

# **Modellierung der globalen Goldproduktion durch Anwendung der Hubbert'schen 'Peak-Oil' Methodik**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften am  
Institut für Geographie und Geologie der  
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Jürgen Müller, Dipl.-Ing.(FH), MPhil  
aus Gerstetten

2011

© 2012 Jürgen Müller

Herstellung und Verlag: Books on Demand GmbH, Norderstedt  
ISBN 9783844818130

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Die in dieser Dissertation dargestellten Aussagen, Thesen, Prognosen und ggf. Empfehlungen wurden vom Autor nach bestem Wissen und Gewissen recherchiert und verfaßt. Eine Haftung gleich welcher Art und welchen Umfangs, die aus diesen Inhalten abgeleitet werden könnten, wird ausdrücklich ausgeschlossen.

Diese Arbeit entstand am Lehrstuhl für Geodynamik und Geomaterialforschung an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg unter der Betreuung von Prof. Dr. Hartwig Frimmel. Eingereicht am 25.08.2011.  
Erstgutachter: Prof. Dr. Hartwig Frimmel; Zweitgutachter: Dr. Wolfgang Liebert, TU Darmstadt.

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung . . . . .	
Kurzfassung . . . . .	
Danksagung . . . . .	
Inhaltsverzeichnis . . . . .	
Abbildungsverzeichnis . . . . .	
Tabellenverzeichnis . . . . .	
<b>1 Einführung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Historischer Kontext . . . . .	1
1.2 Bergbau zwischen wirtschaftlicher Notwendigkeit und ökologischer Herausforderung . . . . .	7
1.3 Ziele der Arbeit . . . . .	9
1.4 Praktische Relevanz für die Zukunft . . . . .	9
<b>2 Eigenschaften, Lagerstätten und Bedeutung von Gold. . . . .</b>	<b>12</b>
2.1 Das Metall Gold . . . . .	12
2.1.1 Physik, Chemie und Vorkommen . . . . .	12
2.1.2 Reserven und Ressourcen . . . . .	14
2.1.3 Geochemische Daumenregel nach Skinner . . . . .	16
2.2 Goldlagerstätten und ihre Bedeutung für die zukünftige Förderung . . . . .	17
2.2.1 Sedimentäre Vererzungen . . . . .	19
2.2.2 Magmatogene Vererzungen . . . . .	20
2.2.2.1 Porphyrische Kupfer-Gold Lagerstätten . . . . .	21
2.2.2.2 Epithermale Lagerstätten . . . . .	23
2.2.3 Hydrothermale Vererzungen . . . . .	25
2.2.3.1 Orogene/intrusive Lagerstätten . . . . .	25
2.2.3.2 Carlin-Typ Lagerstätten . . . . .	26
2.2.3.3 Eisenoxid Kupfer-Gold Lagerstätten . . . . .	28
<b>3 Analyse der globalen Goldförderkurve und Implikationen   für die Zukunft . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1 Geometrische Analysen . . . . .	29
3.1.1 Exponentialität der Goldförderkurve . . . . .	29
3.1.2 Unterzyklen der Goldförderkurve . . . . .	34
3.1.3 Sinkende Dynamik der Unterzyklen . . . . .	37
3.1.4 Zukünftige Zielpunkte des aktuellen Unterzyklus . . . . .	38

<b>3.2 Geologische und ökonomische Analysen</b>	<b>41</b>
3.2.1 Sinkende Erzgehalte	41
3.2.2 Sinkende Explorationserfolge	43
3.2.3 Steigende Produktionskosten	50
3.2.4 Auswirkungen des globalen Ölförderhochpunktes auf die zukünftige Goldförderung	55
3.3 Ökologische Kurzanalyse	60
3.4 Kurzanalyse politischer Einflußfaktoren	63
<b>4 Mathematische Modelle der zukünftigen globalen Goldförderung</b>	<b>66</b>
4.1 Grundlagen des Hubbert-Zyklus	66
4.2 Verifikation der angewendeten Methodik	69
4.3 Bestimmung der kumulierten Gesamtfördermenge $Q_{\infty}$ für Gold	73
4.3.1 Parabel-Methode $dQ/dt = f(Q)$	74
4.3.1.1 Verifikation der Parabel-Methode mit Polynomen höherer Ordnung	77
4.3.1.2 Bestimmung der unbekanntenen historischen Förderung	79
4.3.2 Hubbert-Linearisierung	82
4.3.3 Approximierung der kumulierten Goldfunde	93
4.4 Zweiseitig exponentielle Modelle	95
4.5 Approximation mittels logistischer Funktion	99
4.5.1 Graphische Bestimmung des "Peak-Gold" Jahres	100
4.5.2 Mathematische Bestimmung der maximalen Förderrate	101
4.5.3 Optimistisches Szenario: $Q_{\infty} = 440.000 \text{ t}$	102
4.5.3.1 Symmetrische Approximierung	102
4.5.3.2 Asymmetrische Approximierung	104
4.5.4 Mittleres Szenario: $Q_{\infty} = 330.000 \text{ t}$	106
4.5.4.1 Symmetrische Approximierung	106
4.5.4.2 Asymmetrische Approximierung	107
4.5.5 Pessimistisches Szenario: $Q_{\infty} = 245.000 \text{ t}$	109
4.5.5.1 Symmetrische Approximierung	110
4.5.5.2 Asymmetrische Approximierung	111

4.6	Verwendung weiterer sigmoider Funktionen	112
4.6.1	Modellierung der Südafrikanischen Goldförderung	113
4.6.2	Modellierung der globalen Goldförderung	117
4.6.2.1	Gauß-Funktion	118
4.6.2.2	Gompertz-Funktion	119
4.6.2.3	Weibull-Funktion	120
4.6.2.4	Johnson-Funktion	122
4.7	Ordinaten-Transformation sigmoider Funktionen	123
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>126</b>
<b>6</b>	<b>Schlußfolgerungen und Ausblick</b>	<b>138</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>140</b>
<b>8.</b>	<b>Anhang</b>	<b>153</b>
8.1	Verwendete Datenreihen	153
8.1.1	Globale Goldförderdaten 1851 - 2010	153
8.1.2	Südafrikanische Goldförderdaten 1883 - 2010	156
8.1.3	Globale Rohölförderdaten 1850 - 2009	159
8.1.4	Amerikanische Rohölförderdaten 1859 - 2010	162
8.1.5	Kumulierte Goldfunde 1950 - 2010	166
8.2	Methodik der mathematischen Modellierungen	167
8.3	Verwendete Formeln im Excel-Format	169

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel benutzt. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Gerstetten, den 25. August 2011

Jürgen Müller, Dipl.-Ing.(FH), MPhil



# Kurzfassung

Die Debatte um die Endlichkeit der Ressourcen unserer Erde wird bereits seit Jahrhunderten geführt. Dem entgegen ist jedoch festzustellen, daß die Produktionskurven vieler Metalle nach wie vor nahezu exponentiell ansteigen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde speziell für das Metall Gold - welches wahrscheinlich als erstes Metall von der Menschheit gewonnen wurde - untersucht, inwieweit die aktuelle Daten- und Wissensgrundlage befähigt, die zukünftige Entwicklung der Förderkurve abzuschätzen.

In diesem Kontext wurden daher die folgenden Fragestellungen formuliert:

- a) Wie werden geologische, ökonomische, soziale und politische Einflüsse die Goldförderung in der Zukunft qualitativ beeinflussen?
- b) Sind die Erkenntnisse der Hubbert'schen Öl-Modellierungen auf die Förderung von Gold anwendbar?
- c) War das Jahr 2003 mit einer Förderung von 2.590 t das Jahr der höchsten Förderrate, oder ist in Zukunft auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis mit einer höheren jährlichen Förderung zu rechnen?

Nach den einleitenden Kapiteln 1 und 2 wurde hierzu im ersten Teil der Arbeit zunächst die bisherige Goldförderkurve geometrisch analysiert (Kapitel 3.1). In guter Näherung läßt sich die Goldförderkurve seit 1851 mit einer exponentiellen Funktion approximieren, die eine Steigung von 1,965 % pro Jahr aufweist, wobei die Abweichung von der Exponentialität tendenziell seit Jahrzehnten zunimmt. Zudem weist die Goldförderkurve vier Unterzyklen auf, die auf seinerzeitige politische und ökonomische Gründe zurückgeführt werden können. Als Zielpunkte für die jährliche Goldförderung im aktuellen 4. Unterzyklus können geometrisch 1.600 t im Jahr 2020 und 750 t im Jahr 2030 hergeleitet werden.

Geologische und ökonomische Analysen (Kapitel 3.2) ergeben, daß die Goldgehalte in den geförderten Erzen global beständig fallen, von im Schnitt 20 Gramm pro Tonne Erz (g/t) im 19. Jahrhundert auf aktuell ca. 2,5 g/t. Dies ist auch darauf zurückzuführen, daß Gold heute nahezu ausschließlich im großflächigen Übertagebergbau unter Einsatz schwerer und energieintensiver Großraumtechnik gewonnen wird.

Hält dieser historische Trend an, können die Erzgehalte im Jahr 2050 auf 1,5 g/t und weiter bis auf 0,7 g/t im Jahr 2100 fallen. Geologisch gestützt wird diese mathematische Extrapolation von den beständig sinkenden Explorationserfolgen. Seit 2002 werden nur mehr ca. 1.250 t Gold pro Jahr



neu entdeckt, jedoch ca. 2.500 t gefördert. Zum Vergleich: In den 1970er und 80er Jahren wurden im Schnitt ca. 3.500 t Gold p.a. entdeckt, jedoch nur 1.370 t gefördert, d. h. die Reserven wurden in dieser Zeit kontinuierlich aufgebaut. Die Kosten der Exploration stiegen seit den 1950er Jahren der Tendenz nach exponentiell an. Das Verhältnis von Ertrag zu Aufwand verringerte sich von 105 in den 1960er Jahren auf 11 in der ersten Dekade des neuen Jahrtausends. Der durchschnittliche Goldgehalt neu entdeckter Erzkörper betrug im Jahr 2007 nur mehr 1,1 g/t und ist ebenfalls beständig fallend.

Ökologisch betrachtet (Kapitel 3.3) belegen empirische Studien, daß auch für den Goldbergbau der bekannte exponentielle Zusammenhang zwischen sinkenden Erzgehalten und notwendigem Ressourceneinsatz besteht (Energie, Wasser, Zyanid, CO<sub>2</sub>-Ausstoß). Zusätzlich stieg durch den Übergang zum Übertagebergbau das Verhältnis Abraum zu Erz seit den 1980er Jahren von unter 1 auf über 10 an, was insgesamt zu einer exponentiellen Entwicklung bei den Kosten der Goldförderung beiträgt. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung ist weiterhin mit steigenden sozialen und ökologischen Kosten für die Minenbetreiber zu rechnen, nicht zuletzt aufgrund eines möglichen Hubbert'schen "Peak-Oil" Szenarios. Qualitativ ergeben sich demnach durch die sinkenden Erzgehalte und Explorationserfolge einerseits, und den steigenden Kosten andererseits, enorme Herausforderungen für den primären Goldbergbau.

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wird die globale Goldförderkurve mathematisch mit sigmoiden Wachstumsfunktionen modelliert, um auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis die zukünftige Entwicklung auch quantitativ abschätzen zu können. Erster Schritt hierzu ist die Ermittlung der kumulativ zu erwartenden Gesamtförderung von Gold  $Q_{\infty}$  (Kapitel 4.3). Da verlässliche jährliche Förderdaten für Gold erst ab dem Jahr 1851 existieren, mußte hierzu zunächst die unbekannt historische Förderung bis 1850 bestimmt werden. Durch eine neuartige Anwendung der Hubbert'schen Parabel-Methode konnte diese mit  $Q_{\text{historisch}} = 10.000$  t abgeschätzt werden. Unter Verwendung dieses Wertes und mit einer ebenfalls neuartigen charttechnischen Interpretation der Hubbert-Linearisierung (HL), konnten drei Szenarien mathematisch ermittelt werden:  $Q_{\infty, \text{optimistisch}} = 440.000$  t,  $Q_{\infty, \text{mittel}} = 330.000$  t und  $Q_{\infty, \text{pessimistisch}} = 245.000$  t. Der letztgenannte, pessimistische Wert leitet dabei auf der klassisch mathematischen Interpretation der HL ab, die lediglich auf den Datenpunkten der letzten 13 Jahre beruht. Der Wertebereich 245.000 t bis 440.000 t konnte durch die sigmoide Modellierung der Goldfunde der Jahre 1950 - 2010 ebenfalls verifiziert werden (vgl. Kapitel 4.3.3).

Nach den in dieser Arbeit verwendeten Förderdaten (vgl. Kapitel 8.1) wurden bisher in der Menschheitsgeschichte ca. 158.000 t Gold gefördert. Die besten Ergebnisse der Modellierungen wurden mit den logistischen Funktionen nach Verhulst bzw. nach Richards erreicht, wobei die Richards-Funktion insofern eine Generalisierung der logistischen Funktion darstellt, als daß die Asymmetrie der Funktion über einen vierten Parameter möglich wird (Kapitel 4.5). Für das Szenario  $Q_{\infty} = 440.000$  t ergeben sich Werte für die maximale Förderrate von 2.357 t im Jahr 2040 (logistische Funktion) bzw. 2.969 t im Jahr 2044 (Richards-Funktion). Da auch im mittleren Szenario  $Q_{\infty} = 330.000$  t die Modellierung nach Richards einen Peak-Wert von 2.589 t im Jahr 2027 ergibt, ist es demnach nicht auszuschließen bzw. wahrscheinlich, daß in Zukunft noch mit einer höheren Jahresförderung von Gold zu rechnen ist. Die Modellierungen zeigen jedoch auch, daß je höher und je später dieser Förderhochpunkt tatsächlich eintreffen wird, umso schneller der Abfall der jährlichen Förderraten zu erwarten sein wird. Die Lage des Förderhochpunktes hinsichtlich Zeit und Höhe ändert sich für die asymmetrischen Richards-Modelle mit einer Rate von 50 Tagen bzw. 2,9 t pro 1.000 t zusätzlicher Förderung. Bei den symmetrischen logistischen Modellen betragen diese Raten 59 Tage bzw. 4,2 t pro zusätzlichen 1.000 t Gesamtförderung. Alle Modelle zeigen, daß 80 % der zu erwartenden Gesamtförderung innerhalb von 240 Jahren stattfinden wird. Dies bestätigt die Hubbert'sche These, daß die industrielle Phase der primären Rohstoffgewinnung nicht länger als 2 oder 3 Jahrhunderte andauern kann.

Weitere verwendete sigmoide Funktionen nach Weibull, Gompertz, Johnson und Gauß erbrachten keine besseren bzw. sinnvollen Ergebnisse, sodaß die logistischen Funktionen nach Verhulst und Richards als die am besten geeigneten Funktionen bestätigt werden konnten (Kapitel 4.6). Durch einen neu eingeführten Ordinaten-Parameter konnten jedoch auch die Approximierungen, z. B. der klassischen Weibull-Funktion, stark verbessert werden (Kapitel 4.7).