



**ColorSol -
Nachhaltige
Produktinnovationen
durch Farbstoffsolarzellen**

Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle - Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffs

Bericht aus dem BMBF-Forschungsprojekt ColorSol®

Andreas Lutz
Daniel Heubach
Claus Lang-Koetz

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation

Juli 2007



Fraunhofer Institut
Arbeitswirtschaft und
Organisation

ColorSol wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung in der Fördermaßnahme „Innovationen als Schlüssel zur Nachhaltigkeit in der Wirtschaft (Fkz: 01 RIO 5211)

Weitere Informationen finden sich im Internet unter www.colorsol.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Platingruppenmetalle	8
2.1	Allgemeines zu den Platingruppenmetallen.....	8
2.1.1	Eigenschaften	8
2.1.2	Zur Datensituation und Begriffserklärung	8
2.2	Vorkommen.....	9
2.3	Gewinnung und Darstellung.....	10
2.3.1	Primärgewinnung	10
2.3.2	Sekundärgewinnung	13
2.3.3	Trennung und Überführung in Metall	14
2.4	Verwendung und Nachfrage	15
2.5	Preisentwicklung.....	18
2.6	Zukünftige Entwicklung.....	22
2.6.1	Platin	22
2.6.2	Palladium und Rhodium.....	23
3	Ruthenium	24
3.1	Allgemeines	24
3.2	Vorkommen und Gewinnung	24
3.3	Verwendung.....	27
3.4	Nachfrage und Primärproduktion	28
3.5	Preise.....	29
3.6	Einfuhr nach Deutschland und Handelsform	32
3.7	Zukünftige Entwicklung.....	32
4	Umweltrelevanz des Rohstoffes und des Farbstoffes	34
4.1	Umweltrechtliche/ -politische Anforderungen, gesellschaftliche Akzeptanz	34
4.1.1	Ruthenium.....	34
4.1.1.1	Kennzeichnung von Ruthenium.....	34
4.1.1.2	TA Luft.....	34
4.1.1.3	TEEL-Wert	35

4.1.1.4	Weitere Grenzwerte/ Gefahrstofflisten.....	35
4.1.2	Ruthenium-Farbstoff N-3	35
4.2	Gefährdungs-/ Störfallpotenzial	35
4.2.1	Ruthenium.....	36
4.2.2	Ruthenium-Farbstoff N-3	36
4.3	Umweltwirkungen auf vor- und nachgelagerten Stufen	38
4.4	Erschöpfung nicht-regenerativer/regenerativer Ressourcen .	38
4.4.1	Grundlagen Ressourcenverbrauch / Materialintensität.....	38
4.4.2	Abschätzung der Materialintensität des Ruthenium-Rohstoffes	38
4.4.2.1	Zur Aussagekraft der Ergebnisse	38
4.4.2.2	Bilanzergebnisse für Südafrika	39
4.4.2.3	Allokation der Bilanzergebnisse.....	39
4.4.2.4	Ergebnis	41
4.4.3	Interpretation der Ergebnisse.....	42
4.4.4	Gegenüberstellung von Verfügbarkeit und erwartetem Mengenbedarf.....	42
5	Fazit	44
5.1.1	Rohstoffverfügbarkeit und Preis.....	44
5.1.2	Umweltwirkung.....	45
6	Zusammenfassung der wichtigsten Daten	47
7	Informationsbeschaffung	48
8	Literatur.....	49
9	Anhang	52
9.1	Allokation für Südafrika	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Begriffliche Zusammenhänge bei Produktion und Nachfrage	9
Abbildung 2:	Anteil der Edelmetalle am Erzgehalt im Merensky- und UG2-Reef (Implats 05).....	10
Abbildung 3:	Primärgewinnung und Aufbereitung der PGM aus sulfidischen Erzvorkommen (Degussa 95)	12
Abbildung 4:	Fördermengen und Herkunftsregionen von Platin, Palladium und Rhodium (Johnson Matthey)	13
Abbildung 5:	Trennung der Platingruppenmetalle (Greenwood et al. 1990).....	15
Abbildung 6:	Entwicklung der Nachfrage nach Platin, Palladium und Rhodium nach Einsatzgebieten (Johnson Matthey)	17
Abbildung 7:	Entwicklung des Preises sowie der Primärproduktion und der Nettonachfrage von Platin (Johnson Matthey).....	19
Abbildung 8:	Entwicklung des Preises sowie der Primärproduktion und der Nettonachfrage von Rhodium (Quelle: Johnson Matthey)	20
Abbildung 9:	Entwicklung des Preises sowie der Primärproduktion und der Nettonachfrage von Palladium (Quelle: Johnson Matthey)	22
Abbildung 10:	Überführen des Rutheniums in Metall, ausgehend von der PGM-Trennung (Greenwood et al 1990)	26
Abbildung 11:	Einsatzgebiete von Ruthenium (Johnson Matthey)	27
Abbildung 12:	Entwicklung des Rutheniumpreises und der Nettonachfrage	31
Abbildung 13:	Vergleich einiger relevanter MI-Werte der FSZ	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Charakteristische Erzgehalte der PGM sowie von Nickel und Kupfer in den großen Förderländern (Hochfeld 97)	11
Tabelle 2:	Bedeutung der Edelmetalle in ihren Einsatzfeldern (Hagelüken et al. 2005)	16
Tabelle 3:	Durchschnittliche Erzgehalte und Anteile der einzelnen PGM + Gold des Merensky-Reefs und des UG2-Reefs in Südafrika (auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Implats 05).....	29
Tabelle 4:	Bezeichnungsstandards für Ruthenium	34
Tabelle 5:	Bilanzergebnisse in Bezug auf die Herstellung eines Kilogramms PGM (Hochfeld 97)	39
Tabelle 6:	Berechnung der Allokationsfaktoren.....	40
Tabelle 7:	Materialintensitätswerte für die Herstellung von 1000 FSZ-Modulen der Größe 60cm * 100 cm; Eigene Berechnung auf Basis der Daten aus (Seuffert 2006) und (WI 2003)	42
Tabelle 8:	Zusammenfassung der wichtigsten Daten, bezogen auf das Jahr 2005	47
Tabelle 9:	Allokation für Südafrika	52

Abkürzungsverzeichnis

Ag	Silber
Au	Gold
Cu	Kupfer
CuSO ₄	Kupfersulfat
FSZ	Farbstoffsolarzelle
Fe	Eisen
g	Gramm
HNO ₃	Salpetersäure
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
Ir	Iridium
MAIA	Materialintensitätsanalyse
MI	Materialintensität
MIT	Auf Gewichtseinheit bezogener MI-Wert → oft bei Rohstoffen verwendet
MIPS	Auf "Service-Einheit" bezogene Materialintensität → Material input per service
N-3	cis-di(thiocyanato)-N, N'-bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)Ru(II)
NaOH	Natronlauge
Ni	Nickel
O ₂	Sauerstoff
Os	Osmium
oz	ounce troy

Pd Palladium
PGM Platingruppenmetallen
ppm..... Parts per Million
Pt Platin
Rh Rhodium
Ru Ruthenium
t..... Tonnen
TEEL..... Temporary Emergency Exposure Limit
TRGS..... Technische Regeln für Gefahrstoffe

1 Einleitung

Im Projekt ColorSol – *Nachhaltige Produktinnovationen durch Farbstoffsolarmzellen* wird die Farbstoffsolarmzellentechnologie weiter entwickelt, um bestehende Anwendungsfelder zu erweitern, neue Anwendungsfelder zu erschließen und eine verbesserte energetische Amortisationszeit zu erreichen.

Der Ruthenium-Farbstoff *cis*-di(thiocyanato)-N, N'-bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)Ru(II) – im weiteren N-3 genannt - ist ein essentieller Bestandteil von Farbstoffsolarmzellen. Im Folgenden werden die Verfügbarkeit des Rohstoffes Ruthenium, dessen Auswirkungen auf die Umwelt sowie die potenziellen Umweltwirkungen des Ruthenium-Farbstoffs auf der Basis einer Literaturstudie näher untersucht.

Da Ruthenium ein seltenes Metall ist und den Platingruppenmetallen zugeordnet, wird zunächst ein Überblick über diese Metalle gegeben und dann auf Vorkommen, Gewinnung, Verwendung und Nachfrage von Ruthenium eingegangen. Schließlich werden die potenziellen Umweltwirkungen des Ruthenium-Farbstoffs und des Rohstoffes Ruthenium betrachtet.

2 Platingruppenmetalle

2.1 Allgemeines zu den Platingruppenmetallen

2.1.1 Eigenschaften

Ruthenium (Ru) gehört zusammen mit Platin (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh), Iridium (Ir), und Osmium (Os) zu den Platingruppenmetallen (PGM), gemeinsam mit Gold (Au) und Silber (Ag) zählen sie zu den Edelmetallen. Diese sind sehr selten und werden aufgrund ihrer herausragenden chemischen und physikalischen Eigenschaften in vielen Anwendungen, wie z.B. in der Automobil- und Chemieindustrie, eingesetzt.

Allen Platinmetallen gemeinsam sind hohe Dichten und hohe Schmelztemperaturen, sie sind äußerst beständig gegenüber mechanischer Beanspruchung und nur in geringem Maße anfällig für eine thermische Expansion. Sie sind chemisch inert (wenig reaktionsfreudig wegen eines hohen Elektrodenpotentials), praktisch korrosionsfrei und stabil gegenüber Oxidation auch bei hohen Temperaturen und in sauren Medien. Sie zeichnen sich zudem durch sehr ausgeprägte katalytische Eigenschaften, durch eine hohe Vielfalt an Oxidationsstufen und eine Neigung zur Komplexbildung aus. Die Platinmetalle stehen in der 8. Gruppe des Periodensystems (Binnewies et al. 2004, Greenwood et al. 1990, Hagelüken et al. 2005).

2.1.2 Zur Datensituation und Begriffserklärung

Die am häufigsten eingesetzten Elemente der PGM sind Platin und Palladium, gefolgt von Rhodium. Diese haben innerhalb ihrer Einsatzgebiete eine starke bzw. sehr starke Bedeutung (siehe auch Tabelle 2). Die anderen Elemente werden im Vergleich dazu nur in geringem Maße genutzt. Darum konzentrieren sich auch fast alle Studien über Vorkommen, Gewinnung, Nachfrage und Auswirkungen auf den Menschen und die Biosphäre auf die zuerst genannten Elemente Pt, Pd und Rh, über Ru, Ir und Os ist nur wenig veröffentlicht. Also erfordert die Betrachtung von Ruthenium eine Konzentration auf die Gesamtsituation der PGM.

Das Gesamtangebot eines Metalls ergibt sich aus der Summe von Primärproduktion (=Minenproduktion) und Recycling (=Sekundärproduktion). Die Produktionsdaten zur Primärproduktion von Platin, Palladium und Rhodium sind aufgrund einer starken Konzentration auf wenige Minengesellschaften recht leicht erhältlich.

Die Summe aus Nettonachfrage und Sekundärproduktion ergibt die Gesamtnachfrage eines Metalls vgl. Abbildung 1). Im Gegensatz zur Primärproduktion sind zur Nettonachfrage nur wenige und zur Sekundärproduktion, und der damit verbundenen Gesamtangebots- und -nachfragesituation so

gut wie gar keine Statistiken veröffentlicht. Die beste verfügbare Statistik ist der Jahresbericht des Londoner Edelmetallhändlers Johnson Matthey, „Platinum Interims Review“ (vgl. JM 2004 und JM 2005), in diesen Berichten wird grundsätzlich die Primärproduktion und die Nettonachfrage angegeben. Darauf beziehen sich letztlich alle anderen Statistiken zu diesem Thema.

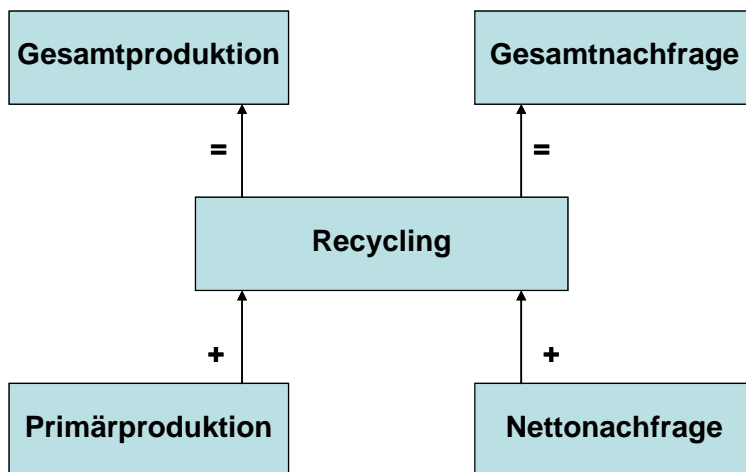


Abbildung 1: Begriffliche Zusammenhänge bei Produktion und Nachfrage

2.2 Vorkommen

Die PGM kommen in der Natur nur in sehr geringen Konzentrationen vor, mit einem durchschnittlichen Gehalt in der oberen Erdkruste von zusammen ca. 0,05g/t. Für einen wirtschaftlichen Abbau muss der Gehalt jedoch um ein vielfaches höher sein – mehr als 1g Platinmetalle pro Tonne Erz.

Grundsätzlich treten die PGM gemeinsam auf, die Gehalte von Platin und Palladium im Erz liegen dabei deutlich über denen von Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium. Letztere sind damit typische Koppelprodukte, die beim Abbau von Platin und Palladium „zwangsläufig“ mit gewonnen werden.

Die Platinerze sind fast ausschließlich zusammen mit Kupfer- und Nickelsulfiden vergesellschaftet, so sind also – je nach Gehalt – Kupfer und Nickel Koppelprodukte des PGM-Abbaus oder aber die PGM sind Koppelprodukte der Kupfer- und Nickelgewinnung. Zudem sind in diesem Zusammenhang oft auch Gold und Silber zu finden.

Die PGM-Vorkommen sind auf wenige Förderländern verteilt. Über 60% der PGM kommen aus dem südafrikanischen Bushveld-Komplex, weitere 25% aus Norilsk in Russland, außerdem besitzen noch Kanada (in Sudbury) und die USA (Stillwater-Komplex) nennenswerte Vorkommen. Diese vier Länder fördern mehr als 99% der PGM - Weltjahresproduktion. Südafrika hält auch

den größten Teil der sicher gewinnbaren Reserven – über 85% (Degussa 1995, DMESA 2002).

Folgende Abbildung 2 zeigt den durchschnittlichen Anteil der Edelmetalle in Gewichtsprozent am durchschnittlichen Erzgehalt der großen Lagerstätten Südafrikas von 7,15g/t.

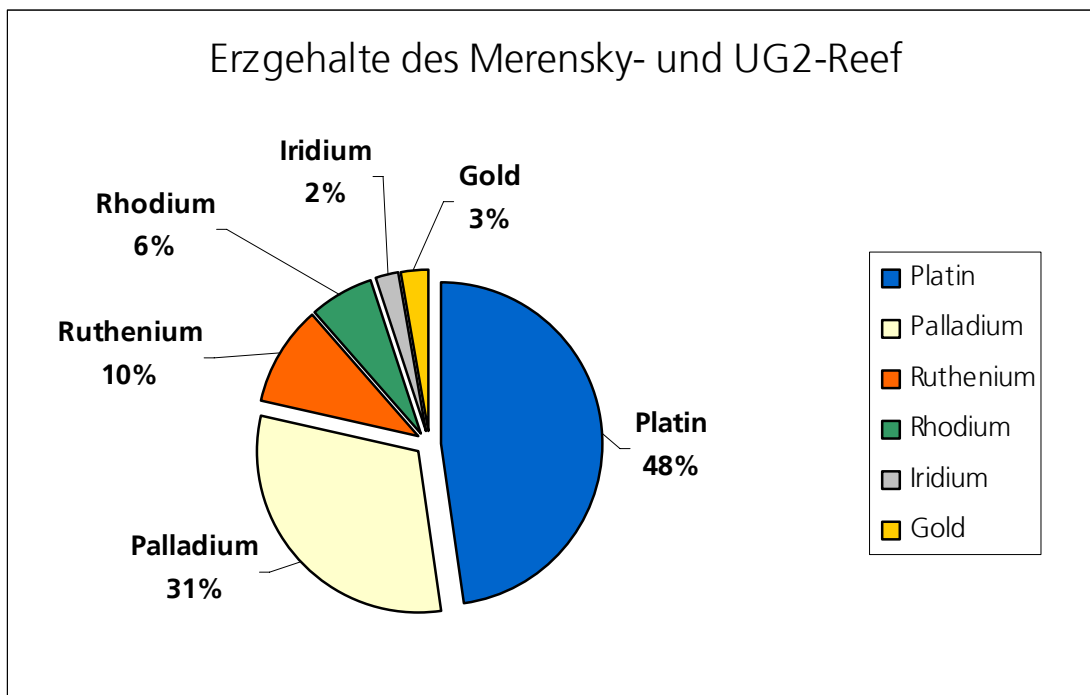


Abbildung 2: Anteil der Edelmetalle am Erzgehalt im Merensky- und UG2-Reef (Implats 05)

2.3 Gewinnung und Darstellung

2.3.1 Primärgewinnung

Die Minenproduktion der PGM erfolgt einerseits aus sulfidischen (mit Schwefel verbundenen) Platinerzen, wie sie für das Merensky-Reef und das UG2-Reef des Bushveld-Komplexes in Südafrika und für den Stillwater-Komplex in den USA typisch sind. Diese werden ausschließlich wegen ihres Gehaltes an PGM und Gold abgebaut, Nickel, Kupfer und Kobalt sind wertvolle Koprodukte (Degussa 1995).

Je nach Lagerstätte ist das Verhältnis der Mengenanteile der Platinmetalle untereinander sehr unterschiedlich, in Südafrika steht vor allem Platin selbst im Vordergrund. In Russland und Kanada fallen die PGM als Nebenprodukt der Nickelgewinnung an. Bei der Aufarbeitung folgen sie im Verhüttungspro-

zess im wesentlichen dem Nickel und werden im Rückstand der Nickellau-
gung angereichert. Der Unterschied dieser Konzentrate zu denen der eigent-
lichen Platinerze des Merensky- und des UG2-Reefs besteht in einem deut-
lich höheren Anteil von Palladium gegenüber Platin und insgesamt wesent-
lich geringere PGM-Gehalte - weniger als 1g/t. Tabelle 1 macht die teilweise
großen Unterschiede der mineralischen Zusammensetzung in den erzfüh-
renden Schichten deutlich (Degussa 1995, Hochfeld 97).

Land	Südafrika				USA		Kanada		Russland ¹	
Lagerstät- te/Intrusion	Bush- veld/Merensky		Bushveld/UG2		Stillwater/J-M		Sudbury		Noril'sk-Talnakh	
Element	Erzge- halt [g/t]	Anteile PGM [%]	Erzge- halt [g/t]	Anteile PGM [%]	Erzge- halt [g/t]	Anteile PGM [%]	Erzge- halt [g/t]	Anteile PGM [%]	Erzge- halt [g/t]	Anteile PGM [%]
Platin	4,82	67,9	3,22	46	6	22,7	0,38	47	2,5	25
Palladium	2,04	28,7	3,24	46,3	20	75,7	0,39	49	7,3	73
Rhodium	0,24	3,4	0,54	7,7	0,21	0,8	0,03	4	0,2	2
Summe Pt,Pd,Rh	7,1	100	7	100	26,21	100	0,8	100	10	100
Gold	0,26	3,7	0,07	1	0,21	0,8	-			
Nickel	2800		1600		<1000			<15000	<30000	
Kupfer	1700		300		<1000			<13000	<40000	

Tabelle 1: Charakteristische Erzgehalte der PGM sowie von Nickel und Kupfer in den großen Förderländern (Hochfeld 97)

Die Erschließung neuer Vorkommen ist langwierig und erfordert, wie der
Aufbau der Verhüttungs- und Raffinationsbetriebe, hohe Investitionskosten.
Die weltweite Förderung ist auf wenige große Minengesellschaften (Anglo
Platinum; Norilsk Nickel; Impala u.a.) konzentriert, die die gesamte Wert-
schöpfungskette vom Bergwerk bis zum Raffinationsbetrieb betreiben und
die PGM bis zum Feinmetall abbilden (Hagelüken et al. 2005).

Die PGM werden meist im Tiefbau unter schweren Bedingungen abgebaut,
Ihr Gehalt beträgt im allgemeinen zusammen 5 – 10g/t (ppm), um 1g PGM
zu erhalten müssen also bis zu 200.000kg Erz gebrochen, zermahlen und
chemisch behandelt werden. Der Aufbereitungsprozess ist in Abbildung 3
dargestellt.

¹ Für Russland nur geschätzte Werte

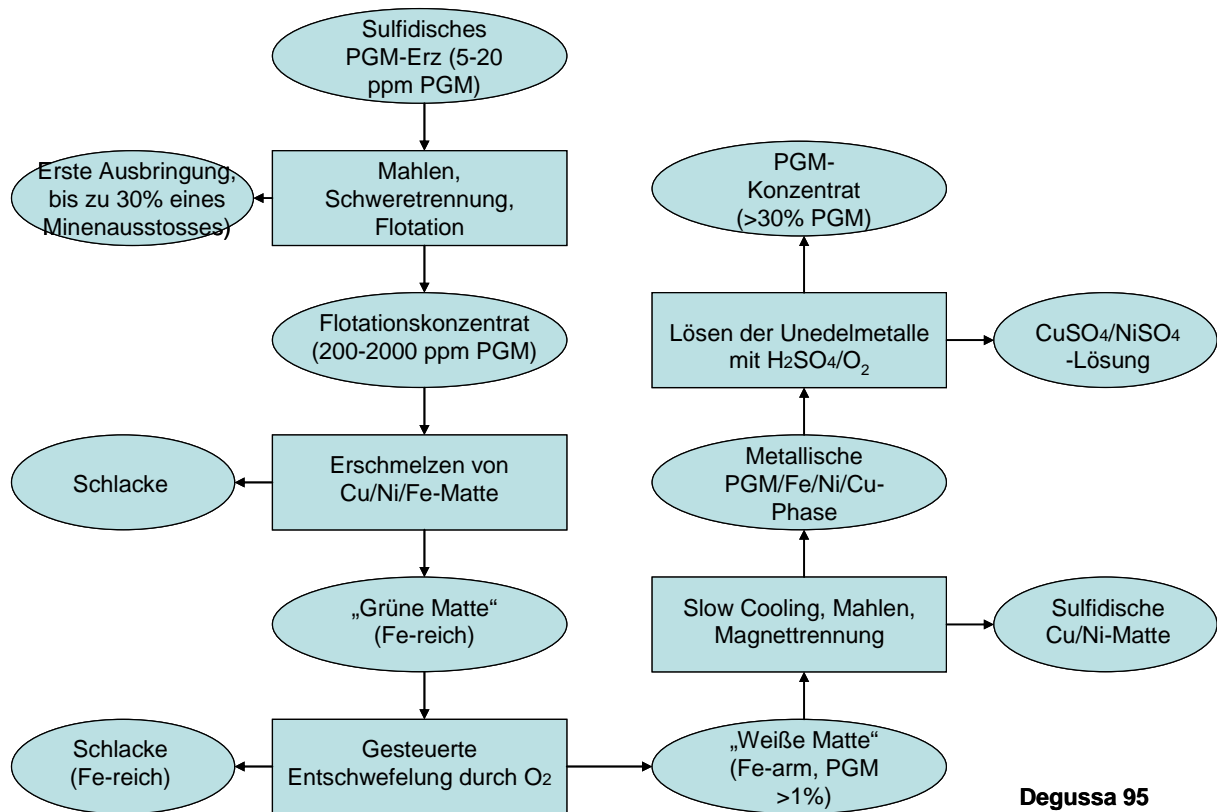


Abbildung 3: Primärgewinnung und Aufbereitung der PGM aus sulfidischen Erzvorkommen (Degussa 95)

Die weltweite Fördermenge betrug 2005 laut Johnson Matthey für Platin ca. 206t, für Palladium ca. 261t und für Rhodium ca. 24t. Zu Ruthenium und Iridium finden sich keine Angaben der Primärproduktion, die Nettonachfrage wird von Johnson Matthey mit 24,5t für Ruthenium und 4t für Iridium beziffert. Es ist zu vermuten, dass die Primärproduktion dieser beiden Metalle um einiges höher liegt, da die jeweiligen Verhältnisse zu Platin im Erzgehalt deutlich über denen der Weltjahresnachfrage liegen (siehe Abbildung 2 und Kapitel 2.4). Diese Vermutung ist genauer ausgeführt im Kapitel 3.4, Nachfrage. Über Osmium sind gar keine Angaben veröffentlicht, es spielt nur eine sehr geringe Rolle.

Dies sind keine großen Mengen, verglichen z.B. mit 2500t/a Gold- oder 18000t/a Silberförderung. Zusammengenommen würde die Weltjahresproduktion der Platinmetalle einen Würfel mit 3,2m Kantenlänge ergeben (JM 2005, GFMS 2006).

Die bekannten Vorräte an Platinmetallen haben Reichweiten von über 100 Jahren,² sind aber noch stärker als die jetzige Minenproduktion auf Südafrika begrenzt. Sie sind mit niedrigeren Erzgehalten und schwierigeren Abbaubedingungen verbunden, was eine höhere Umweltbelastungen bei Gewinnung, Aufbereitung und Verhüttung erwarten lässt (Hagelüken et al. 2005).

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Fördermengen von Platin, Palladium und Rhodium in den letzten zehn Jahren, aufgeteilt auf die Herkunftsregionen.



Abbildung 4: Fördermengen und Herkunftsregionen von Platin, Palladium und Rhodium (Johnson Matthey)³

2.3.2 Sekundärgewinnung

Aufgrund der hohen Edelmetallkurse spielt die Sekundärgewinnung der Platingruppenmetalle in Form von Recycling eine immer größere Rolle. Viele Platinmetalle werden in Katalysatoren der Chemie- und der Kfz-Industrie verwendet. Diese werden in der Regel nach einer gewissen Einsatzdauer

² Die Annahmen, die dieser Prognose zugrunde liegen, sind nicht bekannt. Die Prognose wurde entnommen aus (Hagelüken et al. 2005)

³ Die Angaben sind in angelsächsischer Feinunze, 1 Million ounce troy (oz) entsprechen 31,104t

inaktiv, die Platinmetalle sind aber meist noch vollständig vorhanden. So wurden 2005 schon ca. 25t Pt und ca. 20t Pd aus Autokatalysatoren wieder gewonnen – Tendenz steigend. Außer für den Autokatalysator sind aber keine zuverlässigen statistischen Angaben über die Recyclingmenge und die damit verbundene Bruttonachfrage verfügbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Sekundärproduktion ungefähr auf einer Höhe mit der Primärproduktion liegt, in einer Studie des Öko-Instituts wird z.B. geschätzt, dass die Chemieindustrie 90% ihrer eingesetzten Platinmetalle recycelt. Vor allem in Deutschland wird ein hoher Anteil des verwendeten Platins aus Autokatalysatoren recycelt, laut Öko-Instituts fast 50% (Hagelüken et al. 2005).

Außerdem erfolgt eine Sekundärgewinnung aus Scheidgut (metallischen Rückläufen aus Geräten und Halbzeug) mittels Löseprozessen, sowie aus Gekrätz – nichtmetallische Begleitstoffe werden mittels pyrometallurgischen Prozessen abgetrennt.

Die im Gegensatz zur Primärproduktion große Bandbreite unterschiedlichster Eigenschaften des zu recycelten Materials wie PGM-Konzentration, Materialzusammensetzung und Verunreinigungen erfordert sehr komplexe Verarbeitungsprozesse. Es gibt weltweit nur wenige Sekundärscheidereien, sie haben sich heutzutage hauptsächlich auf bestimmte Recyclingmaterialien spezialisiert. Das Recycling hat aber aufgrund der schwierigen Abbau- und Aufbereitungsbedingungen beim Abbau der Platinmetalle erhebliche ökologische Vorteile gegenüber der Primärproduktion (Hagelüken et al. 2005).

2.3.3 Trennung und Überführung in Metall

Die primär und sekundär gewonnenen Rohmaterialien werden üblicherweise in oxidierenden Säuren, wie z.B. Königswasser, gelöst - als Ausgangspunkt für die nachfolgende Gewinnung der Einzelmetalle. Es existieren zahlreiche firmen- und materialspezifische Trennverfahren, in der Regel lässt sich bei allen Verfahren eine Grobtrennung und eine Feinreinigung⁴ der Metalle unterscheiden. Der Prozess ist in Abbildung 5 dargestellt.

⁴ Diese Feinreinigungsstufe entfällt bei Ruthenium, da das bei der Trennung gewonnene RuO₄ bereits von sehr hoher Reinheit ist. Im Vorgriff auf den Abschnitt Ressourcenverbrauch wird der ohnehin relativ niedrige MIT-Wert von Ruthenium so wohl weiter erniedrigt.

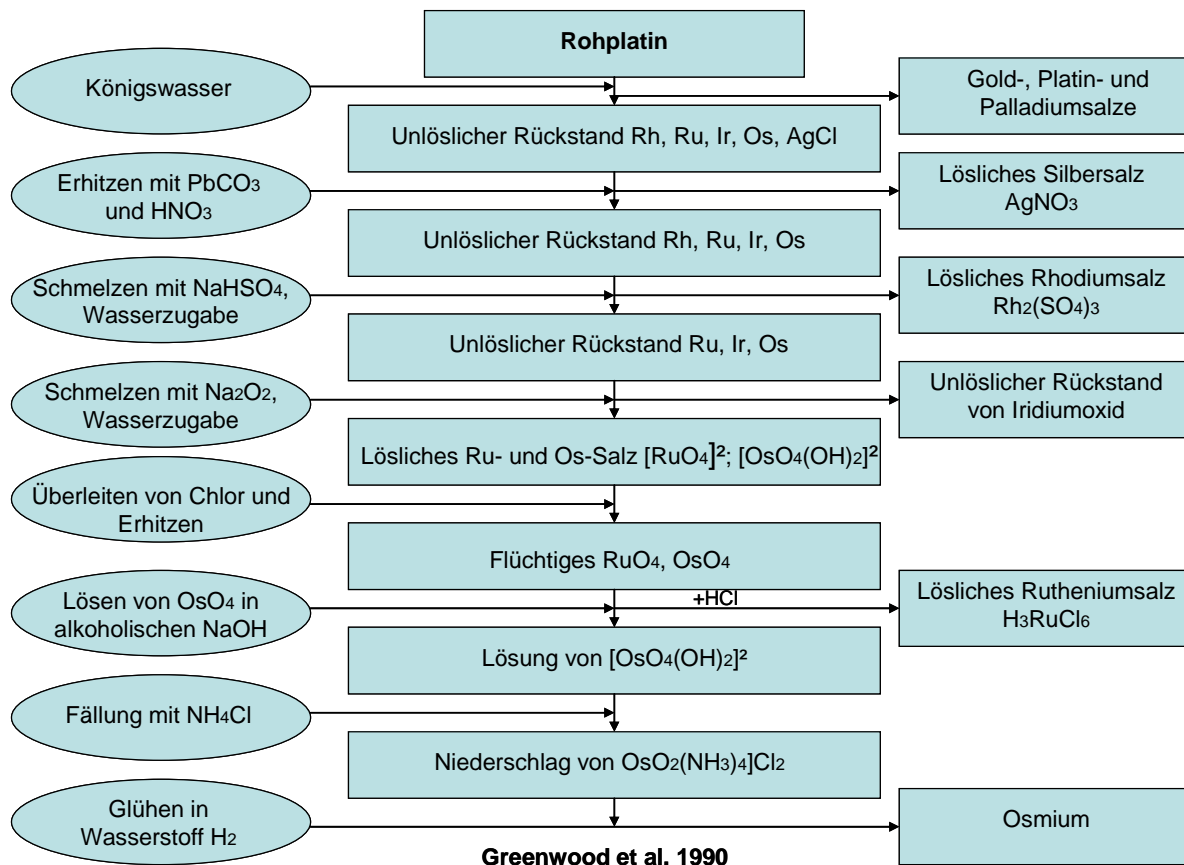


Abbildung 5: Trennung der Platingruppenmetalle (Greenwood et al. 1990)

In den Reinigungsstufen entstehen chemische Verbindungen der Metalle, in aller Regel ist die Handelsform der Platingruppenmetalle aber das Metall selbst. Daher müssen die chemischen Verbindungen in Metall überführt werden, dies geschieht meist durch Reduktion im wässrigen Medium oder durch Calcinationsverfahren. Das zu gewinnende Metall bleibt dabei frei von jeder Beimengung, im Fall von Platin und Palladium entsteht ein aus miteinander verfilzten Kristallen bestehender Schwamm, Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium bleiben in Pulverform zurück (Degussa 1995).

2.4 Verwendung und Nachfrage

Die Platinmetalle – und hier vor allem Platin, Palladium und Rhodium – haben wichtige Einsatzgebiete in industriellen Schlüsseltechnologien besetzt, herauszuheben ist hier vor allem die Verwendung als Katalysator bei der Abgasreinigung von Automobilen. Es sind vor allem ihre guten katalytischen, aber auch besondere elektrische oder oberflächenveredelnde Eigenschaften, die sie in so vielen Einsatzgebieten bedeutend machen. Bei den in Verbrennungsmotoren herrschenden Temperaturen können Schadstoffe nur

in Gegenwart von Platingruppenmetallen umgewandelt werden. In fast allen chemischen Prozessen steckt ein Edelmetall als Katalysator. Die Elektronik- und Elektrotechnikindustrie benutzen Platinmetalle wegen ihrer elektrischen Leitfähigkeit und die Dentalindustrie wegen ihrer Korrosionsbeständigkeit. Zur Herstellung besonders reinen Glases für LCD-Anzeigen benötigt man Rhodium. Dazu kommt die ursprüngliche Verwendung als Schmuck- und Münzmetall aufgrund der Seltenheit, Korrosionsbeständigkeit und Schönheit (Hagelüken et al. 2005).

Folgende Tabelle 2 zeigt die Bedeutung der Edelmetalle innerhalb ihrer Einsatzfelder.

	Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os
Katalyse (Automobil/Chemie)	o	x	xx	xx	x	o	o	o
Schmuck	xx	xx	xx	x	o	o	o	
Dentaltechnik	xx	o	o	x			o	
Elektronik/Elektrotechnik	xx	xx	x	xx	o	o	o	
Dünnschichttechnik	xx	xx	x	x	x	o		
Fotographie		xx						
Löttechnik	x	xx						
Messtechnik			xx		x			
Glasindustrie			xx		x			
Medizintechnik			xx			o	x	o
xx = sehr starke Bedeutung x = starke Bedeutung o = spezielle Verwendung für jeweiliges Anwendungsfeld								

Tabelle 2: Bedeutung der Edelmetalle in ihren Einsatzfeldern (Hagelüken et al. 2005)

Im folgenden wird, beruhend auf Johnson Mattheys „Platinum 2006“, die Nettonachfrage des Jahres 2005 nach den einzelnen Platinmetallen dargestellt, aufgeschlüsselt nach ihren Haupteinsatzgebieten.

Von Platin wurden netto 208t nachgefragt, das entspricht einem Defizit gegenüber der Primärproduktion von 2t. Knapp 50% dieser 208t wurden für Autokatalysatoren verwendet, ca. 30% in der Schmuckindustrie vor allem Chinas und Japans, der Rest ging in den industriellen Einsatz, z.B. in die Glasindustrie oder die Festplattenproduktion.

Die Nettonachfrage nach Palladium betrug 219t, also ein hoher Überschuss von 42t oder 20%. Auch hier gingen knapp 50% in die Automobilindustrie, außerdem wurden rund 20% von der Schmuckindustrie und jeweils ca. 15% von der Dental- und Elektronikindustrie verwendet.

Rhodium wird nahezu vollständig für Autoabgaskatalysatoren benötigt, ca. 85% der Nettonachfrage von 25t (Defizit: 1t) wurden hierfür verwendet. Zudem wird Rhodium noch in der Glas- sowie der Chemieindustrie benötigt.

Abbildung 6 zeigt die Entwicklung der Nachfrage nach Platin, Palladium und Rhodium der letzten zehn Jahre, aufgeteilt auf deren Haupteinsatzgebiete.

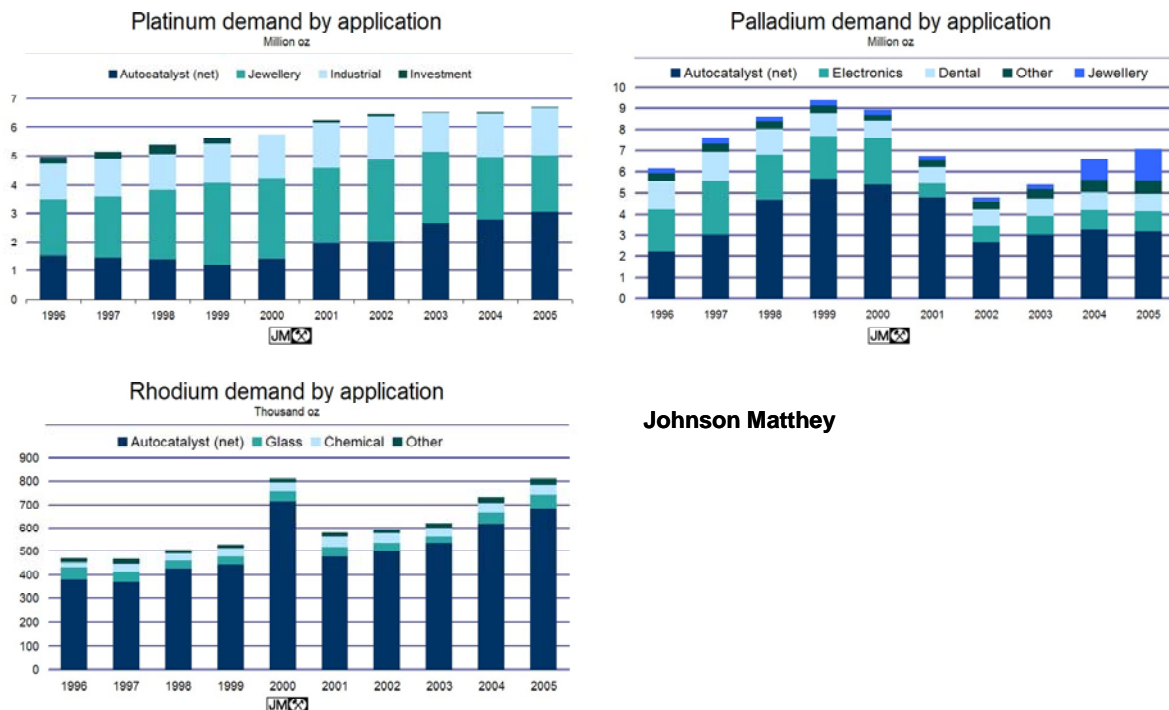


Abbildung 6: Entwicklung der Nachfrage nach Platin, Palladium und Rhodium nach Einsatzgebieten (Johnson Matthey)⁵

Ruthenium geht zu einem großen Teil in die Elektronikindustrie. Ungefähr 65% der Nettonachfrage von 25t gingen in diesen Bereich. Des weiteren wird Ruthenium in der chemischen (ca. 15%) und elektrochemische Industrie (ca. 12,5%) verwendet. Auf diese drei Einsatzgebiete entfällt auch über 75% des Iridium-Bedarfs. Eine genaue Darstellung der Anwendungsfelder von Ruthenium erfolgt im Kapitel 3.3,

⁵ Auch hier sind die Angaben in angelsächsischer Feinunze, 1 Million ounce troy (oz) entsprechen 31,104t

Verwendung.

2.5 Preisentwicklung

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren hauptsächlich auf der Studie des US Geological Survey, „PGM - World Supply and Demand“, sowie auf verschiedenen Artikeln der Zeitschrift „Erzmetall“ aus den Jahren 2001-2004 und den Jahresberichten von Johnson Matthey „Platinum Interim Review 99-06“.

Die Preise für Platinmetalle haben in den letzten 10 Jahren eine stürmische Entwicklung genommen. Die Preise weisen extreme Schwankungen auf, generell geht die Tendenz nach oben.

Diese Tendenz lässt sich erklären durch den Einsatz in industriellen Schlüsseltechnologien, wie z.B. der Automobil-, Chemie- oder Elektronikindustrie, und ihrer oft hohen Bedeutung im jeweiligen Einsatzfeld (siehe Tabelle 2), sowie durch die im Vergleich zu anderen Rohstoffen geringe Gesamtproduktion (siehe Kapitel 2.3.1, Primärgewinnung).

Zum anderen führen die langwierige und kostenintensive Erschließung neuer Vorkommen und die Tatsache, dass die PGM in Russland und in Kanada nur Koppelprodukt anderer Rohstoffgewinnungen sind dazu, dass sich die Produktion nicht (in Russland und Kanada) oder nur langsam (in Südafrika und den USA) im Einklang mit Veränderungen auf der Nachfrageseite steigern oder senken lässt.

Ein weiterer Faktor ist die starke Abhängigkeit der Versorgung von Südafrika und Russland. Die politische, wirtschaftliche und technische Entwicklung dieser Länder beeinflussen oft unmittelbar die Preise. So kontrolliert die russische Regierung den Export und den Verkauf von Lagerbeständen und hält seit 1995 genaue Produktionsdaten und Zahlen zu den Lagerbeständen als Staatsgeheimnis unter Verschluss, seit 2005 gibt sie diese aber wieder frei. Diese Lagerbestände, aus denen in den letzten Jahren immer zeitweilige Angebotsdefizite gedeckt werden konnten, bildeten eine schwer einzuschätzende Größe (USGS 04).

Da Platin und Palladium auch an der Börse gehandelt werden, ist der Preis zusätzlich zum materiellen Bedarf durch Spekulationskäufe beeinflusst. Auch die anderen Platinmetalle werden teilweise aus spekulativen Belangen gehandelt.

Dementsprechend reagieren die Kurse der Platinmetalle sehr sensibel auf tatsächliche oder auch nur angenommene Verschiebungen auf der Angebots- oder Nachfrageseite. Auf der anderen Seite hat das jeweilige Kursniveau - unabhängig von den Eigenschaften des Metalls – auch Einfluss auf

die Wahl z.B. eines Katalysators, hohe Preise stoßen Substitutionsprozesse der Platinmetalle untereinander und durch andere Stoffe an. Im Folgenden werden die Preisentwicklungen der jeweiligen Metalle genauer analysiert.

Der Platinpreis ist seit einigen Jahren immer weiter gestiegen. Angetrieben durch ständig wachsende Nachfrage der Hersteller von Autokatalysatoren sowie dem wachsenden Schmucksektor Chinas übersteigt seit 1999 die Nachfrage das Angebot. Die Produktionskapazitäten in Südafrika, wo über drei Viertel des Platins herkommen (siehe Abbildung 4), wurden zwar stetig erweitert, konnten aber nicht mit der ständig wachsenden Nachfrage mithalten. Abbildung 7 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Preissteigerung und dem Defizit beim Angebot des Metalls.

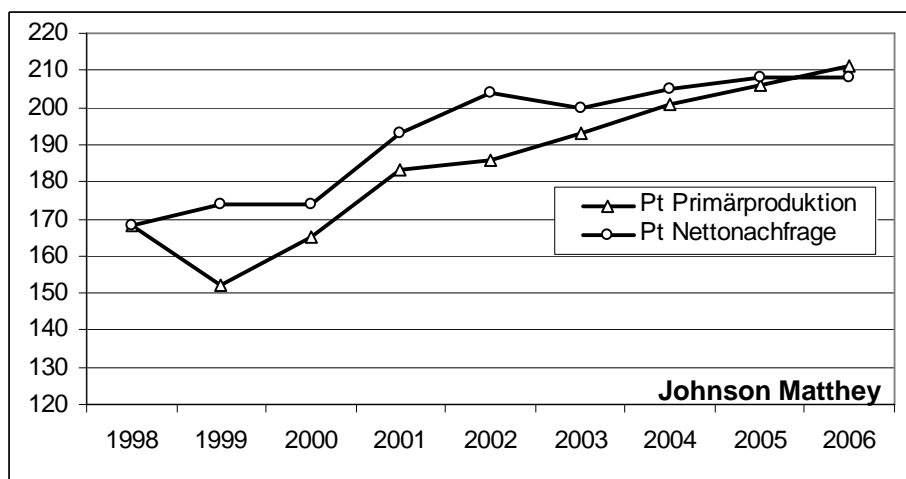
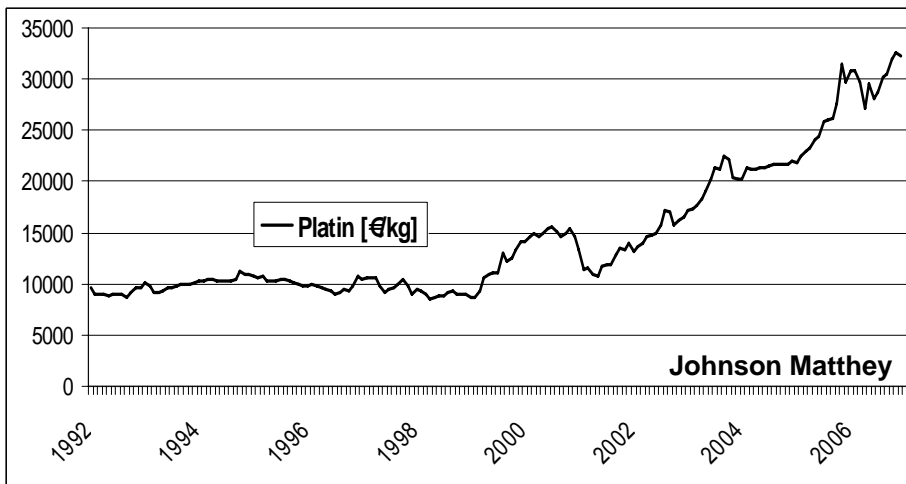
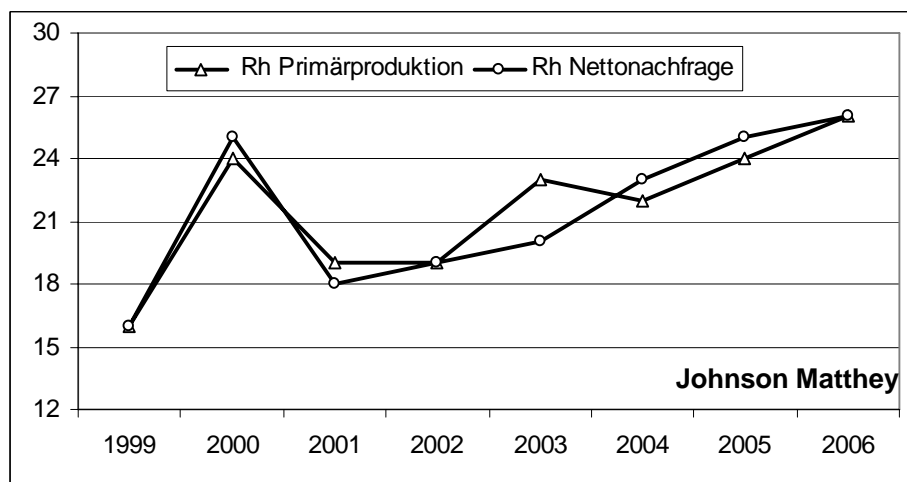
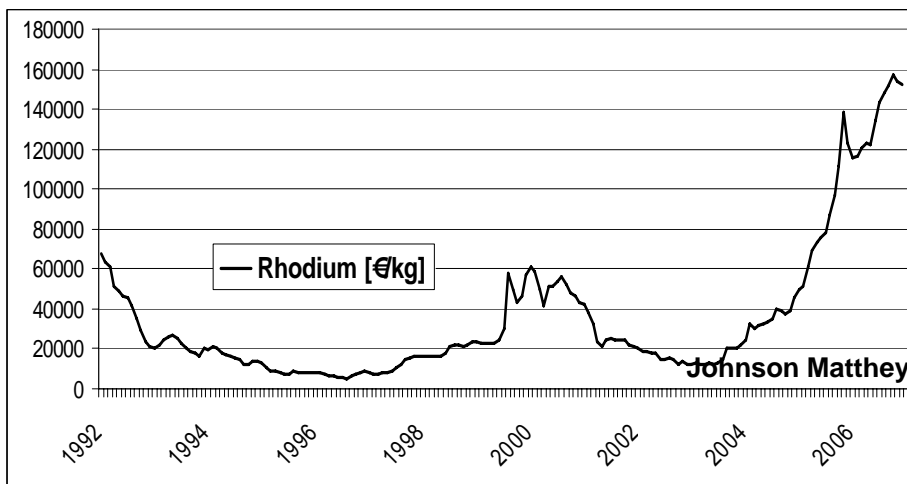


Abbildung 7: Entwicklung des Preises sowie der Primärproduktion und der Nettonachfrage von Platin (Johnson Matthey)⁶

Im Falle von Rhodium führten die attraktive Einsatzgebiete der Autokatalysatoren und LCD-Bildschirme zu einer drastischen Preissteigerung in den letzten 2 Jahren um das zehnfache. Hier konnte die Produktion als Koppelprodukt nicht im selben Maße wie die Nachfrage gesteigert werden und die Lagerbestände sanken. Anhand Abbildung 8 kann man sehen, wie sich bei einer geringen Gesamtproduktion auch kleine Angebotsdefizite bzw. – überschüsse auf den Preis auswirken.



⁶ Die Preise für Platinmetalle sind normalerweise in US-Dollar pro Feinunze (31,104g) angegeben. Die Preise in Euro pro Kilogramm sind Überschlagsweise durch Multiplikation mit 25 berechnet worden, was einem Kurs von 0,7776 €/US-\$ oder 1,286US-\$/€ entspricht (im August 2006)

→ 1000 \$/oz * (1000/31,104) oz/kg = 32150 \$/kg → 32150 \$/kg * 0,7776 €/€ = 25000 €/kg

Abbildung 8: Entwicklung des Preises sowie der Primärproduktion und der Nettonachfrage von Rhodium (Quelle: Johnson Matthey)

Mehr als die Hälfte des Palladiums stammt aus Russland und Kanada (siehe Abbildung 4), wo es aber „nur“ Beiprodukt der Nickel- und Kupfergewinnung⁷ ist. Darum hatten sich große Lagerbestände angehäuft, was das verhältnismäßig niedrige Preisniveau zu dieser Zeit erklärt. Mitte der neunziger Jahre gewann Palladium dann eine verstärkte Bedeutung als Autokatalysator aufgrund technischer Neuerungen, die den Einsatz ermöglichten, und Preisdifferenzen zu Platin. Die Nachfrage stieg und die Lagerbestände wurden abgebaut. Spekulationen um Lieferschwierigkeiten Russlands trieben den Preis zusätzlich in die Höhe, zwischen 1998 und 2001 stieg er um 500%. Diese drastische Steigerung führte dazu, dass Palladium wieder vermehrt durch Platin ersetzt wurde, der Preis fiel innerhalb eines Jahres auf das Niveau von 1998 zurück. Abbildung 9 verdeutlicht diese Entwicklung, die Substitution zwischen Platin und Palladium in den Bereichen Autokatalysator sowie Schmuck ist in Abbildung 6 gut zu erkennen.

⁷ In Russland Beiprodukt der größten Kupfergewinnung der Welt

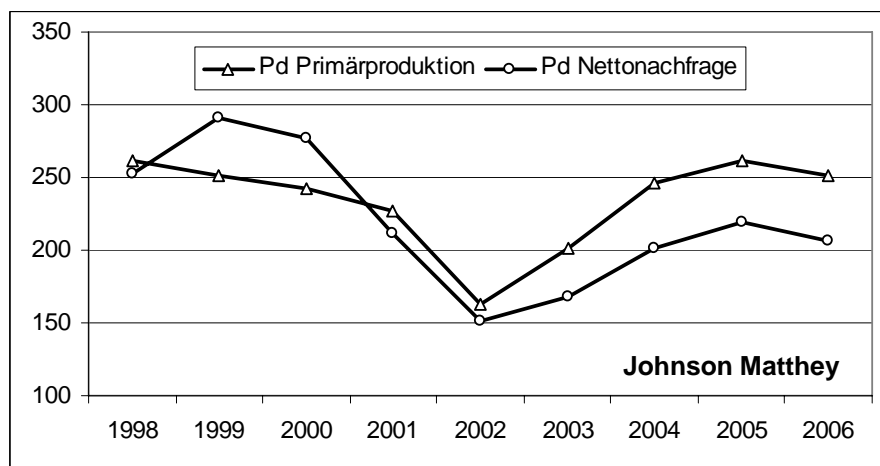
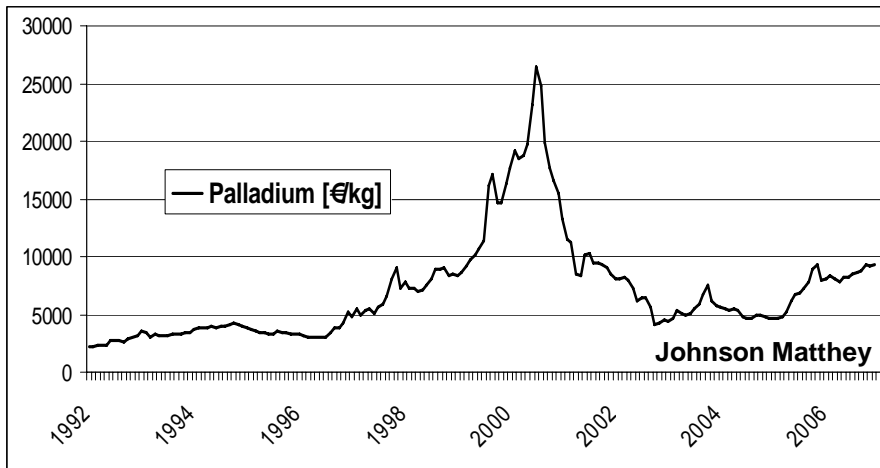


Abbildung 9: Entwicklung des Preises sowie der Primärproduktion und der Nettonachfrage von Palladium (Quelle: Johnson Matthey)

2.6 Zukünftige Entwicklung

Neue Technologien z.B. in den Bereichen Automobil-, Energie- und Chemische Industrie werden auch in Zukunft zu einem steigenden Bedarf nach Platinmetallen führen. Die Aussagen in diesem Kapitel basieren hauptsächlich auf den Jahresberichten von Johnson Matthey, „Platinum Interim Review 99 -06“.

2.6.1 Platin

Der Londoner Edelmetallhändler prognostiziert einen anhaltend starken Bedarf nach Platin. Wegen seiner Doppelverwendung als Industrie- und Schmuckmetall, vor allem wegen der Verwendung als Autokatalysator dürfte die Nachfrage hier in den nächsten Jahren das Angebot weiter übersteigen,

das Defizit bleibt bestehen, es wird mit anhaltend hohen Preisen gerechnet (JM 1999-2005).

Der Schmucksektor hat sich als großer Abnehmer von Platin etabliert, schrumpft jedoch vor allem in China, dem stärksten Markt, wo aufgrund der anhaltend hohen Preise vermehrt auf Palladium zurückgegriffen wird (JM 1999-2005).

Sollte sich die Brennstoffzellentechnik etablieren, käme langfristig ein weiterer großer Platinverbraucher hinzu, denn auch hier wird Platin verwendet (JM 1999-2005).

Auch die Informations- und Multimediatechnologie kann nicht auf Platin verzichten, es ist Bestandteil von Festplatten, Mobiltelefonen und Flachbildschirmen. Für diese Anwendungen wird eine Produktionssteigerung prognostiziert (JM 1999-2005).

Weil weltweit strengere Abgasbestimmungen in Kraft treten, wird ein anhaltend steigender Bedarf an Autokatalysatoren vorhergesagt. Vor allem in Europa verzeichnet die Herstellung von Dieselfahrzeugen einen stetigen Zuwachs, hier sind bereits jetzt 40% aller Neuzulassungen mit Dieselmotoren ausgerüstet, für deren Katalysatoren aus technischen Gründen – anders als bei Benzinmotoren – noch kein Palladium verwendet werden kann und deshalb auf Platin zurückgegriffen werden muss (JM 1999-2005).

Dagegen weisen die Londoner Berater GFMS in ihrer alljährlichen Studie „Platinum & Palladium Survey 2006“ darauf hin, dass die Großabnehmer eine zunehmende Austauschbarkeit der beiden Metalle anstreben. Im Bereich der Benzinfahrzeuge läuft diese Substitution schon seit einigen Jahren, im Dieselsektor wird ein Anlaufen der Substituierbarkeit für 2006 erwartet. Die Marktreife dieser Technik ist jedoch umstritten, die Deutsche Bank gibt ihr erst mittelfristig Chancen, als Zeitpunkt wird 2010/11 genannt (GFMS 2006, Deutsche Bank 2005).

Aufgrund dieser vielfältigen, zukunftssträchtigen Einsatzgebiete sind sich nahezu alle Experten einig, dass der Platinboom weitergeht, sollte sich die Weltwirtschaft nicht signifikant abkühlen. Jedoch könnte sich auf längere Sicht wegen der anhaltenden Substitution von Platin durch Palladium in Benzinerkatalysatoren und in der Schmuckindustrie sowie der anlaufenden Substitution bei Dieselfahrzeugen die Preisdifferenz zwischen den beiden Metallen verringern.

2.6.2 Palladium und Rhodium

Auch Palladium und Rhodium werden wohl in Zukunft stärker nachgefragt werden, da beide zu einem großen Teil in die Autokatalysatorindustrie ge-

hen. Mittelfristig (2010/2011) könnte sich die Nachfrage nach Palladium in Europa stark erhöhen, da mit der nächsten Euro-V-Norm der Schadstoffgehalt in Autoabgasen weiter reduziert werden muss. Da dies jedoch nur unter sehr hohen Temperaturen möglich ist, und Palladium bis 950°C eingesetzt wird, Platin aber bis 650°C, wird die Nachfrage nach – dem außerdem wesentlich günstigerem – Palladium wohl zunehmen (Deutsche Bank 2005).

Zudem gewinnt Palladium in der Schmuckindustrie an Bedeutung. Hält der „Kaufrausch“ der Chinesen, der sich wohl aus der Preisdifferenz zwischen Palladium und Platin herleitet, an, so ist auch hier in den nächsten Jahren mit Zuwachs zu rechnen (Deutsche Bank 2005).

3 Ruthenium

3.1 Allgemeines

Während eine konventionelle Festkörpersolarzelle das absorbierte Sonnenlicht durch eine geeignete Halbleiterstruktur in elektrische Energie umwandelt, sorgt in der Farbstoffsolarzelle eine elektrochemische Reaktion für den Stromfluss. Der Farbstoff cis-di(thiocyanato)-N, N'-bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)Ru(II) – im weiteren N-3 genannt - ist ein auf Ruthenium basierender Komplex, der die Energie von einfallenden Photonen durch Anregung von Elektronen absorbiert. Ruthenium ist daher eine der wichtigsten Komponenten und ein essentieller Bestandteil von Farbstoffsolarzellen. Nachdem im vorigen Abschnitt die Platingruppenmetalle allgemein beschrieben wurden, widmet sich dieses Kapitel den speziellen Verhältnissen bei Vorkommen, Gewinnung, Verwendung und Nachfrage des Ruthenium sowie einer Prognose der zukünftigen Entwicklung.

Ruthenium wurde im Jahre 1844 von C. Claus in Rückständen entdeckt, die beim Auflösen von Rohplatin in Königswasser verblieben. Claus benannte es nach dem lateinischen Namen für den Fundort Russland – Ruthenia.

Ruthenium ist ein Übergangsmetall der 8. Gruppe und steht im Periodensystem unterhalb von Eisen und oberhalb von Osmium. Es besitzt die Elektronenkonfiguration $[\text{Kr}](4d)^7(5s)^1$. Es ist silberweiß bis mattgrau glänzend, sehr hart und spröde, hat eine Dichte von $12,45\text{g/cm}^3$ und einem Schmelzpunkt von ca. 2310°C . Es kristallisiert mit hexagonal-dichtester Packung und ist als Edelmetall relativ reaktionsträge. Unter Ausschluss von Sauerstoff reagiert Ruthenium mit keiner Säure, unter Sauerstoffeinfluss ist es jedoch sehr leicht angreifbar (Binnewies et al. 2004; Greenwood et al. 1990; Becker 2004).

Als elektronenreiches Metall neigt Ruthenium - wie die anderen Platingruppenmetalle - zur Bildung von Komplexen. Es zeichnet sich dabei durch eine reichhaltige Koordinationschemie aus, der Bereich der möglichen Oxidationsstufen liegt dabei mit geeigneten Liganden zwischen -II und +VIII, die am häufigsten angetroffenen Stufen sind jedoch +II, +III und +IV (Binnewies et al. 2004; Greenwood et al. 1990; Becker 2004).

3.2 Vorkommen und Gewinnung

Ruthenium tritt immer als Begleiter des Platins in geringen Mengen auf, meist in gediegener Form, also als reines chemisches Element, außerdem im seltenen Mineral Laurit (RuS_2). Sein durchschnittlicher Anteil an der obersten Erdkruste (16km) beträgt ca. $0,002\text{g/t}$, Fundstätten sind vor allem Südafrika sowie Russland, Kanada und USA.

Ruthenium ist nach Platin und Palladium das am häufigsten vorkommende Platinmetall. Der Anteil von Ruthenium an einer Tonne Erz variiert wie bei anderen Platinmetallen auch, in den großen Lagerstätten von Südafrika liegt er durchschnittlich zwischen 0,3g/t (Merensky-Reef) und 1g/t (UG2-Reef) (siehe Tabelle 3). Das bedeutet, dass zwischen einer und drei Tonnen Erz aus dem Stein gebrochen, gemahlen und chemisch aufbereitet werden müssen um ein Gramm Ruthenium zu erhalten. Platin und Ruthenium stehen in diesen Lagerstätten durchschnittlich im Verhältnis 6:1 (Implats 05).

Ruthenium fällt zusammen mit den anderen Platinmetallen aus den im Königswasser unlöslichen Rückständen bei der Platingewinnung an. Durch eine Reihe komplizierter Verfahren, die sich hauptsächlich auf unterschiedliche Oxidierbarkeit, Flüchtigkeit, Löslichkeit und Beständigkeit der unterschiedlichen Wertigkeiten gründen, erhält man ein lösliches Rutheniumsalz. Nach der Zugabe von Ammoniumchlorid entsteht Ammonium-Hexachlororuthenat(III), woraus man durch Glühen im Wasserstoffstrom reines Ruthenium gewinnen kann. Die einzelnen Prozessschritte sind in Abbildung 10 dargestellt, ausgehend von der Trennung der Platingruppenmetalle (siehe Abbildung 5) (Hagelüken et. al 2005, Becker 2004; Greenwood et al. 1990).

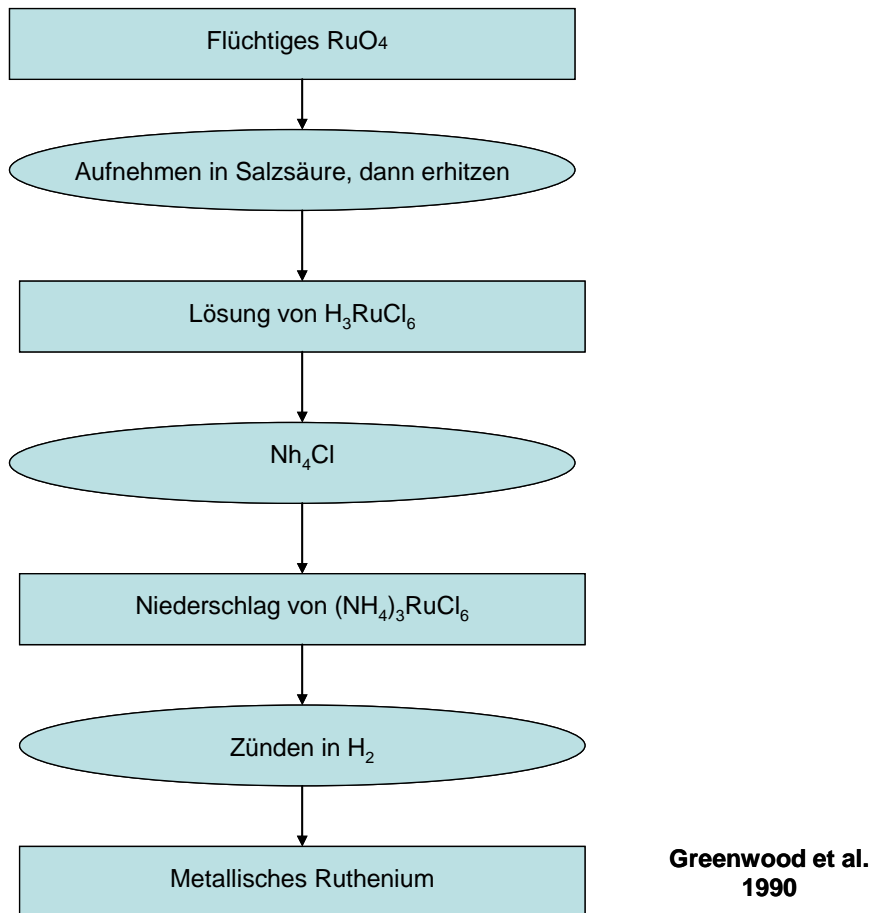


Abbildung 10: Überführen des Rutheniums in Metall, ausgehend von der PGM-Trennung (Greenwood et al 1990)

Ruthenium tritt auch als Produkt der Kernspaltung von Uran auf (Spaltruthenium). Aufgrund seines ähnlichen chemischen Verhaltens ist es nur schwer von Uran und dem ebenfalls gebildeten Plutonium abzutrennen und stellt daher eines der unerwünschten Beiprodukte bei der Aufarbeitung der Spaltprodukte dar (Hagelücken et. al 2005, Becker 2004; Greenwood et al. 1990).

3.3 Verwendung

Anwendung findet Ruthenium vor allem in drei Bereichen:

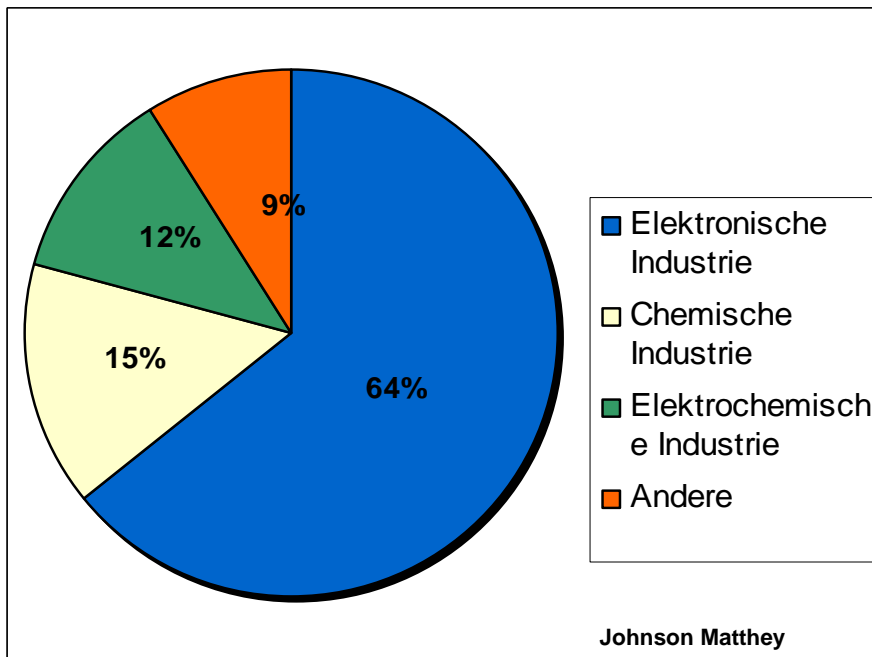


Abbildung 11: Einsatzgebiete von Ruthenium (Johnson Matthey)

- Die Elektronikindustrie, der wichtigste Abnehmer, verwendet es hauptsächlich als Bestandteil von Halbleiterbauteilen (Widerstandspasten in Transistoren), die in fast allen elektronischen Anwendungen wie PCs, Mobiltelefonen und anderen stecken. Eine neuere Anwendung ist die Einlagerung von dünnen Rutheniumschichten in Festplatten, um höhere Speicherkapazitäten zu erreichen (JM 2006). Für die Hersteller von Festplatten entwickelt sich Ruthenium zu einem wichtigen strategischen Material und sie beginnen, Vorratskapazitäten aufzubauen (JM 2007). Vor allem diese zwei Bereiche sorgen für die fast kontinuierlich steigende Nachfrage nach Ruthenium. Ruthenium kann außerdem für Flachbildschirme verwendet werden.
- In der chemisch-technischen Industrie werden Rutheniumverbindungen als spezielle Katalysatoren in zahlreichen organischen Reaktionen, so zum Beispiel in Hydrierungsreaktionen oder Metathesereaktionen verwendet (JM 06).
- Außerdem dient Ruthenium als Bestandteil der Beschichtung von Titan-Anoden in der Chloralkali- und andere Elektrolysen in der elektrochemischen Industrie (JM 06).

In geringerem Umfang findet Ruthenium Anwendungen als härtesteigernder Bestandteil von Platin- und Palladium-Legierungen, zur Herstellung galvanischer Überzüge anstelle von Rhodium, für die Herstellung von LötKolben, Präzisions-Schichtwiderständen und in Temperatur-Messgeräten. Außerdem wird es in letzter Zeit zunehmend auch zur Schmuckproduktion verwendet (JM 06).

3.4 Nachfrage und Primärproduktion

Es gibt weltweit keine Mine, die nur zur Gewinnung von Ruthenium abgebaut wird. Die Produktion wächst oder sinkt im Einklang mit der Primärproduktion des Hauptprodukts (Platin, Nickel) im jeweiligen Verhältnis der Erzgehalte.

Es sind keine Angaben zur Primärproduktion von Ruthenium vorhanden, wohl aber zur durch Primärproduktion gedeckte Nettonachfrage. Diese betrug 2005 26t, eine Steigerung um 100% gegenüber 2002. 2006 machte die Nachfrage dann einen gewaltigen Sprung auf ca. 40t, eine Steigerung um noch einmal 50% gegenüber 2005. Vor allem die Elektronikindustrie sorgte für diese hohen Steigerungsraten durch die vermehrte Verwendung von Ruthenium für Halbleiterbauteile, Flachbildschirme und Festplatten. Die Primärproduktion dürfte aber höher liegen, die Gründe für diese Vermutung werden im Folgenden erläutert:

Das bisherige Hauptabbaugebiet in Südafrika, woher das meiste Ruthenium stammt, ist das 1920 entdeckte Merensky-Reef, das über einen insgesamt etwas höheren Erzgehalt und leichtere Abbaubedingungen verfügt als das darunter liegende UG2-Reef. Im Zuge der ständig wachsenden Nachfrage nach Platinmetallen kommt es seit ca. 2002 zu einer beispiellosen Ausweitung des südafrikanischen PGM-Abbaus und diese geplanten oder inzwischen fertig gestellten neuen Minen befinden sich hauptsächlich im UG2-Reef, da die attraktivsten Gebiete des Merensky-Reefs langsam erschöpft sind. Nun verfügt aber das UG2-Reef über höhere Anteile am Erzgehalt vor allem von Ruthenium und Rhodium⁸, dafür über einen niedrigen Platinanteil. Damit ergibt sich für das UG2-Reef ein durchschnittliches Verhältnis von Platin zu Ruthenium von 3,5:1 (siehe Tabelle 3).

Betrachtet man nun das Verhältnis der Weltjahresnachfrage von Platin zu Ruthenium von 9:1 (siehe Kapitel 2.4, Verwendung und Nachfrage) und berücksichtigt die ständige Ausweitung des Abbaus dieser Lagerstätte, dann kommt man zu dem Schluss, dass die Primärproduktion von Ruthenium

⁸ Der hohe Preis für Rhodium dürfte ein weiterer Grund für den forcierten Abbau des UG2-Reefs sein.

dessen Nachfrage genügend übersteigen dürfte und die sich große Lagerbestände angehäuft haben dürften.⁹

Minengesellschaft/Erzgebiet		Impala/ Merensky	Marula/ Merensky	Impala/UG2	Marula/UG2	Durchschnitt
Min. Erzgehalt PGM + Au	[g/t]	4,81	5,47	5,09	8,88	6,06
Max. Erzgehalt PGM + Au	[g/t]	8,26	5,73	9,45	9,9	8,34
Arithm. Mittel	[g/t]	6,535	5,6	7,27	9,39	7,20
Anteil Platin	[%]	57,3	53,8	47,4	37,7	49,05
Erzgehalt Platin	[g/t]	3,74	3,01	3,45	3,54	3,44
Anteil Ruthenium	[%]	8,3	5,5	13,7	10,9	9,6
Erzgehalt Ruthenium	[g/t]	0,54	0,31	1,00	1,02	0,72
Verhältnis Pt/Ru		6,90	9,78	3,46	3,46	5,91
Anteil Palladium	[%]	24,9	30,4	25,8	39,5	30,15
Erzgehalt Palladium	[g/t]	1,63	1,70	1,88	3,71	2,23
Anteil Rhodium	[%]	4,2	2,6	8,8	7,8	5,85
Erzgehalt Rhodium	[g/t]	0,27	0,15	0,64	0,73	0,45
Anteil Iridium	[%]	1,7	0,6	3,6	2,8	2,175
Erzgehalt Iridium	[g/t]	0,11	0,034	0,26	0,26	0,17
Anteil Gold	[%]	3,7	6,8	0,7	1,3	3,13
Erzgehalt Gold	[g/t]	0,24	0,38	0,05	0,12	0,20

Tabelle 3: Durchschnittliche Erzgehalte und Anteile der einzelnen PGM + Gold des Merensky-Reefs und des UG2-Reefs in Südafrika (auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Implats 05)

3.5 Preise

Ruthenium war lange Zeit das günstigste der Platingruppenmetalle. Die Preisbildung wird vor allem durch plötzliche Nachfrageänderungen, z.B. durch technische Neuentwicklungen, in Zusammenhang mit dem niedrigen Gesamtangebot beeinflusst. Die Eigenschaft als Koppelprodukt und das, verglichen mit der Weltjahresnachfrage höhere Ru:Pt-Verhältnis im Erzgehalt des UG2-Reefs (1:3,5 – 1:9, vgl. Kapitel 3.4, Nachfrage) führen zu dem vermuteten großen Überschuss auf der Angebotsseite, was das relativ niedrige Preisniveau erklärt.

Ruthenium kostete jahrelang um die 1000 €/kg. Wie in Abbildung 12 zu erkennen ist, kam es Anfang 2000 zu einem scharfen Preisanstieg bis auf ca. 4000 €/kg, der vor allem auf eine stark erhöhte Nachfrage nach Mobiltelefo-

⁹ Diese Vermutung wird bestätigt in vielen der Jahresberichten von Johnson Matthey, in denen oft ein Satz in ähnlicher Form zu lesen ist: „We believe that stocks of unsold Ruthenium grew.“ (JM 2002 u.a.)

nen und damit nach Transistoren zurückzuführen ist. Hinzu kam ein Ausfall der Lieferungen Russlands und Käufe von Spekulanten. Dies führte dazu, dass die Ruthenium verwendenden Produzenten verstärkt auf eigene Lagerbestände zurückgriffen, die Nettonachfrage also wieder sank. Bis 2002 fiel der Preis dann wieder auf das Niveau von Anfang 2000, auch infolge des damals schon erweiterten Abbaus des rutheniumreichen UG2-Reefs und dem damit verbundenen größeren Angebot. Zwischen 2002 und 2005 schwankte der Preis dann zwischen 1000 €/kg und 2000 €/kg, 2006 pendelte er sich relativ konstant auf ca. 4500 €/kg ein. Zwischen November 2006 und Februar 2007 kam es dann zu einem rasanten Preisanstieg bis hin zum Allzeithoch bei ca. 22000 €/kg. Dies spiegelt den großen Sprung bei der Nachfrage nach Ruthenium um 50% in 2006 wieder und hat auch etwas mit panikartigen Sicherheitskäufen seitens der Industrie zu tun (JM 1999-2007).

Johnson Matthey vermutet in diversen Jahresberichten, dass die jüngsten Preisbewegungen mehr mit spekulativen Belangen zu tun gehabt hätten als mit der Angebots- und Nachfragesituation.

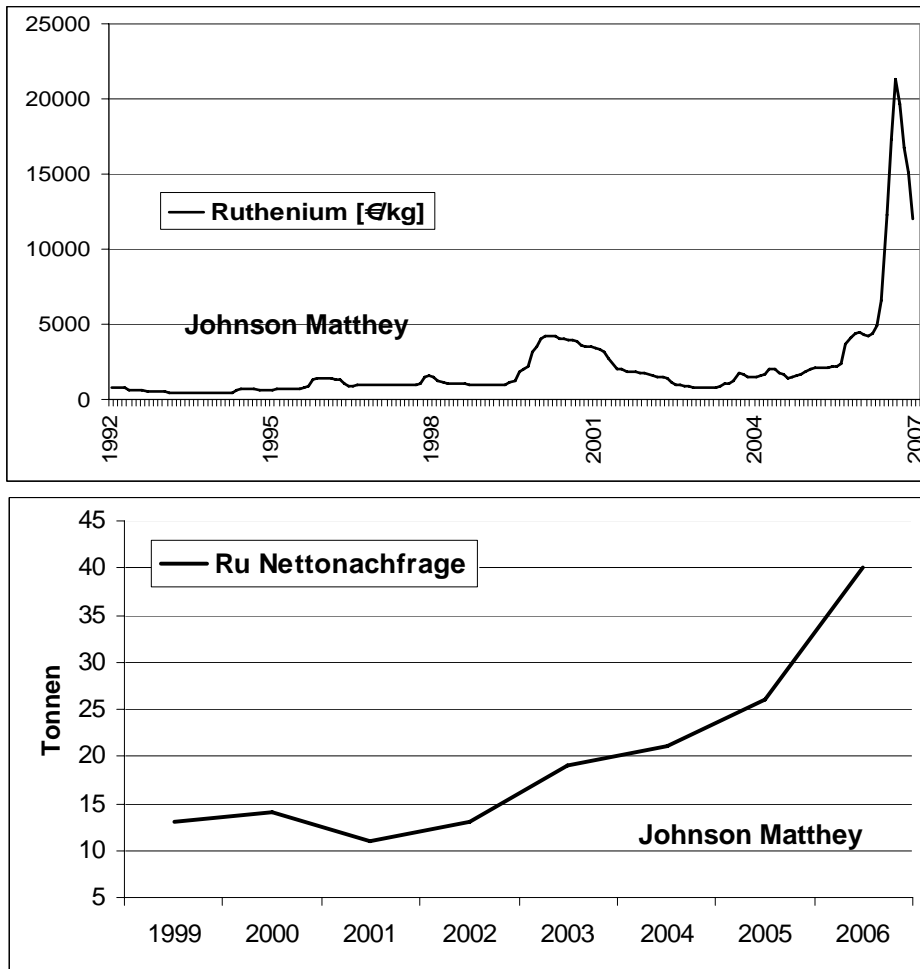


Abbildung 12: Entwicklung des Rutheniumpreises und der Nettonachfrage¹⁰

¹⁰ Auch bei Ruthenium werden die Preise normalerweise in US-Dollar pro Feinunze (31,104g) angegeben. Die Preise in Euro pro Kilogramm sind überschlagsweise durch Multiplikation mit 25 berechnet worden, was einem Kurs von 0,7776 €/US-\$ oder 1,286US-\$/€ entspricht (im August 2006).

→ 1000 \$/oz * (1000/31,104) oz/kg = 32150 \$/kg → 32150 \$/kg * 0,7776 €/€ = 25000 €/kg

3.6 Einfuhr nach Deutschland und Handelsform

Die Einfuhr von Ruthenium, Iridium und Osmium in Pulverform nach Deutschland betrug 2005 ca. 4t. 2001 waren es noch 2,3t, in der Zwischenzeit stieg die Einfuhr kontinuierlich (StaBA 2006).

Einzelangaben für Ruthenium sind nicht verfügbar. Aufgrund der Mengenanteile der drei Metalle beim Weltjahresbedarf (Ru:Ir:Os haben hier das Verhältnis 5,75:1:0¹¹), kann rechnerisch von einem jährlichen Ruthenium-Import von ungefähr 3,5t Tonnen ausgegangen werden.

Ruthenium kommt als graues, geruchsloses Pulver in den Handel.

3.7 Zukünftige Entwicklung

Ruthenium wird in den nächsten Jahren eine steigende Bedeutung beigemessen. Für 2006 sagt der Londoner Edelmetallhändler Johnson Matthey einen Weltverbrauch von ca. 25t voraus, also 2t mehr als 2005 und damit eine Steigerung um knapp 10% wie schon in den Vorjahren. Diesem Anstieg liegt weiterhin eine starke Zunahme im Bereich der Elektronikindustrie zugrunde, dem größten Verbraucher von Ruthenium. Vor allem der Verbrauch von Ruthenium-basierten Widerstandspasten in Halbleiterbauteilen und ähnlichen Komponenten verzeichnet einen starken Anstieg im Einklang mit der steigenden Produktion von Computern, Mobiltelefonen, Digitalkameras und einer steigenden Nachfrage im Bereich der Automobilelektronik. Außerdem kann durch Einlagerung von Ruthenium in Festplatten deren Kapazität erheblich gesteigert werden, der Anteil der auf diese Weise hergestellten Platten nimmt stetig zu, dieser Bereich wird sich zu einem großen Abnehmer von Ruthenium entwickeln (JM 2004; JM 2005, JM 2007).

Weiterhin könnte Ruthenium im Bereich der Chemie aufgrund seiner äußerst breiten Anwendbarkeit als Katalysator und seines geringen Preises mittelfristig eine großtechnische Bedeutung erfahren, noch hat es gegenüber den klassischen Katalysatoren Palladium, Rhodium und Titan einen gewissen zeitlichen Rückstand (Becker 2004).

Längerfristig könnte sich ein sehr großes Anwendungsgebiet für Ruthenium im Bereich der Brennstoffzellen ergeben, hier kann Ruthenium als Katalysator verwendet werden. Die Marktanalysten von Frost&Sullivan prognostizieren sogar eine baldige kommerzielle Anwendung von DFMCs (Direct Methanol Fuel Cells) für HEVs (Hybrid Electronic Vehicels). Eine DFMC könnte außerdem nach Aussage von Frost and Sullivan einen Laptop fünf Tage lang mit Energie versorgen. Die Forschung konzentriert sich auf die Suche

¹¹ Die Weltjahresproduktion von Osmium ist so gering, dass sie bei dieser Betrachtung keine Rolle spielt.

nach Alternativen zum sehr teuren Platin als Katalysator, eine davon könnte eine Kombination aus Platin und Ruthenium sein. Auf der anderen Seite ist auch Ruthenium teuer, darum wird auch nach ganz anderen Alternativen geforscht sowie daran, die benötigte Menge um einen sehr großen Teil zu senken. Die Rohstoffkosten für den Katalysator sind laut Frost&Sullivan der größte Kostenfaktor und damit das größte Problem für die kommerzielle Anwendung derzeitiger Brennstoffzellen, zukünftige könnten also auch gänzlich ohne Platin und Ruthenium arbeiten. Eine Antwort auf die Frage, ob, wann und in welchem Maße sich welche Brennstoffzelle durchsetzen wird, kann schwer vorausgesagt werden. Bei einer Durchsetzung mit Ruthenium als Katalysator wäre dies aber wegen der allgemeinen Bedeutung der Brennstoffzelle als Energieträger ein gewaltiges Nachfragepotential (Frost 2005, Frost 2006).

Der südafrikanische Rutheniumausstoß steigt weiterhin im Zuge der expandierenden Platinproduktion. Trotz dem höheren Angebot an raffiniertem Metall sind die Preise 2006 wegen der starken Industrienachfrage weiter gestiegen (JM 2006).

4 Umweltrelevanz des Rohstoffes und des Farbstoffes

In diesem Kapitel wird auf die die Gesundheit, die Sicherheit und den Ressourcenverbrauch betreffenden Aspekte von Ruthenium selbst sowie dem in der Farbstoffsolarzelle verwendeten Farbstoff N-3, eingegangen.

4.1 Umweltrechtliche/ -politische Anforderungen, gesellschaftliche Akzeptanz

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beruhen auf der GESTIS-Gefahrstoffdatenbank des deutschen berufsgenossenschaftlichen Institutes für Arbeitsschutz (BGIA) und dem Informationssystem für gefährliche/umweltrelevante Stoffe (IGS) des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen.

4.1.1 Ruthenium

4.1.1.1 Kennzeichnung von Ruthenium

Ruthenium in Pulverform wird als leichtentzündlicher Feststoff, als in kompakter Form ist nicht brennbar und als praktisch unlöslich in Wasser charakterisiert. Seine Kennzeichnungen finden sich in Tabelle 4.

ZVG-Nummer ¹²	7440
CAS-Nummer ¹³	7440-18-8
EG-Nummer ¹⁴	231-127-1
UN-Nummer ¹⁵	3089

Tabelle 4: Bezeichnungsstandards für Ruthenium

4.1.1.2 TA Luft

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, eine Allgemeine Verwaltungsvorschrift der deutschen Bundesregierung zum Bundesimmissionsschutzgesetz, schreibt für Ruthenium folgende verbindliche Grenzwerte vor:

Die im Abgas enthaltenen staubförmigen Emissionen dürfen folgende Werte nicht überschreiten:

- Massenstrom: 0,20 kg/h

¹² Identifikationsnummer der GESTIS-Gefahrstoffdatenbank des berufsgenossenschaftlichen Institutes für Arbeitsschutz, auch verwendet im Chemielexikon RÖMPP-Online

¹³ Internationaler Bezeichnungsstandard für chemische Stoffe

¹⁴ Bezeichnungsstandard der EU für Gefahrstoffe

¹⁵ Bezeichnungsstandard der UN für Gefahrgut

- Massenkonzentration: 20 mg/m³

Auch bei Einhaltung oder Überschreitung eines Massenstroms von 0,20kg/h darf im Abgas die Massenkonzentration 0,15g/m³ nicht überschritten werden.

4.1.1.3 TEEL-Wert

Das Informationssystem für gefährliche/umweltrelevante Stoffe gibt Arbeitsplatzgrenzwerte für Ruthenium, so genannte TEEL-Werte (TEEL: Temporary Emergency Exposure Limit) heraus:

Der TEEL 0/1/2/3-Wert bezeichnet die Grenzkonzentration unterhalb der die meisten Menschen - kein schätzbares Risiko für ihre Gesundheit eingehen / nur leichte kurzlebige Beeinträchtigungen der Gesundheit erfahren / keine irreversible oder andere schwerwiegende Beeinträchtigungen der Gesundheit/ keine lebensbedrohliche Beeinträchtigungen der Gesundheit erfahren.

- TEEL-0: 10mg/m³
- TEEL-1: 30mg/m³
- TEEL-0: 50mg/m³
- TEEL-0: 250mg/m³

4.1.1.4 Weitere Grenzwerte/ Gefahrstofflisten

Es sind keine weiteren Grenzwerte, wie z.B. der MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) für Ruthenium bekannt.

4.1.2 Ruthenium-Farbstoff N-3

Es sind keine Gefahrstoffkennzeichnungen oder Grenzwerte für den Ruthenium-Farbstoff N-3 bekannt.

4.2 Gefährdungs-/ Störfallpotenzial

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beruhen auf der GESTIS-Gefahrstoffdatenbank des deutschen berufsgenossenschaftlichen Institutes für Arbeitsschutz, der Gefahrstoffdatenbank der Länder (GDL), dem Sicherheitsdatenblatt für Ruthenium der Sputteringfirma ACI Alloy von 2000 sowie dem für den Farbstoff N-3 durchgeführten AMES-Test von 2000.

4.2.1 Ruthenium

Die Gefahrstoffdatenbank der Länder (GDL) stuft Ruthenium folgendermaßen ein:

„Kein "gefährlicher Stoff" im Sinne von § 3a Abs. 1 Chemikaliengesetz bzw. § 4 Abs. 1 Gefahrstoffverordnung bzw. Abschnitt 2.5 der TRGS 200. Das schließt nicht aus, dass der Stoff möglicherweise "auf sonstige Weise chronisch schädigend" und damit ein Gefahrstoff im Sinne von § 19 Abs 2 Chemikaliengesetz bzw. § 4 Abs. 2 Gefahrstoffverordnung ist.“

Rutheniumpulver ist mit dem Gefahrensymbol F (leichtentzündlich) und dem Hinweis auf besondere Gefahren (R-Satz) R11 (leichtentzündlich), gekennzeichnet, zudem mit den Sicherheitsratschlägen (S-Sätze) S16 (von Zündquellen fernhalten – nicht rauchen), S22 (Staub nicht einatmen) und S24/25 (Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden) (GESTIS).

Rutheniumpulver wird von der Kommission zur Bewertung wassergefährdender Stoffe (KBwS) und von der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS) als Nicht wassergefährdender Stoff eingestuft (GESTIS).

Rutheniumpulver wird von folgenden Institutionen als Nicht karzinogen (krebserregend) eingestuft (ACI Alloy):

- International Agency for Research on Cancer (IARC)
- US National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)
- US Department of Health and Human Services – National Toxicology Program (NTP)
- US Department of Labor – Occupational Safety & Health Administration (OSHA)

4.2.2 Ruthenium-Farbstoff N-3

Mögliche Einsatzgebiete der Farbstoffsolarzellen in Innenräumen, wie zum Beispiel auf Preisschilder in Supermärkten, lassen personellen Kontakt nicht ausschließen. Dies gilt insbesondere dann, wenn Zellen beschädigt werden und somit Farbstoff und Elektrolyt in die Umgebung freigesetzt werden können. Dadurch werden Fragen nach Gesundheits- und Sicherheitsaspekten der verwendeten Inhaltsstoffe aufgeworfen. Aufgrund der kleinen Mengen an N-3 in den Zellen kann man davon ausgehen, dass keine akute toxische Ge-

fahr besteht¹⁶, es können aber Langzeiteffekte selbst durch beiläufige Kontakte mit winzigen Mengen verursacht werden.

Einige Ru-Komplexe, besonders Ru(II)-phenanthrolin-Komplexe wurden als mutagen, also erbgutschädigend befunden, dies hängt vermutlich zusammen mit ihrer Fähigkeit, DNA zu binden. Auch dem N-3 näher verwandte Ru-Dichlorid-Komplexe werden als erbgutschädigend betrachtet. Darum wurde am Farbstoff N-3 der AMES-Test durchgeführt, ein klassischer, weit verbreiteter Test zur Feststellung der Mutagenität eines Stoffes. Ein positiver AMES-Test wird als Hinweis auf die Kanzerogenität (krebserregende Wirkung) einer Substanz gewertet, da die meisten mutagenen Stoffe beim Säuger ebenfalls krebserregend wirken (De Vries et al. 2000).

Der AMES-Test beruht auf einer umgekehrten Mutation, die im folgenden näher erläutert wird. Ein Satz von Bakterien-Stämmen, *Salmonella typhimurium* und *Escherichia coli*, braucht jeweils eine bestimmte Aminosäure (Histidin bzw. Tryptophan) zur Herstellung von Proteinen und damit zum Wachsen. Sie können diese Aminosäure normalerweise selbst herstellen, diese Fähigkeit wird durch eine gezielte Mutation unterdrückt. Unter dem zusätzlichen Reiz einer Belichtung können die Bakterienstämme durch eine weitere Mutation die Synthesefähigkeit wiedererlangen. Wenn nun also diese Stämme mit dem zu untersuchenden Stoff versetzt werden und unter Belichtung auf einem Nährmedium ohne Histidin bzw. Tryptophan wachsen, dann ist diese umgekehrte Mutation nachgewiesen, da dann die Stämme in die Lage versetzt wurden, selbst das Histidin bzw. Tryptophan zu produzieren. D.h., die zu untersuchende Substanz wirkt mutagen und hat diese umgekehrte Mutation verursacht. Zusätzlich werden die Bakterien noch empfindlich gegenüber Mutationen gemacht und mit Gewebe aus Säugetierlebern behandelt, da es bewiesen ist, dass viele erbgutschädigenden Stoffe erst in der Leber oder ähnlichem Gewebe in eine aktive, krebserregende Form umgewandelt werden (De Vries et al. 2000).

In zwei unabhängigen Experimenten wurden fünf verschiedene Dosen N-3 in jeweils dreifacher Ausführung für jeden Stamm getestet. Alle Bakterienstämme zeigten keinerlei Reaktion, d.h. sie zeigten kein Wachstum. Daher kann N-3 für die Bakterienstämme als nicht-mutagen angesehen werden. Aufgrund der Ergebnisse dieser Studie wird gefolgert, dass N-3 nicht erbgutschädigend ist (De Vries et al. 2000).

¹⁶ Aus dem AMES-Test: „Only small amounts of chemicals are present in each cell and so there is no danger of acute toxicity.“

4.3 Umweltwirkungen auf vor- und nachgelagerten Stufen

Ruthenium(VIII)-oxid, RuO_4 , das im Scheidereiprozess zur Abtrennung des Rutheniums von den anderen Platingruppenmetallen durch Destillation erzeugt wird, ist giftig und es besteht Explosionsgefahr. Es wird aber unter normalen Umständen nicht gebildet. Es ist nicht bekannt, ob dieser Stoff bei einer eventuellen Beschädigung des Moduls oder beim Recycling entstehen kann. Wegen des Gefahrenpotentials sollte dies im weiteren Verlauf des Projektes geklärt werden.

4.4 Erschöpfung nicht-regenerativer/regenerativer Ressourcen

4.4.1 Grundlagen Ressourcenverbrauch / Materialintensität

Die Grundidee einer nachhaltigen, zukunftsfähigen Entwicklung lautet, dass alle gegenwärtig lebenden Menschen die Chance erhalten sollen, ihre Bedürfnisse zu befriedigen, ohne dabei zukünftigen Generationen ihre Lebenschancen zu nehmen. Dies ist aber bei dem gegenwärtigen Ressourcenverbrauch der Menschheit – und hier vor allem der Industrieländer – nicht möglich. Das Ziel lautet also, unseren Wohlstand effizienter, d.h. mit weniger Naturverbrauch zu erreichen.

Als grundlegendes Maß zur Abschätzung der Ressourcenproduktivität und Umweltbelastung eines Produktes hat das Wuppertal Institut das MIPS-Konzept und seine praktische Anwendung in Form einer Materialintensitätsanalyse (MAIA) entwickelt. Die Abkürzung MIPS steht für Material Input pro Serviceeinheit und gibt an, wie viele Ressourcen („Material“) für ein bestimmtes Produkt oder eine Dienstleistung („Serviceeinheit“) insgesamt, das heißt über den gesamten Lebenszyklus hinweg, eingesetzt werden. MIPS berechnet alle Ressourcenverbräuche an der Grenze ihrer Entnahme aus der Natur in verschiedenen, grundlegenden Kategorien: abiotisches Material, biotisches Material, Wasser, Luft und Abraum. Bildet man daraus den Kehrwert, dann erhält man eine Aussage über die Ressourcenproduktivität, also darüber, wie viel Nutzen eine bestimmte Menge „Natur“ spenden kann.

Im folgenden wird der MIT-Wert für Ruthenium abgeschätzt (MIT – auf Gewichtseinheit bezogener Material-Input) und mit anderen ressourcenintensiven Komponenten der Farbstoffsolarzelle verglichen.

4.4.2 Abschätzung der Materialintensität des Ruthenium-Rohstoffes

4.4.2.1 Zur Aussagekraft der Ergebnisse

Über die Methodik der Stoffstrommodellierung, auf deren Basis die MI-Werte berechnet werden, wird noch diskutiert und es gibt keine festen, einheitlichen Vorgehensweisen, wie diese Werte bilanziert werden. Insbesondere

sind die Stoffströme bei der Gewinnung der PGM erst ein einziges Mal untersucht worden, im Rahmen einer Diplomarbeit von Christian Hochfeld¹⁷, hierauf beruht diese Abschätzung. In jener Arbeit merkt der Autor an, dass die Datengrundlage zwar befriedigend ist, die Werte aber eher als Ausgangspunkt für weitere, tiefergehende Arbeiten zu sehen sind. Somit sind auch die Ergebnisse dieser Studie als erste Abschätzung zu verstehen.

In jener Arbeit wurden die vier großen Lagerstätten Bushveld (Südafrika), Norilsk-Talnakh (Russland), Sudbury (Kanada) und Stillwater (USA) einzeln untersucht, da große Unterschiede zwischen ihnen bestehen. Dies ist bedingt durch die unterschiedlich hohen Erzgehalte und die verschiedenen Anteile der PGM daran (siehe Tabelle 1), aber auch durch die teilweise sehr unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren. Diese Abschätzung bezieht sich auf die Werte für Südafrika, da hier 80% des Platins und damit auch das meiste Ruthenium herkommt (siehe Abbildung 4).

4.4.2.2 Bilanzergebnisse für Südafrika

Die Bilanzierung der südafrikanischen Primärproduktion und Weiterverarbeitung zur Herstellung einer Masseneinheit PGM ergab die in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse:

Zu verarbeitendes Erz	Benötigtes Wasser	Benötigter Strom	Benötigtes Gas	Output CO ₂ -Äquivalente	Output SO ₂ -Äquivalente
282500 kg/kg	170000 kg/kg	23260 kWh/kg	800000 kJ/kg	23640 kg/kg	446 kg/kg

Tabelle 5: Bilanzergebnisse in Bezug auf die Herstellung eines Kilogramms PGM (Hochfeld 97)

Die nach den einzelnen Stoffen unterteilten Bilanzergebnisse für alle 5 Platinmetalle sind im Anhang in Tabelle 9 zu finden.

4.4.2.3 Allokation der Bilanzergebnisse

Ein großes Problem bei der Erstellung ökologischer Bilanzen besteht darin, Prozesse mit mehr als einem Produkt als Output zu bilanzieren. Da die Umweltbelastungen mit dem Gesamtprozess und damit allen Produkten assoziiert werden und normalerweise (auch hier im Fall des PGM-Abbaus) der Gesamtprozess bilanziert wird, müssen diese Belastungen noch auf die einzelnen Produkte verteilt werden. Die Frage ist nun, wie dies geschehen soll. Es haben sich einige Ausschüsse dieser Problematik angenommen, es gibt aber keine universelle Allokationsmethode. Dafür existieren einige grund-

¹⁷ Inzwischen Stellvertretender Geschäftsführer des Öko-Institutes e.V.

sätzliche Prinzipien, die hier aber nicht aufgezählt werden¹⁸. Da die Problematik auch bei der PGM-Produktion besteht - neben den sechs Platinmetallen werden weitere Edelmetalle (Gold und Silber¹⁹) und Buntmetalle (Nickel, Kupfer, Kobalt²⁰) gefördert – wird die Allokationsmethode von Herrn Hochfeld, die auch den Autoren dieser Studie am sinnvollsten erscheint, kurz erläutert.

Es macht Sinn, nach dem Grund für den Abbau zu allokatieren. Dieser besteht fast ausschließlich aus dem ökonomischen Wert der Metalle²¹, darum wird ein Faktor für jedes einzelne Metall gebildet, der dessen Anteil am Gesamtwert der Metallproduktion einer Mine entspricht. Zu diesem Zweck wird der Anteil eines Metalls am Erzgehalt mit dessen Durchschnittspreis multipliziert und schließlich durch die Summe aller so errechneten Werte geteilt. Auf diese Weise kommt ein Faktor zustande, der letztlich aussagt, wie viel das entsprechende Metall dazu beiträgt, dass die Lagerstätte überhaupt ausgebeutet wird.

Produkt	Anteil bezogen auf 1 kg PGM	Durchschnittspreis '92-'06 [€/kg]	Wert bezogen auf 1 kg PGM	Anteil am Gesamtwert
Platin	0,49	14046,5	6882,79	0,5355
Palladium	0,302	6960,8	2102,16	0,1635
Rhodium	0,059	31349,3	1849,61	0,1439
Ruthenium	0,096	1636,5	157,104	0,0122
Iridium	0,022	5797,8	127,552	0,0099
Au	0,031	9000 ²²	279	0,0217
Nickel	147 ²³	8,5 ²⁴	1249,5	0,0972
Kupfer	103 ²⁵	2 ²⁶	206	0,016
PGM + Au + Ni + Cu	251		12853,7	1

Tabelle 6: Berechnung der Allokationsfaktoren

So hat z.B. Platin nach dieser Herangehensweise für Südafrika einen Allokationsfaktor von über 50% an den gesamten Umweltbelastungen, bedingt durch den hohen Anteil am Erzgehalt der PGM und den hohen Preis. Von Nickel wird in den bilanzierten Lagerstätten zwar ca. 300mal mehr gefördert, da dessen Preis in der Bilanzierungsperiode aber mehr als 1500 mal niedri-

¹⁸ Diese können z.B. bei (Hochfeld 97) nachgelesen werden

¹⁹ Silber spielt in Südafrika keine Rolle

²⁰ Kobalt spielt in Südafrika keine Rolle

²¹ Das russische Nickel geht zum großen Teil in deren Militärindustrie, hat also auch strategischen Wert, der schlecht monetarisiert werden kann

²² abgeschätzt aus Graphiken des London Metal Exchange '98 - '06

²³ Werte von '95

²⁴ abgeschätzt aus Graphiken des London Metal Exchange '98 - '06

²⁵ Werte von '95

²⁶ abgeschätzt aus Graphiken des London Metal Exchange '98 - '06

ger war beträgt der Allokationsfaktor nur knapp 10%. Problematisch sind dabei die zum Teil extremen Preisschwankungen der Metalle, dem wird dadurch begegnet, dass Durchschnittspreise herangezogen werden.

Multipliziert man den jeweiligen Faktor mit den Materialintensitätswerten für die Umweltbelastungen des Gesamtprozesses, wie z.B. der Masse des heraus gebrochenen Gesteins oder des freigesetzten SO_2 , kann man nun eine Aussage bezüglich eines einzelnen Metalls machen. Schließlich werden die Werte noch auf ein Kilogramm des jeweiligen Metalls genormt, indem man die allokierten Werte durch den relativen Anteil des jeweiligen PGM am Erzgehalt teilt.

4.4.2.4 Ergebnis

Für Ruthenium ergibt sich nun durch einen eher niedrigen Anteil an einer Gewichtseinheit PGM und den relativ niedrigen Preis ein niedriger Allokationsfaktor von ca. 1,22%, zur Normierung auf ein kg wird dieser durch den Massenanteil 9,6% geteilt.

Damit ergeben sich folgende Materialintensitätswerte für Ruthenium:

- Abiotisches Material: 36000 kg/kg
- Wasser: 21500 kg/kg
- Luft: 3000 kg/kg
- Summe MI-Werte: **60500kg/kg**
- Strom: 3000 kWh/kg
- Gas: 100000 kJ/kg²⁷

In Tabelle 7 sind die Materialintensitätswerte anderer ressourcenrelevanter Komponenten der Farbstoffsolarzelle zum Vergleich aufgeführt. Die MIT-Werte sind mit der benötigten Masse der einzelnen Stoffe für 1000 Module der Größe 60cm * 100cm verknüpft, um zu erkennen, welcher Teil der Farbstoffsolarzelle am meisten natürliche Ressourcen verbraucht. Die Mengenangaben der einzelnen Stoffe beruhen auf der Studienarbeit von Johannes Seuffert über den Herstellungsprozess der Farbstoffsolarzelle.

²⁷ Strom- und Gasverbrauch gehören nicht zum eigentlichen MIPS-Konzept, da diese aber für die Solarzellenproduktion eine Rolle spielen werden sie hier mit betrachtet

Stoff	Menge Stoff in kg/1000 Module	Summe Mi-Werte Stoff in kg/kg	Mi-Wert Stoff/1000 1000 Module
Glas	9.000	15,3	137.637
Silber	0,611	7,5	4.579
Titan	7,831	1,0	7.831
Platin	0,029	520,0	14.872
Ruthenium	0,042	60,5	2.541

Tabelle 7: Materialintensitätswerte für die Herstellung von 1000 FSZ-Modulen der Größe 60cm * 100 cm; Eigene Berechnung auf Basis der Daten aus (Seuffert 2006) und (WI 2003)

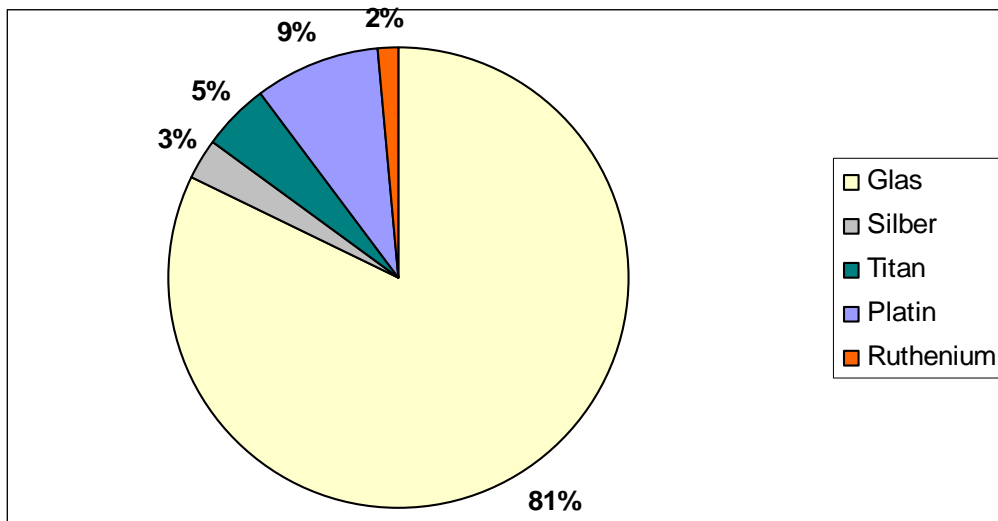


Abbildung 13: Vergleich einiger relevanter MI-Werte der FSZ

4.4.3 Interpretation der Ergebnisse

Ruthenium hat vergleichsweise sehr hohe Materialintensitätswerte, diese sind mit den niedrigen Erzgehalten, den schwierigen Abbaubedingungen im Tiefbau und den aufwendigen Verhüttungs- und Raffinationsprozessen zu erklären. Noch höhere Werte hat Platin, bedingt durch die oben erwähnte Allokation des Gesamtprozesses des PGM-Abbaus. Diese hohen Werte werden aber dadurch relativiert, dass insgesamt in der Farbstoffsolarzelle nur sehr geringe Mengen der ressourcenintensiven Stoffe eingesetzt werden. Die höchste Ressourcenrelevanz dieser 5 Stoffe hat das Glas, von dem die mit Abstand größte Menge benötigt wird.

4.4.4 Gegenüberstellung von Verfügbarkeit und erwartetem Mengenbedarf

Bei einer Modulgröße von 0,6m² und einem Farbstoffbedarf von 0,7g/m² aktive Fläche werden pro Modul ca. 0,42g N-3 benötigt. Bei einer angenommenen Jahresproduktion von 100.000 Modulen ergibt dies einen Jahresbe-

darf von 42kg. Im Farbstoff sind ca. 10% Ruthenium enthalten, das entspricht also einem Bedarf von 4,2kg Ruthenium. In dieser Größenordnung entsteht bei einer Weltjahresproduktion von vermutlich über 40t vermutlich kein Engpass.

5 Fazit

5.1.1 Rohstoffverfügbarkeit und Preis

Ruthenium ist nach Platin und Palladium das am häufigsten vorkommende Platinmetall. Es wird vor allem in der Elektronikindustrie, hauptsächlich als Bestandteil von Halbleiterbauteilen, in der chemisch-technischen Industrie in speziellen Katalysatoren und als Bestandteil der Beschichtung von Titan-Anoden in der Chloralkali- und der elektro-chemischen Industrie genutzt.

Ruthenium war lange Zeit das günstigste der Platingruppenmetalle. Die Preisbildung wird vor allem durch plötzliche Nachfrageänderungen, z.B. durch technische Neuentwicklungen, in Zusammenhang mit dem niedrigen Gesamtangebot beeinflusst.

Es gibt weltweit keine Mine, die nur zur Gewinnung von Ruthenium abgebaut wird. Die Produktion wächst oder sinkt im Einklang mit der Primärproduktion des Hauptprodukts (Platin, Nickel) im jeweiligen Verhältnis der Erzgehalte. Diese Eigenschaft als Koppelprodukt und das, verglichen mit der Weltjahresnachfrage höhere Ruthenium-Platin-Verhältnis im Erzgehalt, führen zu dem vermuteten großen Überschuss auf der Angebotsseite, was das relativ niedrige Preisniveau erklärt. Des Weiteren ist in diesem Zusammenhang zu vermuten, dass sich größere Lagerbestände angehäuft haben.

Die Nachfrage nach Ruthenium wird in den nächsten Jahren vermutlich weiter steigen. Für 2007 sagt der Londoner Edelmetallhändler Johnson Matthey wie schon in den Vorjahren einen weiterhin steigenden Weltverbrauch voraus. Diesem Anstieg liegt weiterhin eine starke Zunahme im Bereich der Elektronikindustrie zugrunde, dem größten Verbraucher von Ruthenium.

Jedoch ist auch eine hohe Steigerung der Nachfrage nach den anderen Platingruppenmetallen sehr wahrscheinlich, was zur weiteren Ausweitung der Produktionskapazitäten führen wird. Wegen der beschriebenen Eigenschaft als Koppelprodukt müsste auch der Abbau von Ruthenium diesem Trend folgen und die Primärproduktion deshalb zunehmen.

Das Verhältnis der Weltjahresnachfrage von Platin zu Ruthenium von 9:1 übersteigt jedoch das Verhältnis des Erzgehalts dieser beiden Metalle (durchschnittliches Verhältnis im UG2-Reef von 3,5:1) deutlich. Daher ist auch weiterhin mit einem Angebotsüberschuss für Ruthenium zu rechnen.

Im Zuge der kontinuierlichen Nachfragesteigerung wird der Preis für Ruthenium im Durchschnitt jedoch sicherlich steigen. Das momentan verhältnismäßig niedrige Preisniveau müsste aber auch in Zukunft prinzipiell gehalten werden, sollte es nicht zu einer gewaltigen Steigerung der Nachfrage kommen. Diese könnte sich langfristig durch den Einsatz in der Brennstoffzelle

ergeben, diese Aussage ist aber mit großen Unsicherheiten verknüpft (siehe Kapitel 3.7, Zukünftige Entwicklung). In Zusammenhang mit dem niedrigen Gesamtangebot sind weiterhin starke Preisschwankungen zu erwarten.

Der Ruthenium-Farbstoff cis-di(thiocyanato)-N, N'-bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)Ru(II) – kurz N-3 genannt - ist ein essentieller Bestandteil von Farbstoffsolarzellen. Die Verfügbarkeit von Ruthenium stellt einen wichtigen Aspekt für die kommerzielle Herstellung und Vermarktung von Farbstoffsolarzellen dar. Für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen sollte jedoch es zu keiner Angebotslimitierung des Rutheniums kommen: Für die Produktion von 100.000 Modulen der Größe von 0,6m² würden insgesamt 42 kg Ruthenium-Farbstoff benötigt, mit einem Anteil von ca. 4,2 kg Ruthenium. In dieser Größenordnung entstünde bei einer Weltjahresproduktion von vermutlich über 40t vermutlich kein Engpass.

5.1.2 Umweltwirkung

5.1.2.1.1 Sicherheit und Gesundheit

Aufgrund des derzeitigen Kenntnisstandes und der Literatur lässt sich feststellen, dass vom Rohstoff Ruthenium und vom Farbstoff N-3 keine gesundheitlichen oder sicherheitstechnischen Risiken ausgehen. Vor allem erbgut-schädigende Langzeiteffekte des Farbstoffes können aufgrund des durchgeführten AMES-Testes ausgeschlossen werden (siehe 4.2.2). Lediglich das bei der Raffination von Ruthenium sich bildende Ruthenium(VIII)-oxid RuO₄ besitzt ein hohes Toxizitäts- und Explosionspotential, es sollte daher geprüft werden, ob dieser Stoff während des Herstellungsprozesses, in der Nutzungsphase oder beim Recycling/Entsorgen entstehen kann (vgl. 4.3).

5.1.2.1.2 Ressourcenverbrauch

Ruthenium hat – wie die anderen Platinmetalle auch – in doppelter Hinsicht eine hohe Umweltrelevanz. Zum einen führt ihr Einsatz häufig zur Verbesserung der Energieeffizienz eines Produktes oder einer Dienstleistung oder zur Verringerung von Schadstoffemissionen (Autokatalysator). Viele Prozesse wären ohne Platinmetalle gar nicht möglich. Im Fall der Farbstoffsolarzelle soll unter anderem eine verbesserte Energieamortisationszeit erreicht werden. Zum anderen erfordert die bergbauliche Gewinnung aus rohstoffarmen, meist schwefelhaltigen Erzen sowie die aufwändigen Aufbereitungsprozesse einen hohen Ressourcenverbrauch und die damit verbundenen hohen Mengen an Emissionen und Abfällen. Es muss also von Fall zu Fall abgewogen werden, ob die gewonnene positive Errungenschaft bezüglich der Umweltwirkungen höher zu bewerten ist, als die sich aus der Bereitstellung des Rohstoffes ergebenden Umweltbelastungen.

In der Farbstoffsolarzelle dient der auf Ruthenium basierende Farbstoffkomplex zur Lichtabsorption, ist also einer der wichtigsten Bestandteile überhaupt. Eine Solarzelle erzeugt Strom ohne jeglichen Einsatz von Brennstoffen und damit verbundenen Emissionen von Abgasen oder Erzeugung von Abfällen. Negative Umweltwirkungen können sich daher nur auf vor- oder nachgelagerten Stufen des Lebenszyklus der Farbstoffsolarzelle ergeben, also bei den Rohstoffbereitstellungen, der Produktion oder dem Recycling²⁸. Der Ressourcenverbrauch im Bereich Rohstoffbereitstellungen lässt sich mit der MIPS-Methode abschätzen. Dabei zeigt sich, dass der hohe Aufwand für die Rutheniumbereitstellung durch die insgesamt nur geringen eingesetzten Mengen relativiert wird und Ruthenium nur einen geringen Anteil am MIPS-Wert der gesamten Zelle hat. Das selbe gilt für Platin, das auch ein wichtiger Bestandteil der Farbstoffsolarzelle ist. Innerhalb der Farbstoffsolarzelle hat das Glas aufgrund der benötigten hohen Masse die höchste Ressourcenrelevanz (vgl.4.4).

²⁸ Dies wird im Rahmen des Projektes ColorSol eingehend untersucht. Diese Studie dient unter anderem zur Bereitstellung von Werten für Ruthenium und Platin für den Teil „Rohstoffbereitstellungen“.

6 Zusammenfassung der wichtigsten Daten

Förderländer	Vor allem Südafrika (ca. 2/3), sowie Russland, Kanada und USA
Durchschnittlicher Erzgehalt	0,3g/t - 1g/t
Besonderheit bei der Förderung	Nebenprodukt des Platinabbaus (Südafrika, USA) oder Nickelabbaus (Russland, Kanada)
Nettonachfrage	40t (vgl. Platin: 205t; Gold: 2500t;)
Produktion	Keine Daten verfügbar, vermutlich höher → s.h. Studie Kap. 3.3
Einfuhr nach Deutschland	3,5t (geschätzt)
Erwarteter Jahresbedarf (108000 Module; 0,6*1m ²)	4,34 kg
Durchschnittlicher Preis	1850 €/kg ²⁹
Zwischenhoch (bis Nov. 2006)	ca. 4250 €/kg (Mitte 2000)
Allzeittief	ca. 450 €/kg (1994)
Allzeithoch	ca. 22000 €/kg (Feb. 2007)
Zwischentief	ca. 750 €/kg (Mai 2003)
Hauptverbraucher	Elektronikindustrie (ca. 2/3) sowie Chemische und Elektrochemische Industrie ³⁰
Prognose der Nachfrageentwicklung	Steigend
Prognose der Produktionsentwicklung	Steigend
Gesundheitsgefährdung des Rohstoffes	Keine bekannt
Gesundheitsgefährdung des Farbstoffes	Keine bekannt
Sicherheitsgefährdung des Rohstoffes	Keine bekannt
Sicherheitsgefährdung des Farbstoffes	Keine bekannt
Umweltbelastung des Rohstoffes	Hoher Ressourcenverbrauch bei Abbau und Weiterverarbeitung (MIT: 60000kg/kg)
Relativer Anteil der Umweltbelastung innerhalb FSZ	Klein, da sehr geringe Mengen benötigt werden

Tabelle 8: Zusammenfassung der wichtigsten Daten, bezogen auf das Jahr 2006

²⁹ Die Aussagekraft des Durchschnittspreises ist eingeschränkt, bei Rohstoffen im Allgemeinen und so seltenen wie Ruthenium im Besonderen unterliegt der Preis starken Schwankungen

³⁰ Widerstandspaste in Halbleiterbauteilen -> steckt also in fast allen elektronischen Anwendungen (PCs, Handys, Autoelektronik,...) -> Hauptgrund für steigende Nachfrage seit ca. '99

7 Informationsbeschaffung

Wie in der Studie erwähnt, existiert aufgrund seiner Seltenheit nur wenig Literatur zu Ruthenium selbst, Informationen sind wegen seiner Kopplung an Platin meist im Zusammenhang mit diesem zu finden. Die nach Kenntnisstand der Autoren dieser Arbeit besten verfügbaren Quellen im Zusammenhang mit Gewinnung, Verwendung und Nachfrage von Ruthenium sind die zweimal jährlich erscheinenden Berichte der Londoner Edelmetallhändler Johnson Matthey sowie deren Homepage.

http://www.platinum.matthey.com/analyst_index.html

8 Literatur

- ACI Alloy Sicherheitsdatenblatt der Firma ACI Alloy, im Internet verfügbar unter: <http://www.acialloys.com/msds/ru.html>
- Becker 2004 Becker, Claus (2004). Ruthenium-Fluorokomplexe und Ruthenium-Katalysierte Asymmetrische Fluorierungsreaktionen. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule.
- Binnewies et al. 2004 Binnewies, M., M. Jäckel, et al. (2004). Allgemeine und anorganische Chemie. München, Elsevier GmbH.
- de Vries et al. 2000 de Vries, J. G., B. J. R. Scholtens, et al. (2000). Negative Ames-Test of cis-di(thiocyanato)-N, N'-bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)Ru(II), the sensitizer dye of the nanocrystalline TiO₂ solar cell, Elsevier Science B.V.
- Degussa 1995 Degussa (1995). Edelmetalltaschenbuch. Heidelberg, Hüthig.
- Deutsche Bank 2005 Deutsche Bank (2005). "Edle Zukunft" - Platin und Palladium als Allzweckmittel, Deutsche Bank, X-Markets.
- DMESA 2002 Jonck, M., N. Van Averbek, et al. (2003). South Africa's Mineral Industrie 2002/2003. Pretoria, Republic of south Africa; Department of Minerals and Energy.
- Erzmetall GDMB Gesellschaft für Bergbau, M., Rohstoff- und Umwelttechnik (2001 - 2004). "Erzmetall."
- Frost 2005 Frost and Sullivan (2005). Advances in Portable Power and Gen Sets (Technical Insights).
- Frost 2006 Frost and Sullivan (2006). "World Advances in Microfuel Cell Technology (Technical Insights)."
- GDL Gefahrstoffdatenbank der Länder
- GESTIS Gefahrstoffdatenbank GESTIS, Deutsches berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz., im Internet verfügbar unter: <http://www.hvbg.de/d/bia/gestis/stoffdb/index.html>
- Greenwood et al. 1990 Greenwood, N. N. and A. Earnshaw (1990). Chemie der Elemente. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft.
- GFMS 2006 (2006). Platinum & Palladium Survey. London, GFMS Group.

Hagelüken et al. 2005	Hagelüken, C., M. Buchert, et al. (2005). Stoffströme der Platingruppenmetalle. Clausthal-Zellerfeld, GDMB Medienverlag.
Hochfeld 97	Hochfeld, C. (1997). Bilanzierung der Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Platingruppen-Metallen für Pkw-Abgaskatalysatoren, TU Berlin.
IGS	Informationssystem für gefährliche/umweltrelevante Stoffe des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen.
Implats 05	(2005). Annual Report, Impala Platinum Holdings Ltd.
Johnson Matthey	Name bzw. Titel des Internetberichts, im Internet verfügbar unter http://www.platinum.matthey.com/analyst_index.html , Stand 26.07.2006
JM 1999 IR	(1999). Platinum 1999 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2000 IR	(2000). Platinum 2000 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2000	(2000). Platinum 2000. London, Johnson Matthey.
JM 2001 IR	(2001). Platinum 2001 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2001	(2001). Platinum 2001. London, Johnson Matthey
JM 2002 IR	(2002). Platinum 2002 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2002	(2002). Platinum 2002. London, Johnson Matthey
JM 2003 IR	(2003). Platinum 2003 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2003	(2003). Platinum 2000. London, Johnson Matthey
JM 2004 IR	(2004). Platinum 2004 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2004	(2004). Platinum 2004. London, Johnson Matthey
JM 2005 IR	(2005). Platinum 2005 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2005	(2005). Platinum 2005. London, Johnson Matthey
JM 2006 IR	(2006). Platinum 2006 Interim Review. London, Johnson Matthey.
JM 2006	(2006). Platinum 2006. London, Johnson Matthey
JM 2007	(2007). Platinum 2007. London, Johnson Matthey

Seuffert 2006	Seuffert, J. (2006). Aufskalierung von spezifischen Herstellungsprozessen für Farbstoffsolarzellen. <u>Maschinenbau</u> . Stuttgart, Universität Stuttgart.
StaBA 2006	Schriftliche Information durch das Statistische Bundesamt, 10.05.2006
USGS 04	Wilburn, D. R. and D. I. Bleiwas (2004). Platinum Group Metals - World Supply and Demand, United States Geological Survey.
WI 2003	Wuppertal Institut für Klima, E. u. U. (2003). Material Intensity of materials, fuels, transport services.

9 Anhang

9.1 Allokation für Südafrika

	Einheit	Gesamtprozess Südafrika	davon Pt	davon Pd	davon Rh	davon Ru	davon Ir	davon Au	davon Ni	davon Cu
Anteil am Gesamtwert	-	1	0,5355	0,1635	0,1439	0,0122	0,0099	0,0217	0,0972	0,016
Anteil Masse	-	1	0,4905	0,3015	0,0585	0,096	0,02175	0,03125	147	103
Input										
Erz	kg/kg	282500	308417	153197	694902	35901	128586	196168	186,796	43,8835
Wasser	kg/kg	170000	185596	92189,1	418171	21604,2	77379,3	118048	112,408	26,4078
Strom	kWh/kg	23260	25393,9	12613,6	57215,6	2955,96	10587,3	16151,7	15,3801	3,6132
Gas	kJ/kg	800000	873394	433831	1967863	101667	364138	555520	528,98	124,272
Output										
Luft										
CO2	kg/kg	21370	23330,6	11588,7	52566,5	2715,77	9727,03	14839,3	14,1304	3,31961
CH4	kg/kg	76,4	83,4092	41,4308	187,931	9,70917	34,7752	53,0522	0,05052	0,01187
SO2	kg/kg	335	365,734	181,667	824,043	42,5729	152,483	232,624	0,22151	0,05204
NOx	kg/kg	143,7	156,883	77,9269	353,477	18,2619	65,4083	99,7853	0,09502	0,02232
N2O	kg/kg	1,2	1,31009	0,65075	2,95179	0,1525	0,54621	0,83328	0,00079	0,00019
HCL	kg/kg	10	10,9174	5,42289	24,5983	1,27083	4,55172	6,944	0,00661	0,00155
HF	kg/kg	0,9	0,98257	0,48806	2,21385	0,11438	0,40966	0,62496	0,0006	0,00014
NMVOOC	kg/kg	1,4	1,52844	0,7592	3,44376	0,17792	0,63724	0,97216	0,00093	0,00022
Staub	kg/kg	18,9	20,6339	10,2493	46,4908	2,40188	8,60276	13,1242	0,0125	0,00294
CO	kg/kg	16,6	18,1229	9,00199	40,8332	2,10958	7,55586	11,527	0,01098	0,00258
CO2-Äquivalent	kg/kg	23640	25808,8	12819,7	58150,4	3004,25	10760,3	16415,6	15,6313	3,67223
SO2-Äquivalent	kg/kg	446	486,917	241,861	1097,08	56,6792	203,007	309,702	0,29491	0,06928
Feststoff										
Abraum	kg/kg	15990	17457	8671,19	39332,7	2032,06	7278,21	11103,5	10,573	2,48388
Tailings	kg/kg	230000	251101	124726	565761	29229,2	104690	159712	152,082	35,7282
Schlacke	kg/kg	7710	8417,34	4181,04	18965,3	979,813	3509,38	5353,82	5,09804	1,19767
Sonderabfall	kg/kg	3,5	3,8211	1,89801	8,6094	0,44479	1,5931	2,4304	0,00231	0,00054
Asche	kg/kg	16500	18013,8	8947,76	40587,2	2096,88	7510,34	11457,6	10,9102	2,56311
REA-Rest	kg/kg	4100	4476,15	2223,38	10085,3	521,042	1866,21	2847,04	2,71102	0,63689
MI - abiotisches Material	kg/kg	282500	308417	153197	694902	35901	128586	196168	186,796	43,8835
MI - Wasser	kg/kg	170000	185596	92189,1	418171	21604,2	77379,3	118048	112,408	26,4078
MI - Luft	kg/kg	24086	26295,7	13061,6	59247,4	3060,93	10963,3	16725,3	15,9263	3,74151
MIT	kg/kg	476586	520309	258447	1172320	60566,1	216929	330941	315,13	74,0328

Tabelle 9: Allokation für Südafrika