
Verfügbarkeit, Knappheit und Nutzung der nicht-erneuerbaren Ressource Neodym: Darstellung anhand der Hotelling-Regel

Rafael Bramreiter und Anselm Balk

Studierende an der Karl-Franzens-Universität Graz,

IP - Das Netzwerk der "Seltenen Erden" am Beispiel von Neodym, WS 2014

1 Einleitung

Hört man den Namen Neodym, so können viele nicht sehr viel mit diesem Begriff anfangen. Doch warum widmet man sich einem Begriff, der, wie es scheint, im allgemeinen Wortschatz nicht angekommen ist? Und ist das Desinteresse gerechtfertigt? Diese und andere Fragen soll in dieser Arbeit geklärt werden.

Neodym befindet sich auf Platz 60 des Periodensystems der Elemente und gehört damit zu den leichten Erden (Seilnacht o.J.). Das Element ist stark magnetisch und wird vor allem im zurzeit stark wachsenden Bereich der erneuerbaren Energien verwendet. Genauer, in den Generatoren der Elektromotoren. Mit Hilfe dieses starken Magneten können hohe Wirkungsgrade erzielt werden, ohne eine sehr viel komplexere und damit teurere Technik einsetzen zu müssen, so kann beispielsweise unter Beihilfe von Neodym in einem Windrad auf ein Getriebe verzichtet werden (ARD Panorama 2011). Durch die Verwendung der Magneten können also erhebliche Kosten eingespart werden. Zudem reduziert die Verwendung von Neodym Gewicht, was speziell im Elektromobilitätsbereich von Relevanz ist. Doch gehört Neodym nicht nur zu den leichten-, sondern zudem zu den Seltenen Erden. Wobei Seltene Erden prinzipiell nicht selten sind, nur kommen sie sehr selten in einer so hohen Konzentration vor, die es erlaubt, Seltene Erden gewinnbringend zu fördern (Öko-Institut 2011).

Lange Zeit wurde auf die Förderung kein besonders großes Gewicht gelegt, denn Neodym wurde vor dem Elektrozeitalter nur im unerheblichen Maße benötigt und die wenigen Mienen die Neodym förderten, förderten genug, die Preise waren niedrig. Doch spätestens seit dem Jahr 2007 ist ein starker Preisanstieg des Rohstoffes zu verzeichnen (Institut für seltene Erden und Metalle 2012).

Mit der Frage, nach den Gründen für diese Preis- und Förderänderung der letzten Jahre, widmet sich Kapitel 2. Dabei wird ersichtlich, dass es in dieser Zeit zu drei Phasen mit unterschiedlichen Markt- und Nachfragesituationen gekommen ist. In Phase eins, von 2001 bis 2009, nahm China mit 95 % Marktanteil eine Monopolstellung ein (Buchert et al. 2011). Danach kam es ab 2009, Phase zwei, zu einem Anstieg der Nachfrage nach Neodym, unter anderem aufgrund der Äußerung seitens Chinas, die Neodymexporte zu beschränken (Beschaffung aktuell o.J.) und darauf folgenden Hamsterkäufen (Magnets4you o.J.). Schließlich stieg dadurch der Preis für Neodym so stark an, dass es für andere Regionen wieder rentabel wurde Neodymminen zu betreiben, was zu einem Übergang von einem Monopolmarkt zu einem Markt unter vollkommenem Wettbewerb führte. Durch diesen Anstieg des Angebots kam es ebenfalls zu einem Rückgang der Nachfrage nach Neodym und zu Phase drei (Beschaffung aktuell o.J.).

Darüber hinaus soll untersucht werden, wie sich der Neodympreis- und der Neodymextraktionspfad aufgrund der historischen Entwicklung in der Zukunft gestalten könnte. Hierzu wird auf das Hotelling-Modell zurückgegriffen, welches zunächst in Kapitel 3 vorgestellt wird. Kapitel 4 gibt Aufschluss darüber, wie man das Hotelling-Modell in Mathematica, dem verwendete Computeralgebrasystem, umsetzen kann.

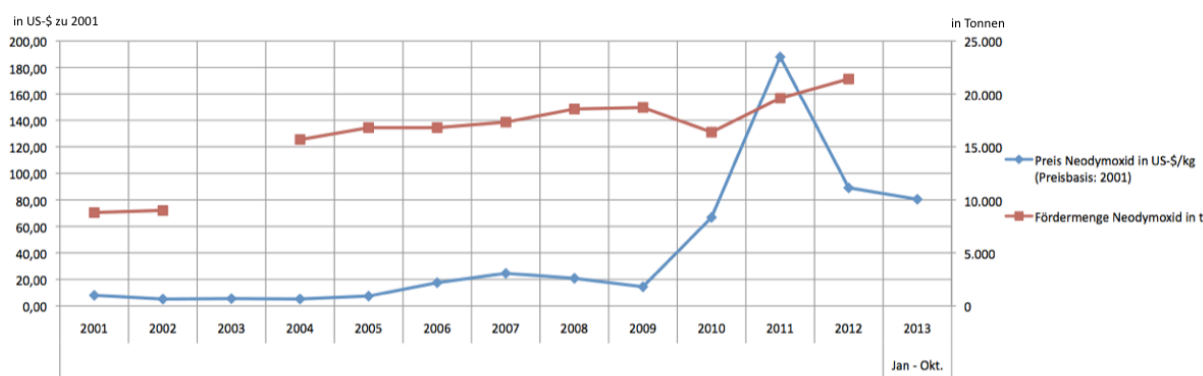
In Kapitel 5 kommt es zur Berechnung der in Kapitel 2 beschriebenen Phasen der Preisentwicklung. Dabei wird vor allem darauf eingegangen, welche Änderungen für den Ressourcen- und Preispfad entstehen, wenn sich die Markt- oder Nachfragesituation ändert. Schließlich wird in Kapitel 5 das Hotelling-Modell für Neodym unter den getroffenen Annahmen als 4-Quadrantenschema dargestellt.

2 Neodymoxid: Preise und Fördermenge

Da es sehr schwierig ist, verlässliche Daten über den Preis und ganz besonders über die Fördermengen von Neodymoxid zu finden, kann nicht für die absolute Korrektheit der Daten gebürgt werden, doch wurden diese nach bestem Wissen und Gewissen gesucht, gefunden und verwertet.

Da die auffindbaren Preise teilweise widersprüchlich sind, einer hohen Varianz unterliegen und zudem lediglich die nominellen Preise angegeben sind, werden für die Betrachtung jährliche Durchschnittspreise verwendet. Die Preisangaben der Jahre 2011 bis 2013 entstammen der Website der deutschen Rohstoffagentur (Deutsche Rohstoffagentur o.J.). Die Preise des aus 2004 und den Zeitraum zwischen 2007 bis 2010 stammen vom „Institut für seltene Erden und Metalle“ (Institut für seltene Erden und Metalle 2012). Die Preisangaben der Jahre 2001 bis 2004, 2004 und 2006 beruhen auf Schätzungen des „Öko-Institut e.V.“ (Öko-Institut e.V. 2011). Diese Rohdaten wurden um die US-Inflation der Jahre 2002 bis 2013 bereinigt (US Inflation Calculator 2014). Dabei wurde das Jahr 2001 als Basisjahr verwendet. Die in Abbildung 1 verwendeten jährlichen Durchschnittspreise entsprechen somit den realen Preisen des Jahres 2001.

Abbildung 1. Preis und Fördermenge für Neodymoxid



Quelle: eigene Ausarbeitung, basierend auf Daten von Deutsche Rohstoffagentur o.J., Institut für seltene Erden und Metalle 2012, Öko-Institut e.V. 2011 und US Inflation Calculator 2014

2.1 Diagrammbetrachtung

Betrachtet man die aus den uns zur Verfügung stehenden Daten erstellte Abbildung 1 so ist festzustellen, dass sich die Preise zwischen 2001 und 2005 nur sehr geringfügig änderten, die Fördermenge jedoch stark anstieg. Dies kann darauf hin deuten, dass in dieser Zeit die

Förderung besonders im Hauptexporteurland China stark ausgebaut werden konnte ohne mit einhergehenden steigenden Förderkosten konfrontiert zu werden, da noch genug freie Kapazitäten vorhanden waren (Keane 2010).

Über die Jahre 2005 bis 2009 ist ein mäßiger Preisanstieg zu verbuchen, auch die Fördermenge nahm leicht zu. Die lange brachliegenden Kapazitäten wurden in den letzten Jahren 2001 bis 2005 aufgebraucht und es wurde schwieriger den erhöhten Bedarf an Neodym zu stillen. Neue Technologien wurden eingesetzt und neue Anlagen in Betrieb genommen, was kostspielig war und zu dem beobachteten Preisanstieg führt. Die gestiegene Fördermenge lässt sich mit der zunehmenden Nachfrage nach neodymhaltigen Produkten und Anlagen erklären. Zu diesen Produkten gehören: Katalysatoren, Handys, Plasmabildschirme, Festplatten, Batterien, MP3-Spieler, Windkraftturbinen, Elektromotoren und Energiesparlampen. Wachstum und Bedarf sind in den Zukunftstechnologiebranchen: Elektromotoren und Windkraftturbinen besonders stark (Hilpert et al. Mai 2011).

Zwischen 2007 und 2009 ist ein leichter Preisrückgang zu verbuchen, welcher der Weltwirtschaftskrise des Jahres 2008 und seinen gesamtwirtschaftlichen Folgen zuzuschreiben ist. 2009 stellt den Wendepunkt dieser Entwicklung dar. Zwischen 2009 und 2011 kommt es zu einer regelrechten Preisexplosion, in diesen drei Jahren verneunfacht sich der Preis des Neodymoxids. Dieser rasante Anstieg ist zum einen auf das nun starke Anziehen der Konjunktur zurückzuführen (Angerer et al. 2009). Aber auch andere Faktoren können für diesen Preisanstieg verantwortlich gemacht werden: (1) es kam zwischen 2009 und 2010 zu einem Rückgang der Fördermenge um ca. 2.300 Tonnen Neodymoxid. Dies entspricht in etwa der Fördermenge des Jahres 2004. (2) Zum anderen kündigte China höhere Umweltauflagen bei der Förderung von Seltenen Erden an, was die Extraktionskosten deutlich erhöhen wird (Focus 2011). Zudem werden in China (3) Exportbeschränkungen auf Seltene Erden angedacht. Anfang 2011 wurden diese Überlegungen in die Tat umgesetzt, was zur Folge hatte, dass die chinesischen Exporte für Seltene Erden um 35% sanken (Beschaffung aktuell o.J.).

Da China derzeit über 95% der weltweit benötigten Seltenen Erden fördert, führten diese Exportbeschränkungen zu „Hamsterkäufen“ in der westlichen Welt, da man erkannte, wie abhängig man von China und deren Neodym ist, deshalb wurden strategische Reserven angelegt (Magnets4you o.J.). Da die Mehrzahl der chinesischen Mienenkonzerne in staatliche Hand liegt, konnten diese aufgrund ihrer Monopolstellung bisher beinahe frei über den Verkaufspreis verfügen. Wie sich der monopolistische Markt auf den Preis- und Extraktionspfad des Neodymoxids auswirkt, wird in Kapitel 5 gezeigt.

Ein weiterer Faktor der zum starken Preisanstieg führte, ist (4) der steigende Eigenverbrauch Chinas, der aufgrund des wachsenden Einsatzes an erneuerbaren Energien stark zunimmt (Magnets4you o.J.).

Da China eigentlich „nur“ über 1/3 der weltweiten Vorkommen an Neodym verfügt und damit keine auf Dauer haltbare Monopolstellung inne hat, geht man davon aus, dass sich die Preisentwicklung langfristig entspannen wird, da es durch die hohen Preise lohnend wird, neue Förderstätten in Betrieb zu nehmen. Es ist also davon auszugehen, dass sich der

Markt, von der heutigen Monopolstellung Chinas hin zu einem vollkommeneren Wettbewerb entwickelt. Experten gehen deshalb von einer Lageentspannung bis zum Jahr 2015 aus (Beschaffung aktuell o.J.). Wie sich ein vollkommener Wettbewerb auf den Preis- und Extraktionspfad des Neodyms auswirken wird, zeigt ebenfalls Kapitel 5.

Der von den Experten prognostizierte Trend, dass sich der Neodympreis weiter entspannen wird, scheint sich in den Jahren 2011 bis 2013 tatsächlich zu bestätigen. Der Neodympreis sank stark und stabilisierte sich auf hohem Niveau. Im Oktober 2013 lag er bei ca. 80 US-\$. Dieser Wert entspricht einer Vervierfachung des Preises im Vergleich zum Jahr 2009 (Abbildung 1).

Generell ist zu sagen, dass die Preisentwicklung auch innerhalb der einzelnen Jahre sehr volatil ist, eine genau Voraussage über die zukünftige Entwicklung dürfte deshalb sehr schwierig sein, zumal die Verwendung des Neodyms in der Elektrobranche bei steigender Elektromobilität rasant steigen könnte. Sollte der Neodympreis auf einem niedrigen Niveau stagnieren oder weiter fallen, dürften einige der geplanten Neodymförderprojekte unrentabel werden, was die Investition in entsprechende Anlagen höchst risikoreich werden lässt. Einige Experten sehen deshalb den Preis- und Förderpfad der Seltenen Erden als einen Zyklus, der zwischen Monopol- und Wettbewerbsmarkt oszilliert (Zaruma Resources Inc. 2010).

2.2 Drei Phasen der Markt- und Nachfragesituation

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich aus Abbildung 1 drei Phasen abzeichnen. Wie bereits dargestellt, liegt die erste Phase zwischen den Jahren 2004 und 2010, China übernimmt den Markt für Seltene Erden, wird zum Hauptexporteur und Monopolisten. Aufgrund der gleichbleibenden Nachfrage bleiben die Preise stabil. Dies ändert sich in Phase zwei. Die Nachfrage steigt und damit die Preise, im Jahr 2011 kommt es aufgrund der oben angeführten Faktoren zu einer regelrechten Preisexplosion. Doch nicht nur China profitiert von diesen gestiegenen Preisen, auch für andere Marktteilnehmer außerhalb Chinas wird es interessant Seltene-Erd-Mienen (wieder) in Betrieb zu nehmen. Die Monopolstellung Chinas wird brüchig. Aufgrund des gestiegenen Angebots sinken die Preise bei gleichzeitiger Erhöhung der Fördermenge. In Phase drei zeichnet sich schließlich ein Übergang zu vollkommenem Wettbewerb ab, was dazu führt, dass die Fördermenge weiter steigt und die Preise sinken. Doch ob dieser vollkommene Wettbewerb auf Dauer haltbar ist, ist fraglich, kann es doch vorkommen, dass die Preise so weit sinken, dass es für einzelne Anbieter nicht mehr lohnend ist Seltene Erden weiter zu fördern. Dieser Prozess kann über einen Oligopolmarkt, wieder zurück zu einem Monopolmarkt führen und es kommt zu der bereits oben genannten oszillierenden Marktentwicklung.

Da es, wie bereits angeführt, kaum möglich ist, exakte Angaben über die Fördermengen von Neodymoxid zu bekommen, wurden die leichter zu beschaffenden Fördermengen der Seltenen Erden verwendet. Zur Ermittlung der Neodymförderung wurde der durchschnittliche prozentuelle Anteil des Neodyms an den Seltenen Erden verwendet. In China beträgt dieser 15%, da dieser Neodymanteil nicht in allen Seltene-Erd-Förderstätten erreicht wird, Chinas Marktanteil in Bezug auf die Förderung von Seltenen Erden mit über 95% aber klar

dominiert, wird ein durchschnittlicher Neodymanteil von $\approx 14\%$ angenommen (Buchert et al. 2011).

Die Daten über die Fördermengen stammen für die Jahre 2001, 2002 und 2004 bis 2006 aus der Rare Earth Study vom Januar 2011 des Öko-Institut (Buchert et al. 2011). Die Werte der Jahre 2007 bis 2013 beruhen auf Angaben der Industrial Minerals Company of Australia (Kingsnorth 2011).

3 Die Entwicklung des Preis- und Extraktionspfades einer nicht-erneuerbaren Ressource in der Theorie – Ein Erklärungsversuch: das Hotelling-Modell

Das Hotelling-Modell wurde 1931 von Harold Hotelling entwickelt und gibt Aufschluss darüber, wie eine nicht-erneuerbare Ressource über einen endlichen Zeithorizont optimal genutzt werden kann (Perman et al. 2011).

Möchte man sich den Preis- und Extraktionspfad einer nicht-erneuerbaren Ressource erschließen, so muss man für die weitere Untersuchung folgende Annahmen treffen. Man hat es mit Akteuren zu tun, die eine optimale Ressourcenextraktion über die Zeit anstreben. Zudem ist die Menge der zur Verfügung stehenden Ressource bekannt und begrenzt, da es sich um einen nicht-erneuerbaren Rohstoff handelt. Eine Ressource gilt als nicht-erneuerbar oder erschöpflich, wenn sich die Ressource nicht oder nur langsam über einen sehr langen Zeitraum erneuern kann. Dazu zählt unter anderem Erdöl oder eben das in dieser Arbeit untersuchte Neodym. Zudem steigen die Förderkosten über die Zeit und es gibt die Möglichkeit auf Substitute umzusteigen, wenn die Kosten der nicht-erneuerbaren Ressource zu sehr gestiegen sind und es sich ökonomisch lohnt, auf andere Materialien umzusatteln. Dieser Preis, bei dem die Ressource nicht mehr nachgefragt wird, wird als Reservationspreis (K , choke price) bezeichnet (Perman et al. 2011).

Im Hotelling-Modell bezeichnet P den Nettopreis der nicht-erneuerbaren Ressource (netto, da die Extraktionskosten bereits abgezogen wurden). $P(R)$ ist die Preis-Absatz-Funktion. Der Preis der Ressource hängt von der geförderten Menge R ab. Der soziale Nutzen der Gesellschaft bei Konsum eines Teils von R kann als folgende Funktion dargestellt werden:

$$U(R) = \int_0^R P(R) dR \quad (1)$$

wobei die Nachfragekurve nicht linear ist, da der Nutzen um die Diskontrate ρ über die Zeit abnimmt. Deshalb muss die soziale Wohlfahrt um die Diskontrate ρ über die Zeit abgezinst werden (Perman et al. 2011). Daraus ergibt sich folgende diskrete Funktion:

$$W = \sum_0^T \frac{U(R_t)}{(1 + \rho)^t} \quad (2)$$

Die Wohlfahrt nimmt um ρ über die Zeit ab.

Im Folgenden soll die soziale Wohlfahrt über die Zeit maximiert und berechnet werden. Berechnet werden soll also die optimal zu konsumierende Menge der Ressource R zwischen den Zeitpunkten $t = 0$ und dem letzten Zeitpunkt $t = T$, damit die Ressource ein Maximum der sozialen Wohlfahrt generiert (Perman et al. 2011).

Mathematisch gesehen, wird also:

$$\max W = \sum_0^T \frac{1}{(1 + \rho)^t} \frac{K}{a} (1 - e^{-aR}) \quad (3)$$

unter der Bedingung:

$$\sum_0^T R_t = \bar{S} \quad (4)$$

gesucht.

Der Konsum über den Zeitraum $t = 0$ bis $t = T$ entspricht der vorhandenen Menge der endlichen Ressource in (4), also S_0 dem Anfangsbestand der Ressource zum Zeitpunkt 0, wobei in (3) a der Steigung der Nachfrage entspricht (Perman et al. 2011).

Soll die Wohlfahrt optimiert werden, so muss der Verbrauch der Ressource R über die Zeit so gewählt werden, dass die in (3) ermittelte maximale Wohlfahrt über die Zeit stets konstant bleibt. Hotelling's Effizienzbedingung besagt dabei, dass der Nettopreis P der nicht-erneuerbaren Ressource um genau den Wert ρ steigen muss, wenn der soziale Nutzen der Ressource maximiert werden soll (Perman et al. 2011).

Um die optimalen Extraktionswerte ermitteln zu können, benötigt man, neben den bereits oben genannten Parametern, zusätzlich den Ressourcenpreis sowie die Gesamtnutzungsdauer, über die wir die Ressourcenextraktion optimieren möchten (Perman et al. 2011).

Um herauszufinden, welche Ressourcenextraktion vom Zeitpunkt $t = 0$ bis $t = T$ optimal ist, muss bekannt sein, welche Werte P und R zum Zeitpunkt T einnehmen, diese Werte ergeben sich, aus Formel (3) (Perman et al. 2011).

Um diese Variablen zu erhalten, benötigen man die Nachfragefunktion der Ressource, welche mit

$$P(R) = Ke^{-aR}$$

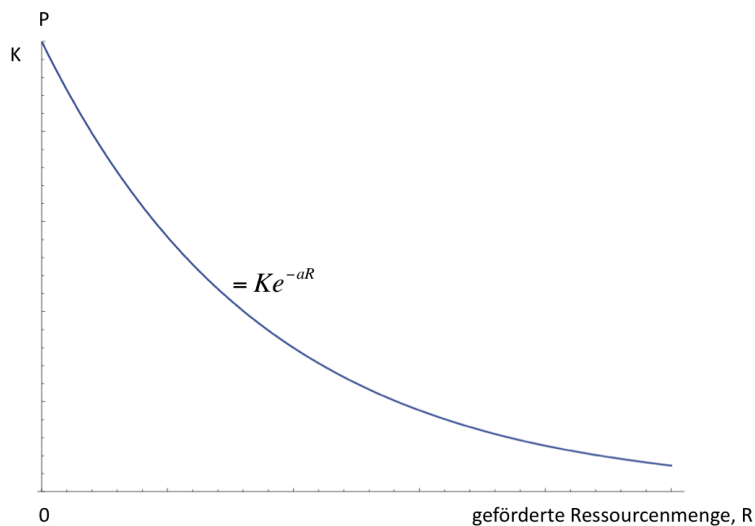
angenommen wird. Abbildung 2 verdeutlicht die zuvor beschriebenen Zusammenhänge.

Der Preis P an der Stelle $R = 0$ ist K . Dieser Wert wird, wie bereits in der Einführung beschrieben, als Reservationspreis bezeichnet. Zu diesem Preis ist kein Akteur mehr bereit die Ressource zu kaufen (Perman et al. 2011).

Ist die Ressourcennachfragefunktion, Hotelling's Effizienzbedingung und der Anfangs- und Endwert des Ressourcenbestandes bekannt, so kann man die optimale Preis- und

Extraktionskurve ermitteln. Der Ressourcenendbestand sollte, wenn die Werte korrekt sind, zum Endzeitpunkt vollkommen aufgebraucht sein (Perman et al. 2011).

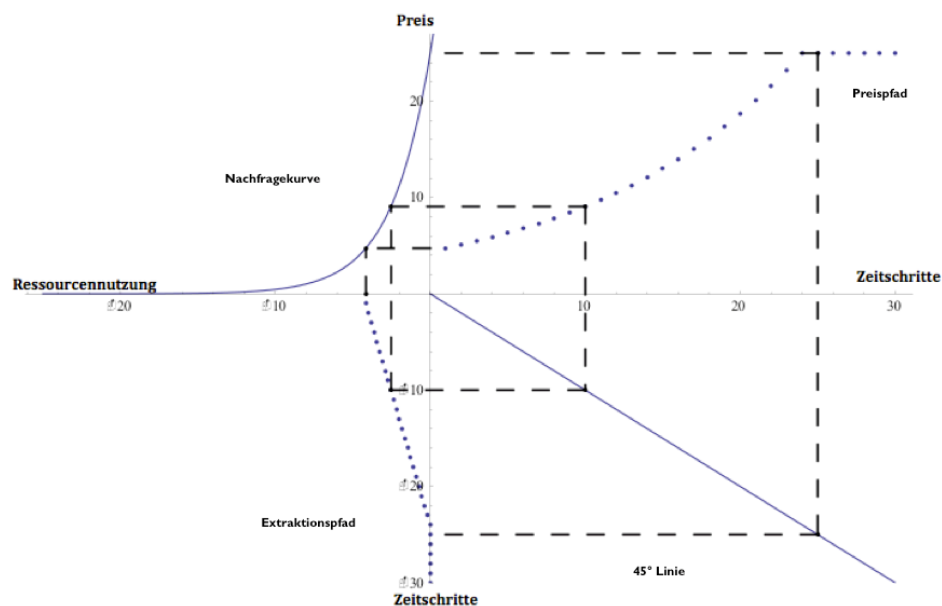
Abbildung 2. Nachfragekurve der Ressource Neodym



Quelle: eigene Ausarbeitung, nach Perman et al. 2011

Abbildung 3 zeigt uns den optimalen Preis- und Extraktionspfad über die Zeit. In Quadrant 2 sehen wir die gespiegelte Preis-Absatz-Funktion, welche der Nachfragekurve entspricht. Ist der Ressourcenbestand aufgebraucht, so ist die Nachfrage 0, da der Preis dem Reservationspreis entspricht. Im Quadrant 1 ist der Preispfad abgebildet, auch hier sehen wir, dass zu $t = T$ der Preis für die nicht-erneuerbare Ressource den Reservationspreis K erreicht hat. In Quadrant 3 ist zu sehen, dass zu diesem Zeitpunkt der Ressourcenbestand über die Zeit vollkommen aufgebraucht wurde und Quadrant 4 spiegelt die Zeitschritte über eine 45°-Linie (Perman et al. 2011).

Abbildung 3. Das Hotelling-Modell als 4-Quadrantenschema



Quelle: eigene Ausarbeitung, nach Perman et al. 2011

4 Darstellung des Hotelling-Modells in Mathematica

Das Hotelling-Modell beschäftigt sich mit der Endlichkeit eines Ressourcenbestandes einer nicht-erneuerbaren Ressource, in diesem Fall Neodym. Da die Erneuerbarkeit dieser Ressourcenart beschränkt ist, kommt es zwangsläufig zu einem vollkommenen Verbrauch der Ressource über die Zeit. Das Hotelling-Modell versucht diese Endlichkeit darzustellen, dabei soll der Wohlfahrtsgewinn für den Konsumenten über die Zeit maximiert werden, in dem Ressourcenverbrauch und Preis für die entsprechende Ressource an die jeweilige Marktsituation und Marktnachfrage angepasst werden. Es handelt sich also um ein dynamisches Maximierungsproblem, bei dem Nutzen durch den Ressourcenverbrauch entsteht (Perman et al. 2011).

4.1 Auswahl eines geeigneten Computeralgebrasystems

Um den Ressourcenverbrauch und den Preispfad der Ressource über die Zeit und die einzelnen Zeitschritte t darstellen zu können, kann man diverse Computeralgebrasysteme einsetzen. Ein geeignetes Programm dafür ist *Mathematica*. Dieses von Stephen Wolfram mit entwickelte Programm wird seit 1988 vertrieben und ist für die Bearbeitung von kleinen bis mittelgroßen mathematischen Aufgaben am PC optimal geeignet, da es Elemente mehrerer Programmiersprachen, wie z.B. Fortan, C oder LISP, miteinander vereint und so nicht mehr auf mehrere Rechenprogramme zurück gegriffen werden muss.

4.2 Erste Schritte zur grafischen Darstellung des einfachen Hotelling-Modells

Um ein dynamisches Maximierungsproblem, wie es das Hotelling-Modell ist, in Mathematica grafisch darstellen zu können bedarf es mehrer Schritte. Zunächst wird bei einem Hotelling-Modell versucht, den Ressourcenbestand und den Preispfad über einen endlichen Zeithorizont und dessen einzelne Zeitschritte darzustellen. Dafür bedarf es einer Formel für die Berechnung des Hotelling-Modells, darüber hinaus ist es notwendig die zahlreichen Erweiterungen hinzuzuziehen und schließlich die geeigneten Parameterwerte einzusetzen.

4.2.1 Parameter setzen

Zu Beginn ist es wichtig geeignete Parameter zu finden, welche in die einzelnen Funktionen eingesetzt werden. Weiters ist es wichtig für diese Parameter sinnvolle Werte zu finden. Im Idealfall sollten diese Werte empirischen Daten entsprechen. Alternativ sollten sie geschätzt werden, um nahe an die empirischen Daten heranzureichen. Für das zunächst vorgestellte einfache Hotelling-Modell werden diesen Parametern Werte zugewiesen, um zu einem grafisch einfach darstellbaren Ergebnis zu kommen.

Diese Werte des einfachen Hotelling-Modells sind in Tabelle 1 ersichtlich. Diese Werte haben jedoch keinerlei Bezug zur Realität und dienen lediglich illustrativen Zwecken. Wie diese Parametersetzung in Mathematica geschrieben wird, wird aus Appendix 1 ersichtlich. Im nächsten Schritt sollen diese Parameter in die Funktionen (1) und (2) des Maximierungsproblems für die nicht-erneuerbare Ressource eingesetzt werden.

Tabelle 1. Parameter des Hotelling-Modell für Neodym unter Monopol

Paramete	Wert	Beschreibung	Quelle
k	25	Reservationspreis (Preisobergrenze für Konsument, ab hier werden keine Güter mehr gekauft)	Angenommen
a	0.18	Steigung der Nachfrage	Angenommen
ρ (rho)	0.075	Diskontfaktor	Angenommen
df	(1/(1+rho))	Abzinsung des Diskontfaktors über die Zeit	Angenommen
S0	50	Ökonomisch nutzbarer Ressourcenbestand zum Zeitpunkt 0	Angenommen
n	30	Zeitschritte des endlichen Zeithorizontes	Angenommen

4.2.2 Funktionen aufstellen

Die zuvor gesetzten Parameter entstammen alle einer Zielfunktion und seiner Nebenbedingung. Wie bereits erwähnt handelt es sich hier um ein dynamisches Maximierungsproblem. Dafür sollten Zielfunktion und Nebenbedingung des einfachen Hotelling-Modells den Funktionen (1) und (2) entsprechen. Wobei hier (1) die Zielfunktion darstellt und (2) die Nebenbedingung.

Funktion (1) zeigt die Wohlfahrtsfunktion der Individuen über die i Zeitschritte von 1 bis n . Diese Wohlfahrtsfunktion ist die aufsummierte und durch den Diskontfaktor über die Zeit abgezinste Nachfrage der Individuen bei einem Monopolmarkt. Die Nebenbedingung (2) sorgt dafür, dass die Summe der Ressourcennutzung den Ressourcenbestand zum Zeitpunkt 0 nicht übersteigt, da aufgrund des begrenzten Bestandes nicht mehr verbraucht werden kann, als zu Beginn vorhanden ist.

$$f := \text{Sum} \left[df^i * \left(x[i] * k * \left(\text{Exp}[-a * x[i]] \right) \right), \{i, 1, n\} \right] \quad (1)$$

$$c := \{\text{Sum}[x[i], \{i, 1, n\}] == S0, \text{Table}[x[i] \geq 0, \{i, n\}]\} \quad (2)$$

4.3 Berechnung der Modellvariablen und grafische Darstellung

Mit Hilfe der zuvor gesetzten Parameter und durch Einsetzen in die aufgestellten Funktionen, können in weiterer Folge die Modellvariablen Ressourcennutzung, Ressourcenpreis und Nutzungsdauer berechnet werden, was es schlussendlich erlaubt, das einfache Hotelling-Modell grafisch darzustellen.

Zunächst wird die Ressourcennutzung zu den jeweiligen Zeitpunkten berechnet, dieser Schritt bildet die Grundlage, damit der Ressourcenpreis für die entsprechenden Zeitpunkte berechnet werden kann. Hierzu wird das Maximierungsproblem mittels numerischen Verfahrens gelöst (siehe Appendix 1). In Folge erhält man die summierte Wohlfahrt der Individuen bei Monopol über alle Zeitschritte, sowie die Ressourcennutzung zu den

jeweiligen Zeitpunkten. Nachdem die Ressourcennutzung über die jeweiligen Zeitschritte berechnet wurde, kann der Preis der Ressource ermittelt werden.

Zusammengefasst heißt das, dass man neben der Wohlfahrt über die gesamte Zeit, auch die Ressourcennutzung und den jeweiligen Preis zu jedem Zeitpunkt t erhält. Diese Daten kann man in weiterer Folge grafisch darstellen. Zum Einen kann mit Hilfe von Mathematica eine Tabelle erstellt werden (siehe Tabelle 2), zum Anderen kann der Ressourcen- und Preispfad in einem zweidimensionalen Diagramm dargestellt werden (Abbildung 4 und Abbildung 5). Eine weitere Möglichkeit ist es, die ermittelten Daten in ein 4-Quadrantenschema einzufügen (Abbildung 6).

Der Vorteil einer Tabelle ist, dass die Daten als Zahlenwerte ersichtlich sind und übersichtlich aufgelistet werden. Der Vorteil der separaten Darstellung von Ressourcen- und Preispfad liegt dabei darin, dass der Verlauf des jeweiligen Pfades sehr übersichtlich dargestellt wird und die Zusammenhänge des dynamischen Maximierungsproblems veranschaulicht werden. Durch die Visualisierung wird zudem die Rückwirkungen des Nutzens und des Preises aus den Vorperioden ersichtlich.

Tabelle 2. Darstellung des einfachen Hotelling-Modells als Tabelle

t	$R(t)$	$P(t)$	$Welfare(t)$
1	3.64613	12.9691	43.988
2	3.54136	13.216	40.4999
3	3.43236	13.4779	37.2383
4	3.31916	13.7553	34.1873
5	3.20171	14.0492	31.3323
6	3.08001	14.3604	28.6594
7	2.95402	14.6898	26.1559
8	2.82372	15.0384	23.8098
9	2.68913	15.4072	21.6102
10	2.55023	15.7972	19.5468
11	2.40704	16.2097	17.6102
12	2.25957	16.6457	15.7916
13	2.10783	17.1066	14.0828
14	1.95186	17.5937	12.4763
15	1.79168	18.1083	10.9651
16	1.62734	18.652	9.54263
17	1.45886	19.2263	8.20288
18	1.2863	19.8329	6.94025
19	1.1097	20.4735	5.74958
20	0.929114	21.1499	4.62603
21	0.744599	21.8641	3.56514
22	0.556212	22.6183	2.56279
23	0.364012	23.4145	1.61512
24	0.168061	24.255	0.718565
25	0.	25.	0.
26	0.	25.	0.
27	0.	25.	0.
28	0.	25.	0.
29	0.	25.	0.
30	0.	25.	0.

Abbildung 4. Ressourcenpfad des einfachen Hotelling-Modells

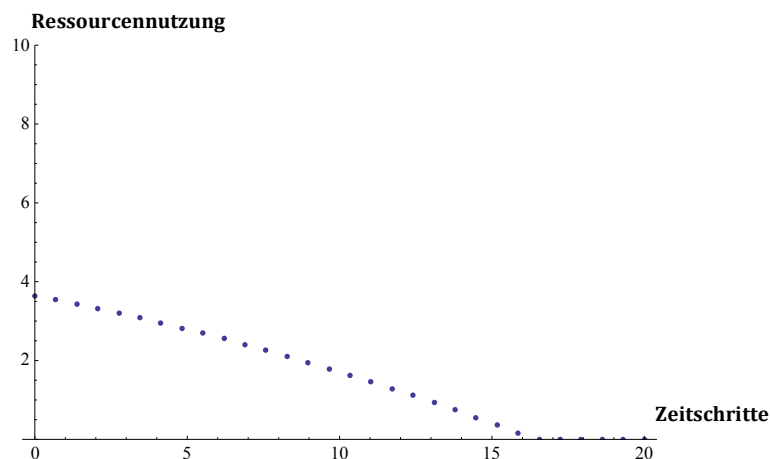


Abbildung 5. Preisfad des einfachen Hotelling-Modells

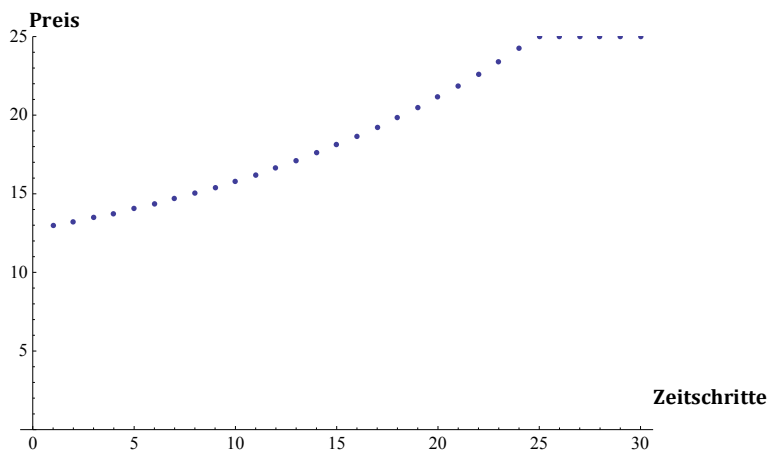
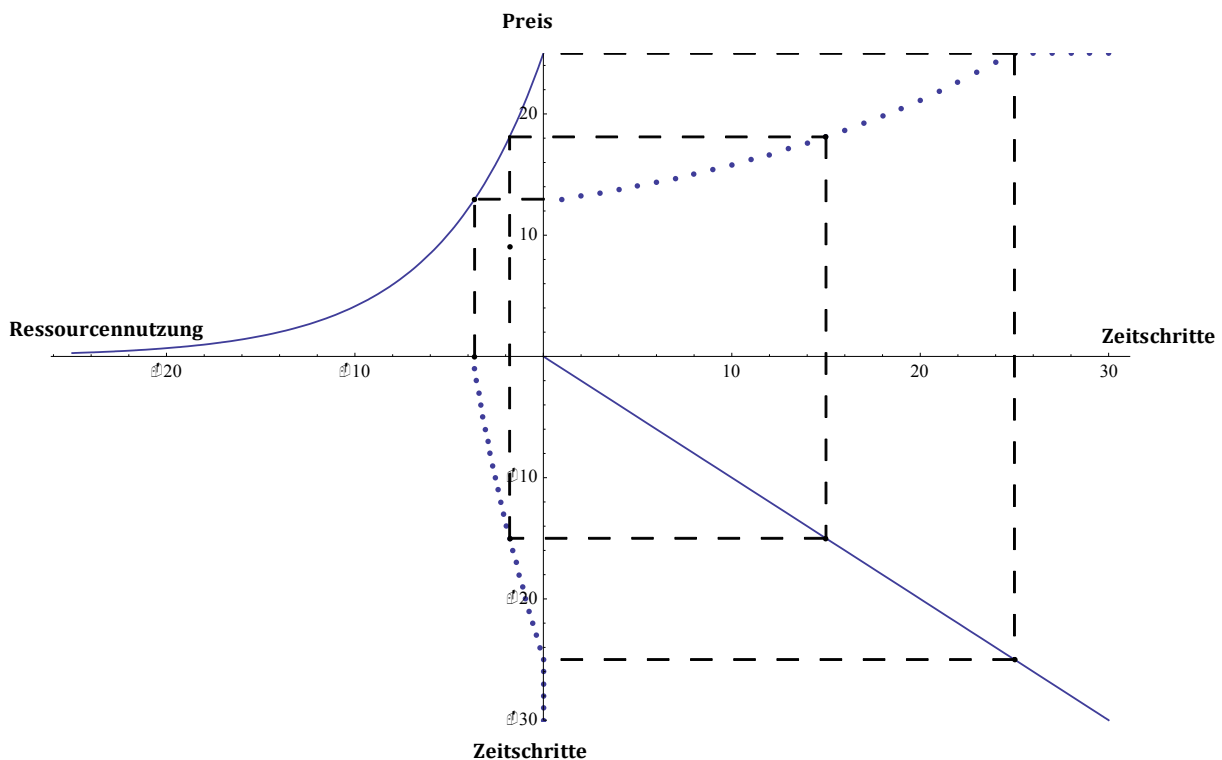


Abbildung 6. Grafische Darstellung des einfachen Hotelling-Modells in einem 4-Quadrantenschema



5 Darstellung der Modellberechnungen – Preisverlauf für Neodym unter veränderten Nachfrage- und Marktsituationen

Nachdem in den vorherigen Kapiteln gezeigt wurde, wie sich der Preis für Neodym und dessen Fördermengen in den letzten Jahren entwickelt haben, was das Hotelling-Modell ist und wie es in Mathematica für den einfachen Fall dargestellt und berechnet werden kann, wird in diesem Teil der Arbeit dargestellt, wie die Parameter und Funktionen gewählt wurden um die erhobenen Daten im Hotelling-Modell darzustellen. Des Weiteren wird dargelegt, wie sich eine Parameterveränderung auswirkt und wie sich der Preisverlauf für Neodym unter den getroffenen Annahmen in den nächsten Jahren entwickeln könnte.

In Kapitel 4 wurde das einfache Hotelling-Modell in einem Monopolmarkt dargestellt, dabei wurden die Parameter nicht den realen Daten entnommen oder geschätzt, sondern so gewählt, dass eine übersichtliche Darstellung der Problemstellung einer endlichen Ressource möglich war. Im Bezug auf die Modellfunktion wurde ebenfalls eine einfache Funktion gewählt.

Deshalb werden in weiterer Folge die Modellparameter für den Markt für Neodym dargestellt und begründet. Danach wird eine Modellerweiterung des Monopolmarktes sowie des Marktes unter vollkommenem Wettbewerb um Extraktionskosten durchgeführt werden. Mit dem Monopolmarkt soll die am Neodym-Markt vorhandene Marktmacht Chinas dargestellt und dessen Monopolgewinne in den Ressourcen- und Preispfad mit einberechnet werden. Hingegen soll der Markt unter vollkommenem Wettbewerb zeigen, wie sich der Ressourcen- und Preispfad durch einen Übergang, weg von der Monopolmacht Chinas, entwickeln könnte.

Es ist darauf zu achten, dass man zu drei möglichen Szenarien für den Ressourcen- und Preispfad kommt (Tabelle 3). Grund dafür ist, dass es ab dem Jahr 2009 zu einer Veränderung der Marktnachfrage kam, was in dem Übergang von Szenario vg (vor der Nachfrageänderung) zu *ng* (nach der Nachfrageänderung) entspricht. In weiterer Folge kam es zu einem starken Anstieg des Preises in den Jahren 2010 bis 2012, wie aus Abbildung 1 (Kapitel 2) ersichtlich wird. Danach ist der Preis wieder gefallen, von *ng* (Monopol nach der Nachfrageänderung) auf *vf* (vollkommenen Wettbewerb, vor der Nachfragenänderung), was einerseits darauf zurückgeführt werden kann, dass es zu einem Rückgang der Monopolstellung Chinas, hin zu einem vollkommen Wettbewerb gekommen ist und andererseits darauf, dass die Nachfrage nach Neodym auf Vorkrisenniveau, wie vor der Nachfrageänderung 2009, zurückgekehrt ist.

Im nächsten Schritt wird die Berechnung für alle Szenarien durchgeführt und das Ergebnis grafisch dargestellt. Dadurch soll gezeigt werden, wie sich der Ressourcen- und Preispfad zwischen den einzelnen Szenarien unterscheidet und welche Auswirkungen auf die Nutzungsdauer der Ressource dadurch entstehen. Der letzte Schritt wird es sein, einen Preispfad zu erstellen, in dem veränderte Nachfrage- und Marktsituationen wiedergegeben werden und der es erlaubt, einen Blick in die Zukunft zu werfen.

Tabelle 3. Szenarien des Hotelling-Modells für Neodym

Szenario	Vollkommener Wettbewerb	Monopol	Vor Nachfrageänderung	Nach Nachfrageänderung
vg		X	X	
ng		X		X
vf	X		X	

5.1 Kalibrierung der Modellparameter

Die für unser Modell gewählten Parameter und deren Werte sind in Tabelle 4 übersichtlich dargestellt, wobei der Parameter k dem beobachteten Reservationspreis des Neodymoxids im Oktober 2011 entspricht. Davor und danach erreichte der Preis diesen Wert, von 500 US-\$/kg nicht mehr. Daraus ist zu schließen, dass niemand bereit war und ist, einen höheren Preis pro Kilogramm Neodymoxid zu bezahlen. Bei der Betrachtung des Reservationspreises muss dem Leser bewusst sein, dass sich der Reservationspreis lediglich auf vergangene Werte bezieht. Ob der Preis auch in Zukunft gilt hängt von der Substituierbarkeit, der Relevanz und der Nachfrage nach Neodymoxid ab (Institut für seltene Erden und Metalle, 2012).

Die Steigung der Nachfrage, a , wurde aus den recherchierten Werten des Kapitels 2 berechnet, dabei wurden zwei Regressionsgeraden gezeichnet, welche zu einer Steigung der Nachfrage vor der Nachfrageänderung (va) von 0.0057 und zu einer Steigung der Nachfrage nach der Nachfrageänderung (na) von 0.004 führte.

Der Diskontierungsfaktor ρ entspricht dem Wert von 0.077284 (7,7284 %), dabei wurde der durchschnittliche Diskontierungsfaktor für große Zeiträume von 1,5% jährlich verwendet und auf fünf Jahre aufgezinst, da jeweils fünf Jahre einem Zeitschritt entsprechen (London:tso 2011).

S_0 entspricht dem ökonomisch nutzbaren Bestand an Neodymoxid zum Zeitpunkt $t = 0$. Da es durch technologischen Fortschritt oder Neuentdeckungen zu einer Änderung des ökonomisch nutzbaren Bestandes kommen kann, ist auch dieser Wert ähnlich dem Reservationspreis nicht fixiert, er kann sich über die Zeit ändern. Der hier angenommene ökonomisch nutzbare Bestand entspricht dem des Jahres 2011 (Viavision 2012).

Der Parameter n entspricht den Zeitschritten, die benötigt werden bis die endliche Ressource, in unserem Fall Neodym, komplett aufgebraucht ist. Dabei entsprechen die oben angegeben 43 Zeitschritte 215 Jahren. Laut einer Studie in Auftrag der Volkswagen AG wird, nach dem Stand von 2011, Neodym in 212 Jahren aufgebraucht sein. Auch hier gilt, wie bereits weiter oben angeführt, dass die von uns verwendete Nutzungsdauer keine absolute Größe darstellt. (Viavision, 2012)

Die Extraktionskosten, mc , wurden mit $5 \cdot x[i]$ angenommen, wobei die Kosten vom Preis x abhängen. Die Extraktionskosten werden mit der Zeit steigen, da es immer aufwendiger wird die zunehmend knappere Ressource zu fördern. Zum Endzeitpunkt werden die Extraktionskosten dem Reservationspreis entsprechen.

Tabelle 4. Parameter des Hotelling-Modells für Neodym (ein Zeitschritt entspricht 5 Jahren)

Parameter	Wert	Beschreibung	Quelle
k	500 \$/kg	Reservationspreis	Institut für seltene Erden und Metalle (2012)
va	0.0057	Steigung der Nachfrage vor der Nachfrageänderung	Selbst berechnet (Siehe Kapitel 2)
na	0.004	Steigung der Nachfrage nach der Nachfrageänderung	Selbst berechnet (Siehe Kapitel 2)
ρ (rho)	0.077284	Diskontfaktor	London:tso (2011)
S0	4.062	Ökonomisch nutzbarer Ressourcenbestand zu t=0 in 1000 Tonnen	Viavision (2012)
n	43	Zeitschritte des endlichen Zeithorizont	Viavision (2012)
mc	5*x[i]	Extraktionskosten der Ressource	Angenommen – für exponentielle Kosten

5.2 Erweiterung der Modellfunktion

Die zuvor dargestellten Daten und die daraus abgeleiteten Parameter werden in weiterer Folge in die dafür vorgesehene Funktion eingesetzt, wobei ein Zeitschritt fünf Jahren entspricht, die folgenden Nachfragefunktionen der Szenarien *vg* (4), *ng* (5) und *vf* (6) wurden um diesen Faktor angepasst. Die Anpassung, dass ein Zeitschritt fünf Jahren entspricht, gilt ebenfalls für *ρ*, *va* und *na* (Tabelle 3). Ausgangspunkt für die Modellerweiterungen ist der Monopolmarkt aus Kapitel 4 und dessen Zielfunktion (1), sowie Nebenfunktion (3). Diese Funktionen sind in Appendix 1 zu sehen. Ebenfalls dort ersichtlich ist die Zielfunktion (2) und dessen Nebenbedingung (3), diese ist für Monopol und den vollkommenen Wettbewerb ident. Die Zielfunktionen (1) und (2) werden in weiterer Folge um die Extraktionskosten erweitert, d.h. die Kosten die bei der Produktion entstehen, werden in die Ressourcennutzung und Preisbildung miteinberechnet (Perman et al. 2011). Außerdem wird die jeweilige Funktion daran angepasst, dass ein Zeitschritt fünf Jahren entspricht.

$$f := \text{Sum} \left[d f^i * \left(x[i] * k * \left(\text{Exp}[-a * x[i]] \right) \right), \{i, 1, n\} \right] \quad (1)$$

$$f := \text{Sum} \left[d f^i * \frac{k}{a} * \left(1 - \text{Exp}[-a x[i]] \right), \{i, 1, n\} \right] \quad (2)$$

$$c := \{ \text{Sum}[x[i], \{i, 1, n\}] == S0, \text{Table}[x[i] \geq 0, \{i, n\}] \} \quad (3)$$

(1) und (2) werden um die Kosten erweitert, die bei der Extraktion entstehen, vom Produzenten getragen werden und den Preis der endlichen Ressource zu jedem Zeitpunkt erhöhen (Perman et al. 2011). Die Funktion soll in diesem Fall den Preis über die Zeitschritte dermaßen erhöhen, das die Kosten der Extraktion und damit der Preis für Neodym steigen,

wenn der Ressourcenbestand geringer wird, das heißt mit der Verringerung des Ressourcenbestandes sollen die Extraktionskosten exponentiell steigen.

Durch diese Erweiterungen erhält man die bereits erwähnten Nachfragefunktionen für Neodym der Szenarien *vg* (4), *ng* (5) und *vf* (6), diese stammen aus Appendix 2 und werden in weiterer Folge Grundlage für die ausgeführten Modellberechnungen sein.

$$vg := \text{Sum} \left[df^i * \left(5 * \left((x[i] * k * (\text{Exp}[-va * x[i]])) - mc \right) \right), \{i, 1, n\} \right] \quad (4)$$

$$ng := \text{Sum} \left[df^i * \left(5 * \left((x[i] * k * (\text{Exp}[-na * x[i]])) - mc \right) \right), \{i, 1, n\} \right] \quad (5)$$

$$vf := \text{Sum} \left[df^i * \left(5 * \left(\left(\frac{k}{va} * (1 - \text{Exp}[-va * x[i]]) \right) - mc \right) \right), \{i, 1, n\} \right] \quad (6)$$

Durch die Modellerweiterung wurde die Funktion eines Monopolmarktes und eines Marktes unter vollkommenen Wettbewerbs um Extraktionskosten erweitert, d.h. das *mc* grundsätzlich von Null, da zuvor keine berechnet wurden, auf $5 * x[i]$ erhöht wurde. Dadurch kam es dazu, dass sich die Preise ebenfalls erhöht haben. Aufgrund des höheren Preises ist die Nachfrage und die Ressourcennutzung ebenfalls gesunken. In weiterer Folge wird die Nutzungsdauer ansteigen und dazu führen, dass die Ressource länger genutzt werden kann (siehe Tabelle 5).

Ebenso wie die Einführung bzw. Erhöhung der Extraktionskosten ist auch der Übergang von Monopol zu vollkommenem Wettbewerb in Tabelle 5 dargestellt. Auf einem monopolistischen Markt versucht der Monopolist den eigenen Nutzen über einen höheren Preis zum Zeitpunkt 1 zu maximieren. Das Angebot wird künstlich verknappt. Deshalb kommt es bei einem Übergang von Monopol zu vollkommenem Wettbewerb zu einer Reduktion des Preises und einem Anstieg der geförderten Menge zum Zeitpunkt $t = 1$. Durch die höhere Nutzung zum Zeitpunkt 1 wird die Ressource in Folge früher vollkommen aufgebraucht und steht daher weniger lang zur Verfügung (Perman et al. 2011). Bei einem neuerlichen Übergang von vollkommenem Wettbewerb zu Monopol wird es zu einer entgegengesetzten Wirkung kommen.

Ebenfalls Auswirkungen auf unsere Modellvariablen haben die übrigen Modellparameter. Würden sich zum Beispiel die Steigungen der Nachfrage *va* und *na* ändern, so würde es, wie in Tabelle 5 dargestellt, zu einer Reduzierung der Ressourcennutzung, zu einer Reduktion des Preises und zu einem Anstieg der Nutzungsdauer über die Zeit, unter ceteris paribus, kommen.

Für alle Veränderungen gilt, dass es zu einer Veränderung in die Gegenrichtung kommt wenn sich die Parameter in die Gegenrichtung verändern.

5.3 Modellberechnungen und grafische Darstellung

Nachdem alle notwendigen Parameter und Funktionen festgelegt wurden, können die Modellvariablen Ressourcen- und Preisfad sowie Ressourcennutzungsdauer für das

jeweilige Szenario berechnet werden. Tabelle 6 zeigt die jeweiligen Ergebnisse der drei Szenarien. Dabei steht $vgR(t)$ für den Ressourcenverbrauch in Szenario *vg* zum Zeitpunkt t und $vgP(t)$ analog für den Preis in Szenario *vg* zum Zeitpunkt t , ebenfalls analog gilt dies für den Ressourcenverbrauch und den Preis für die anderen Szenarien.

Durch Tabelle 6 wird ersichtlich, dass die Nutzungsdauer durch den Übergang von Monopol zu vollkommenem Wettbewerb sinkt, da in Szenario *vf* die Ressource, im Gegensatz zu Szenarien *vg* (42 Zeitschritte) und *ng* (34 Zeitschritte), schon zum Zeitschritt 25 vollkommen aufgebraucht ist, was 125 Jahren entspricht. Den Ressourcenpfad der Szenarien sieht man ebenfalls in Abbildung 7. Auf der X-Achse ist der Ressourcenverbrauch angegeben, auf der Y-Achse die Zeitschritte. Dabei ist zu erkennen, dass die höhere Nutzung zum Zeitpunkt 1 zu einer insgesamt kürzen Nutzungsdauer führt.

In Bezug auf den Preis und dessen Entwicklung ist zu sehen, dass durch den Monopolmarkt die Preise höher sind als bei vollkommenem Wettbewerb. Die Nachfrageänderung am Monopolmarkt hingegen führt ebenso zu einem Anstieg der Preise zum Zeitpunkt $t = 1$, jedoch kommt es durch diese Änderung dazu, dass der Preis von *ng* immer höher ist als jener von *vg* und aufgrund der höheren Ressourcennutzung trotzdem früher aufgebraucht ist. Der Preispfad ist mit dem Preis auf der X-Achse und den n Zeitschritten auf der Y-Achse in Abbildung 8 dargestellt.

Tabelle 5. Veränderung der Modellvariablen auf Grund der Veränderung eines Modellparameters unter ceteris paribus bei Monopol

	Ressourcennutzung zum Zeitschritt 1	Preis zum Zeitschritt 1	Nutzungsdauer über die Zeit
Übergang zu voll. Wettbewerb	↑	↓	↓
k steigt	↓	↑	↑
va steigt	↓	↓	↑
na steigt	↓	↓	↑
rho steigt	↑	↓	↓
S0 steigt	↑	↓	↑
mc	↓	↑	↑

Tabelle 6. Ressourcen- und Preisentwicklung der drei Szenarien für Neodym

t	vgR(t)	vgP(t)	ngR(t)	ngP(t)	vfR(t)	vfP(t)
1	152.721	209.369	199.248	225.341	313.548	83.7122
2	151.462	210.877	196.374	227.946	301.241	89.7953
3	150.124	212.491	193.345	230.726	288.883	96.3487
4	148.704	214.218	190.153	233.69	276.477	103.408
5	147.198	216.065	186.796	236.849	264.027	111.014
6	145.602	218.039	183.268	240.216	251.534	119.207
7	143.912	220.15	179.564	243.801	239.003	128.033
8	142.125	222.404	175.68	247.618	226.435	137.542
9	140.236	224.812	171.613	251.68	213.833	147.785
10	138.242	227.381	167.357	256.001	201.199	158.82
11	136.14	230.123	162.91	260.595	188.536	170.708
12	133.924	233.047	158.269	265.478	175.844	183.515
13	131.593	236.164	153.431	270.666	163.127	197.311
14	129.143	239.485	148.393	276.175	150.386	212.174
15	126.57	243.023	143.153	282.025	137.623	228.185
16	123.872	246.79	137.71	288.233	124.839	245.433
17	121.045	250.799	132.062	294.819	112.035	264.015
18	118.086	255.064	126.208	301.804	99.2137	284.033
19	114.995	259.599	120.147	309.21	86.3752	305.598
20	111.767	264.42	113.88	317.06	73.5211	328.829
21	108.401	269.542	107.405	325.378	60.6524	353.856
22	104.895	274.982	100.725	334.19	47.7701	380.817
23	101.248	280.758	93.8384	343.523	34.8752	409.861
24	97.4587	286.889	86.7475	353.406	21.9687	441.151
25	93.5255	293.393	79.4534	363.869	9.05119	474.858
26	89.448	300.292	71.9575	374.945	1.27646×10^{-7}	500.
27	85.2256	307.607	64.2618	386.666	1.63106×10^{-10}	500.
28	80.8581	315.361	56.3683	399.069	6.76144×10^{-11}	500.
29	76.3455	323.578	48.2793	412.193	4.7457×10^{-11}	500.
30	71.6879	332.283	39.9974	426.076	3.74503×10^{-11}	500.
31	66.8859	341.504	31.5251	440.763	3.13594×10^{-11}	500.
32	61.9402	351.268	22.8653	456.298	2.72553×10^{-11}	500.
33	56.8516	361.606	14.0209	472.73	2.43061×10^{-11}	500.
34	51.6212	372.549	4.99498	490.109	2.20888×10^{-11}	500.
35	46.2502	384.13	2.07698×10^{-7}	500.	2.03649×10^{-11}	500.
36	40.7401	396.386	9.88624×10^{-10}	500.	1.89895×10^{-11}	500.
37	35.0926	409.354	2.58895×10^{-10}	500.	1.78694×10^{-11}	500.
38	29.3092	423.073	1.60208×10^{-10}	500.	1.69418×10^{-11}	500.
39	23.3918	437.587	1.23319×10^{-10}	500.	1.61631×10^{-11}	500.
40	17.3424	452.939	1.02485×10^{-10}	500.	1.55017×10^{-11}	500.
41	11.163	469.176	8.88738×10^{-11}	500.	1.49345×10^{-11}	500.
42	4.85585	486.351	7.9216×10^{-11}	500.	1.44439×10^{-11}	500.
43	0.0000278275	500.	7.19926×10^{-11}	500.	1.40165×10^{-11}	500.

Abbildung 7. Ressourcenpfad der drei Modellszenarien

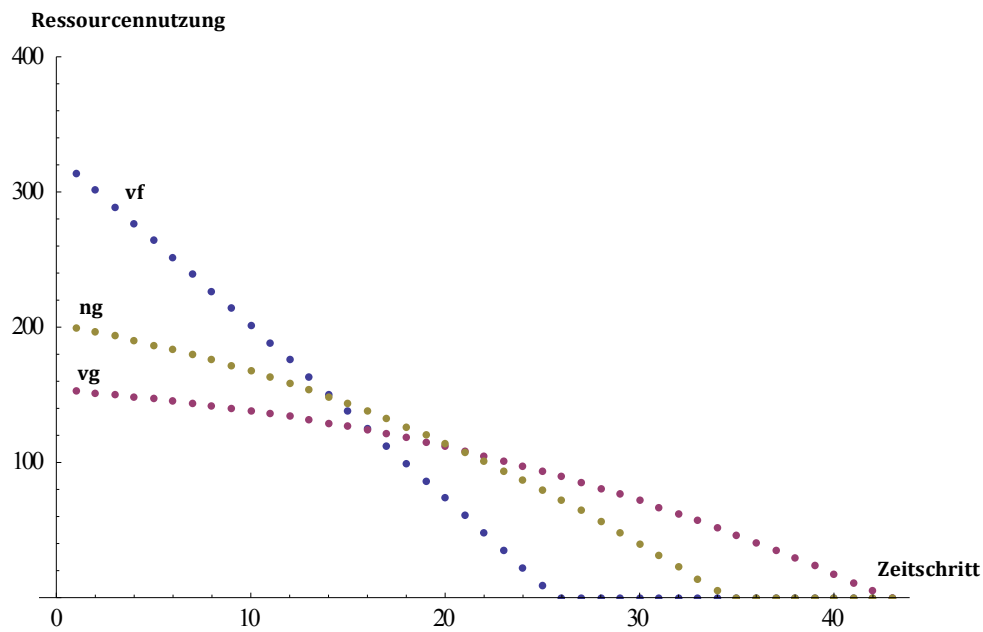
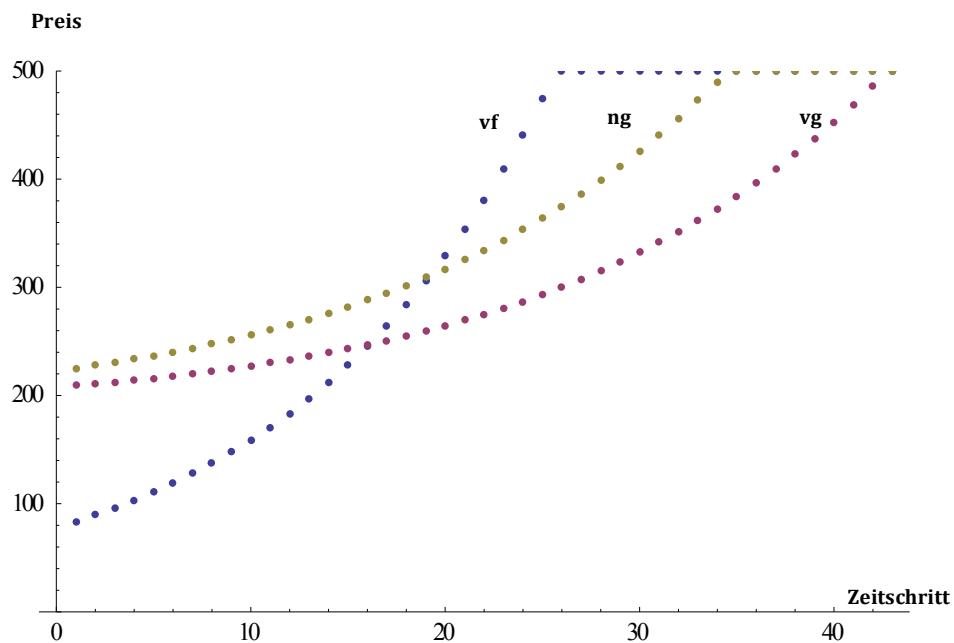


Abbildung 8. Preispfad der drei Modellszenarien



Durch die Veranschaulichung der Ergebnisse in Tabelle 6, Abbildung 7 und Abbildung 8 ist ersichtlich, dass es zu großen Unterschieden in Bezug auf Ressourcennutzungsdauer und Preis zum Zeitpunkt 1 und den Ressourcen- und Preisverlauf über die Zeit kommt. Schlussendlich ist es möglich, diese Szenarien des Hotelling-Modells für Neodym als 4-Quadrantenschema darzustellen. In Abbildung 9 sieht man ein solches 4-Quadrantenschema für das Szenario *vg*.

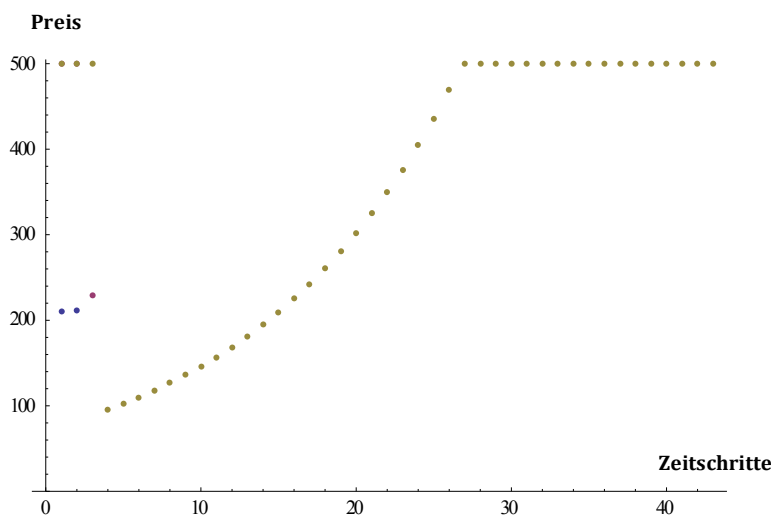


Nachdem es gelungen ist diese drei Szenarien grafisch darzustellen, zu berechnen und als 4-Quadrantenschema zu zeigen, soll der Preispfad für Neodym nachgebaut und eine Prognose für die Zukunft erstellt werden. Wie aus Abbildung 1 (Kapitel 2) ersichtlich wird, war der Preisverlauf in den ersten Jahren sehr flach. China verfügte zwar über eine Monopolstellung, doch konnte es diese Stellung nicht ausnutzen, da die Gesamtnachfrage nach Neodym mäßig blieb. Ab 2009 kommt es aber zu einem starken Anstieg des Preises. Dieser Preisanstieg ist auf eine Änderungen der Nachfrage zurückzuführen. Die Gründe die zu diesem regelrechten Preisboom geführt haben, werden nur in aller Kürze angerissen, eine tiefere Betrachtung ist in Kapitel 2 zu finden. Als Gründe lassen sich zum einen die gestiegenen Extraktionskosten als Folge der höheren Umweltauflagen nennen (Focus 2011). Des weiteren wurden Exportbeschränkungen seitens Chinas zunächst nur in Erwägung gezogen und schließlich realisiert, was zu einem Exportrückgang von 35% führte (Beschaffung aktuell o.J.). Die Länder der westlichen Hemisphäre legten strategische Reserven an (magnets4you o.J.), was den Preisanstieg weiter befeuerte. Ab 2012 ist es jedoch zu einer Preisreduktion gekommen, was auf diverse Gründe zurückzuführen ist. Unter anderen ist aber ein Rückgang der Nachfrage ähnlich jener von vor 2009 zu erkennen.

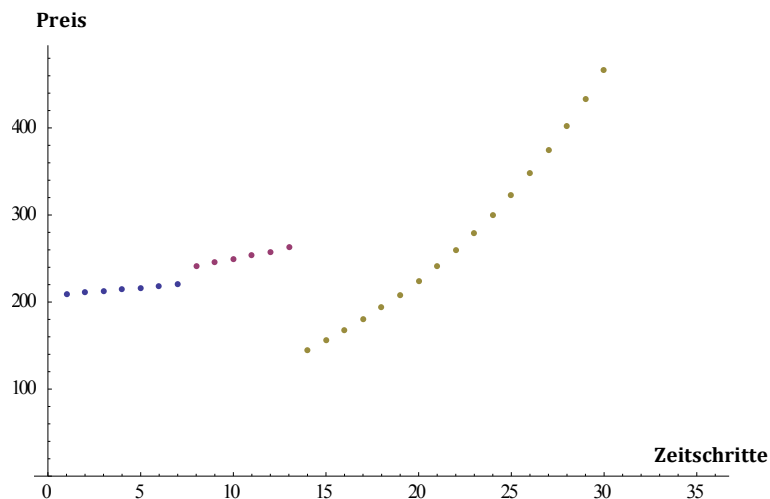
andererseits wurden in zahlreichen Ländern Minen wiederöffnet bzw. neue Minen in Betrieb genommen, da sich durch die hohen Preise die Förderung auch in zuvor unrentablen Minen wieder lohnt (Beschaffung aktuell o.J.).

Folgt man diesen Änderungen der Nachfrage- und Marktsituationen, ist es möglich den Preispfad für Neodym in Mathematica nachzubauen und eine Voraussage für einen zukünftigen Preispfad bei gleichbleibender Nachfrage- und Marktsituation in der Zukunft zu geben. Da jeder Zeitschritt fünf Jahren entspricht, wird für die ersten Perioden angenommen, dass die Nachfrage- und Marktsituation der des Szenarios *vg* entspricht. Es herrscht also ein Monopol vor einer Erhöhung der Nachfrage. In Abbildung 10, mit dem Preis auf der X-Achse und den Zeitschritten auf der Y-Achse, sieht man diese Perioden als blaue Punkte. Nimmt man nun für die dritte Periode die kurzfristige Nachfrageänderung von 2010 bis 2012 an, so entspricht dies dem Szenario *ng* und ist in Abbildung 10 als roter Punkt zu sehen. Kommt es in weiterer Folge zur Annahme, dass die kurzfristige Nachfrageänderung wieder auf das Niveau davor sinkt und der Markt aufgrund neuer bzw. wiederbetriebener Minen zu einem vollkommenen Wettbewerb übergeht, so befindet man sich ab Periode 4 (ab 2013) in einer Nachfrage- und Marktsituation wie in Szenario *vf*, zu sehen als gelbe Punkte in Abbildung 10.

Abbildung 10. Preispfad für Neodym bei veränderten Nachfrage- und Marktsituationen (wahre Werte)



Diese Änderungen der Nachfrage- und Marktsituationen würde dazu führen, dass die Ressource Neodym bis Periode 27 verfügbar bleibt und dann erschöpft ist. Für den Preis würden diese Berechnungen bedeuten, dass es nach einem Anstieg zum Zeitpunkt $t = 3$, ab dem Zeitpunkt $t = 4$ auf Grund einer geringeren Nachfrage, wieder zu einem Rückgang des Preises kommen würde. Danach wird der Preis wieder langsam ansteigen, da der Ressourcenbestand immer geringer wird und deswegen ein höherer Preis dafür gezahlt wird (Perman et al. 2011). Um die Veränderungen durch die geänderten Nachfrage- und Marktsituation übersichtlicher zu zeigen, sind die Zeitschritte in Abbildung 11 etwas größer gewählt und entsprechen nicht den realen Werten. Durch diese Verfälschung wird besser ersichtlich, wie sich die Preise durch die unterschiedlichen Nachfrage- und Marktvoraussetzungen verhalten.

Abbildung 11. Preisfad für Neodym bei veränderten Nachfrage- und Marktsituationen (unwahre Werte)

5.5 Ausblick in die Zukunft

Um nun einen Ausblick für die Zukunft geben zu können, müsste man wissen wie sich der Markt für Neodym entwickelt. Ohne Informationen über die zukünftige Entwicklung der Markt- und Nachfragesituation ist es schwer einen solchen Ausblick anzustellen. Geht man davon aus, dass es zu einem Übergang zu einem vollkommenen Wettbewerb kommt, würde der Preisfad annähernd jenem von Abbildung 10 entsprechen.

Doch darf nicht vergessen werden, dass es durch technologischen Wandel, sowie durch Neuentdeckungen neuer Ressourcenbestände zu einem veränderten ökonomisch nutzbaren Ressourcenbestand [50](#) kommen kann. Dadurch würde der Preis zum Zeitpunkt 1 sinken, da mehr Ressourcen vorhanden sind und das Angebot steigt, gleichzeitig würde die Ressourcennutzung zum Zeitpunkt 1 steigen. Auch die Nutzungsdauer würde aufgrund des höheren Angebots steigen. Die Entwicklung wäre demnach analog zu der in Tabelle 5.

Durch Neuentdeckungen und technologischen Fortschritt ist es zudem möglich, dass sich die Extraktionskosten [mc](#) über die Zeit ändern. Durch die Neuentdeckung einfach zugänglicher Ressourcen, würden die Extraktionskosten sinken. Durch neue Technologien im Abbau der Ressource würde es ebenfalls zu einer Reduktion der Extraktionskosten kommen. Dadurch könnte Neodym günstiger abgebaut werden, die Preise für Neodym würden fallen und die Ressourcennutzung dementsprechend steigen. Die Nutzungsdauer über die Zeit würde durch die ceteris paribus Veränderung der Extraktionskosten sinken. Dies führt dazu, dass Neodym weniger lang verfügbar sein wird und schlussendlich komplett aufgebraucht ist. Die einzige Möglichkeit Neodym danach noch zu nutzen wäre es, bereits verwendetes Neodym zu recyceln.

6 Schlussfolgerung

So hoffen wir, anhand der soeben dargelegten Befunde, Berechnungen und Ergebnisse ein wenig mehr Licht in das Dunkel rund um den zukünftigen Preis- und Extraktionspfad der nicht-erneuerbaren Ressource Neodym gelegt zu haben. Auch sollte die Eingangs gestellte Frage, ob das Desinteresse in Bezug auf Neodym gerechtfertigt ist oder nicht eindeutig mit einem „nein“ beantwortet werden, hängt unsere zukünftige wirtschaftliche und technologische Entwicklung doch in weiten Teilen an diesen nicht seltenen aber doch raren Seltenen Erden ab.

Auch muss an dieser Stelle noch einmal festgehalten werden, dass sich das Hotelling-Modell zwar sehr gut für eine Prognose anhand von fixen Parametern eignet, doch wird das Modell ungenau, oder muss um viele Nebenbedingungen erweitert werden, möchte man nicht diesen einen starren Preis und Extraktionspfad abbilden, sondern ein Modell darstellen, welches Schwankungen unterlegen ist. Sollte sich beispielsweise der ökonomisch nutzbare Bestand durch Neuentdeckungen oder technologischen Fortschritt erhöhen, so muss das Modell komplett neu konzipiert werden, oder die einzelnen Marktbedingungen müssen, wie in Kapitel 5, aneinander gestückelt werden, was das Erstellen weiter verkompliziert.

Trotz allem ist das Modell ob seiner offensichtlichen Fehler nicht komplett über Bord zu werfen, können doch bestimmte Richtungen in die sich der Preis- und Extraktionspfad entwickeln könnte, relativ gut und übersichtlich dargestellt werden. Ob sich der Neodymmarkt, wie beschrieben, in Richtung Wettbewerbsmarkt entwickelt, ob China seine dominierende Rolle bewahren kann, oder ob vielleicht ein ganz neuer Akteur, eventuell durch recyceltes Neodym, auf den Plan tritt, wird sich in der Zukunft zeigen. An diese neuen Entwicklungen müsste das Hotelling-Modell dabei stets aufs Neue angepasst werden.

7 Literaturverzeichnis

Angerer G., L. Erdmann, V. Handke, A. Lüllmann, F. Marscheider-Weidemann, M. Merwede, M. Scharp (2009): *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*, (isi.fraunhofer.de/isi-de/publ/download/isi09b05/angerer-rohstoffe-fuer-zukunftstechnologien.pdf), Stand 29.01.2014

ARD Panorama (2011): Das schmutzige Geheimnis sauberer Windräder, (<http://daserste.ndr.de/panorama/archiv/2011/windkraft189.html>), Stand 29.01.2014

Beschaffung aktuell: *Der globale Streit um Zukunftsrohstoffe*, (http://www.beschaffung-aktuell.de/home/-/article/16537505/30680345/Der-globale-Streit-um-Zukunftsrohstoffe/art_co_INSTANCE_0000/maximized/), Stand 29.01.2014

Buchert M., S. Dittrich, R. Liu, C. Merz, D. Schüler (2011): *Study on Rare Earths and Their Recycling*, (<http://www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf>), Stand 29.01.2014

Deutsche Rohstoffagentur: *Rohstoffpreise*, (http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/SharedDocs/GT_Produkte/Mineral_Rohstoffe/CPL_allergenTab_DE.html?nn=1797074), Stand 29.01.2014

Focus (2011): *China erlässt weitere Auflagen für Seltene Erden*, (http://www.focus.de/finanzen/news/umweltschutz-china-erlaesst-weitere-auflagen-fuer-seltene-erden_aid_587933.html), Stand 29.01.2014

Hilpert H., A. Kröger (Mai 2011): *Chinesisches Monopol bei Seltenen Erden: Risiko für die Hochtechnologie*, (http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.372387_de/11-19-1.pdf), Stand 29.01.2014

Institut für seltene Erden und Metalle (2012): *Preise für Seltene Erd Oxide von 2004 bis 2010*, (<http://institut-seltene-erden.org/aktuelle-und-historische-marktpreise-der-gangigsten-seltenen-erden/>), Stand 29.01.2014

London:tso (2011): *The green book*, Seite 99, (https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/220541/green_book_complete.pdf), Stand 29.01.2014

Keane E. (2010): *Will Rare Earths Cripple the Green Economy? Part 1*, (<http://www.altenergystocks.com/archives/2010/09/rareearths1.html>), Stand 29.01.2014

Kingsnorth (2011): *Rare Earth Opportunities – Real or Imaginary?*, (http://www.northernminerals.com.au/new/index.php?option=com_edocman&task=document.download&id=283&Itemid=175), Stand 29.01.2014

Magnets4you: *Hintergründe zu den aktuellen Preissteigerungen der Neodym-Magnete*, (http://www.magnet-shop.net/aktuelle-preisentwicklung:_:340.html), Stand 29.01.2014

Öko-Institut (2011): *Seltene Erden – Daten & Fakten*, (<http://www.oeko.de/oekodoc/1110/2011-001-de.pdf>, Seite 6), Stand 29.01.2014

Perman R., Y. Ma, J. McGilvray und M. Common (2011): *Natural Resources and Environmental Economics*, 4th edition, Pearson.

Seilnacht: *Neodym*, (<http://www.seilnacht.com/Lexikon/60Neodym.html>), Stand 29.01.2014

US Inflation Calculator: *Historical Rates: 1914-2014*, (<http://www.usinflationcalculator.com/inflation/historical-inflation-rates/>), Stand 29.01.2014

Viavision (2012): *Seltene Erden Metalle der Zukunft*, (<http://www.viavision.org/ftp/703.pdf>), Stand 20.01.2014

Zaruma Resources Inc. (2010): *Seltene Erden Metalle: zwischen Panik und Realität*, von Prof. Dr. Thomas Utter, (<http://www.goldinvest.de/index.php/seltene-erden-metalle-zwischen-panik-und-realitaet-von-prof-dr-thomas-utter-19207>), Stand 29.01.2014

Appendix 1: Das einfache Hotelling-Modell

Appendix 2: Das Hotelling-Modell für Neodym