händler und mehrere Hundert Juweliere, Uhren- und Edelmetallverarbeiter, die relativ nahe am Endkunden sind. Für die meisten dieser über 100 Mitglieder ist Gold das Haupthandels- oder Verarbeitungsprodukt, viele handeln aber auch mit PGMs oder verarbeiten diese. Für den primären Sektor ist neben ICMM und TSM auch die London Platinum & Palladium Market (LPPM) eine wichtige Vereinigung. Hier sind nicht nur bedeutende Scheideanstalten, sondern auch die primären Produzenten, wie Impala Platinum, Rustenburg Platinum Mines (Anglo American) und Sibanye-Stillwater und Norinickel (über Gulidov Krasnoyarsk) vertreten. Am 08.02.2022 hat die LPPM erklärt weiterhin russische PGMs zu handeln. Weitere

Mitglieder der LPPM sind auch wichtige Metallverarbeiter und Produzenten von Katalysatoren wie Johnson Matthey, BASF und japanische Betriebe. Die LPPM hat seit 2020 einen Standard für verantwortungsvolle Gewinnung (Responsible Platinum/Palladium Guidance; LPPM 2021), der die Leitlinie für die Sorgfalt der Hütten ist und sich auf die OECD Standards für Rohstofflieferketten aus Konflikt- und Hochrisikogebieten bezieht (OECD, 2016). Die LPPM weist darauf hin, dass es sich hierbei um einen Minimum-Standard handelt.

5 QUELLENACHWEIS

ANGLO AMERICAN PLATINUM LIMITED (2020): Annual Results 2019. 136 S. Johannesburg. URL: <https://www.angloamericanplatinum.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group/Platinum/press-releases/2020/annual-results-booklet-2019.pdf> [Stand: 09.03.2021].

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2020): Kupfer- Informationen zur Nachhaltigkeit. – 17 S. Hannover. – URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kupfer.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 30.06.2021].

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2021): Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff.; Hannover. [Stand: 07.07.2021].

BOSSI, T., GEDIGA, H., (2017): The Environmental Profile of Platinum Group Metals. – Johnson Matthey Technology Review, 61(2), 111-121.

BRAIN BIOTECH (2022): Nachhaltige Metallgewinnung in der Kreislaufwirtschaft. URL: <https://www.brain-biotech.com/de/bioextractor> [Stand: 11.03.2022].

BROT FÜR DIE WELT (2018): Edles Metall – Unwürdiger Abbau. Analyse 75. S. 36. – Berlin. URL: https://www.brot-fuer-die-welt.de/fileadmin/media-pool/2_Downloads/Fachinformationen/Analyse/Analyse75-de-v10-Web.pdf. [Stand: 05.05.2021].

CULLEN, D.A., NEYERLIN, K.C., AHLUWALIA, R.K., MUKUNDAN, R., MORE, K.L., BORUP, R.L., WEBER, A.Z., MYERS, D.J., KUSOGL, A. (2021): New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation. – Nature Energy, 6, 462–474.

GLAISTER, B.J., MUDD, G.M. (2010): The environmental costs of platinum – PGM mining and sustainability: Is the glass half-full or half-empty? – Minerals Engineering, 23, 438-450.

- GREENPEACE (2019): Global SO₂ Emission Hotspot Database. S. 39. URL: https://www.green-peace.org/static/planet4-africa-stateless/2019-/08/5f139f4c-final-global-hotspot-and-emission-sources-for-so2_19th_august-2019.pdf [Stand: 30.08.2021].
- HAGAARD, E.L.; SHERIDAN, C. M., HARDING, K. J. (2015): Quantification of water usage at a South African platinum processing plant. – *Water SA*, 41(2), 279-286.
- HEDRICH, S., KRAEMER, D., JUNGE, M., MARBLER, H., BAU, M., SCHIPPERS, A. (2020): Bioprocessing of oxidized platinum group element (PGE) ores as pre-treatment for efficient chemical extraction of PGE – *Hydrometallurgy*, 196, 105419. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105419>
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY ASSOCIATION (2019): South Africa Energy Outlook. URL: <https://www.iea.org/articles/south-africa-energy-outlookv> [Stand: 05.05.2021].
- IMPALA PLATINUM HOLDINGS LTD. (2020): Sustainability Development 2019. S. 127. Johannesburg. – URL: <https://www.implats.co.za/pdf/annual-reports/ann-ual-integrated-report/2019/sustainable-development-report-2019.pdf> [Stand: 05.05.2021].
- INDWEDE (2018): Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. - 201 S., Berlin – URL: <https://www.ipa.fraunhofer.de/content-/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/-Studie-IndWEDE.pdf> [Stand: 15.06.2020].
- JOHNSON MATTHEY (2020): PGM Market Report May 2020. – 44 S. London. URL: <http://www.platinum.matthey.com/documents/new-item/pgm-market-reports/pgm-market-report-may-2020.pdf> [Stand: 05.05.2021].
- JONES, T.R. (2002): ConRoast:- DC arc smelting of dead-roasted sulphide concentrates. – 3rd International Sulfide Smelting Symposium (Sulfide Smelting '02), Seattle, USA.
- JONES, T.R. (2005): An overview of South African PGM smelting. Nickel and Cobalt 2005: Challenges in Extraction and Production. – 44th Annual Conference of Metallurgists, Calgary, Canada: S.147–178.
- LEGER, J.P. (1991): Trends and Causes of fatalities in South African mines. – *Safety Science*, 14(3-4), 169-185. [16.03.2021].
- LPPM – LONDON PLATINUM AND PALLADIUM MARKET (2021): Responsible Platinum/Palladium Guidance – Version 3. URL: <https://www.lppm.com/files/lppm-rpp-guidance-v3-200421.pdf> [Stand: 07.10.2021].
- MINERALS COUNCIL SOUTH AFRICA (2018): Mine SA 2017 Facts and figures Pocketbook. URL: <https://www.mineralscouncil.org.za/industry-news/publications/facts-and-figures>. [Stand 10.11.2021]
- MINERALS COUNCIL SOUTH AFRICA (2021): Safety in the Mining Industry: Performance at a glance. URL: <https://www.mineralscouncil.org.za/industry-news/publications/fact-sheets> [Stand 10.11.2021].
- MUDD, G.M.; GLAISTER, B.J. (2009): The Environmental Costs of Platinum-PGM Mining: An Excellent Case Study in Sustainable Mining. – Proceedings of the 48th Annual Conference of Metallurgists, Canadian Metallurgical Society, Sudbury, Ontario, Canada, August 2009.
- NORNICKEL (2020): Sustainability Report 2019. S. 311. Moskau. URL: https://www.nornickel.com/files/en/CSOpdf/NN2019_Digital_ENG.pdf [Stand: 09.03.2021].
- NORTHAM PLATINUM LTD. (2020): Solid Sustainable Growth. Annual Integrated Report 30 June 2020. S. 86. Johannesburg. – URL: <https://www.invicomm.com/assets/projects/northam-platinum/northam-playtinum-annual-report-2019.pdf> [Stand: 09.03.2021].
- OECD (2016) OECD due diligence guidance for responsible supply chains of minerals from conflict-affected and high-risk areas: Third edition. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). URL: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264252479-en>.
- RJC – RESPONSIBLE JEWELLERY COUNCIL (2019) Code of Practices Standard. URL: <https://www.responsible-jewellery.com/wp-content/uploads/RJC-COP-2019-V1-1-Standards-2.pdf> [Stand: 01.10.2021].
- S&P GLOBAL MARKET INTELLIGENCE (2021): SNL Metals & Mining Data – kostenpflichtige Datenbank; New York [Stand: 01.06.2021].
- SIBANYE STILLWATER (2020): Integrated Report 2019. 264 S. Johannesburg. URL: <https://reports.sibanyestill-water.com/2019/download/SSW-IR19.pdf> [Stand: 16.03.2021].
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2017): Platinum-Group Elements. Professional Paper 1802-N. S. 106 – Reston. URL: <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/n/pp1802n.pdf> [Stand: 12.05.2020].

WORLD BANK (2020) World DataBank – URL: <http://info.worldbank.org/governance/wgi/> [Stand: 04.05.2020].

WAN, X., LIU, X., SHUI, J. (2020): Stability of PGM-free fuel cell catalysts: Degradation mechanisms and mitigation strategies. – Progress in Natural Science: Materials International, 30(6), 721-731.

SIEVERS, G.W., JENSEN, A.W., QUINSON, J., ZANA, A., BIZOTTO, F., OEZASLAN, M., DWORZAK, A., KIRKENS- GAARD, J.J.K., SMITSHUYSEN, T.E.L., KADKHODAZADEH, S., JIELSHOLT, M., JENSEN, K.M.O, ANKLAM, K., WAN, H., SCHÄFER, J., CEPE, K., ESCUDERO-ESCRIBANO, M., ROSSMEISL, J., QUADE, A., BRÜSER, V., ARENZ, M. (2020) Self-supported Pt–CoO networks combining high specific activity with high surface area for oxygen reduction. – Nature Materials, 20, 208–213.

IMPRESSUM

Herausgeber:

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe
Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit
Stilleweg 2
30655 Hannover

E-Mail: mineralische-rohstoffe@bgr.de
www.bgr.bund.de

Autor:

Malte Drobe

Layout:

Jolante Duba

Titelfoto:

© 73201174 Shutterstock ppart, 2014

Stand:

Februar 2022

DOI:

10.25928/nafs-nr51