

WELTERDÖLVORRÄTE UND IHRE REICHWEITE

F. Barthel und P. Kehrer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

1. Zusammenfassung

Die langfristige Verfügbarkeit von Erdöl steht im Mittelpunkt aktueller Diskussionen zur künftigen globalen Energieversorgung. Dieser fossile Energieträger, der eigentlich gespeicherte Sonnenenergie darstellt, trägt mit ca 40% nach wie vor die Hauptlast des Primärenergieverbrauchs der Welt und ist damit der wichtigste Energieträger der Weltwirtschaft.

Eine physische Verknappung von Erdöl hat es in der Vergangenheit nicht und wird es auch in unmittelbarer Zukunft nicht geben - sog. "Energiekrisen" waren politisch verursacht und kein Problem der globalen Verfügbarkeit, jüngste "künstliche Verknappungen" der OPEC zielten auf höhere Marktpreise. Im Gegenteil herrschte Jahrzehnte ein Überangebot mit der Folge entsprechend niedriger Preise. Die stets neu hinzugefundenen Reserven hielten mit der steigenden Förderung Schritt, glichen die durch Produktion entnommenen Mengen zumindest aus oder übertrafen diese, so dass die nachgewiesenen Erdölreserven über lange Zeit zunahmen und sich die "statische Reichweite" erhöhte.

Doch wie geht es weiter? Wird dieser Überfluss längerfristig in einen Mangel umschlagen, ist unsere Energieversorgung und unser Wohlstand gefährdet? Die Diskussion um die künftige Verfügbarkeit von Erdöl ist momentan kein sehr populäres Thema, wird auch von Politik und Wirtschaft nur ungerne geführt, weil es den politischen und wirtschaftlichen Frieden stört. Die gegenwärtige Debatte um künftige Energiestrategien, besonders auch in Deutschland, zielt schwerpunktmässig auf Umwelt- und Klimafragen sowie das Gefahrenpotential der Atomenergie und beinhaltet nicht eine mögliche Ressourcenproblematik fossiler Energie-Rohstoffe.

Die intensive aktuelle Diskussion in Politik, Medien und Fachkreisen zur Zukunft des Erdöls ist hinsichtlich ihrer Aussagen verwirrend, weil Fakten unzulässig vermischt, ungleiche Dinge verglichen werden, unterschiedliche Interessenlagen in Politik und Wirtschaft die Beurteilung tendenziös beeinflussen und verschiedenen Fachdisziplinen die Dinge naturgemäss aus ihrer Sicht unterschiedlich bewerten.

Dieser Vortrag versucht, dieses Thematik aus der Sicht einer neutralen Fachbehörde, basierend auf geowissenschaftlichen und lagerstättenkundlichen Kenntnissen und Erfahrungen, darzustellen. Die häufig zitierten "Reichweiten" und "Lebendauern" von Rohstoffen, bei denen Relationen zwischen Reserven und Produktion miteinander in Beziehung gesetzt werden,

sind eine statische Momentaufnahme in einem dynamischen System, in dem sich die Faktoren wie Reserven, Förderung, Verbrauch, Kosten, Preise und Technologien laufend verändern. Die Nichtbeachtung dieser Zusammenhänge führt zu falschen Schlussfolgerungen.

Erfahrungen und Kenntnisse aus Exploration und Produktion von Erdöl der Vergangenheit, die sich in sog. "Lernkurven" darstellen lassen, können Hinweise auf künftige Entwicklungen geben. Die daraus abgeleiteten Verfügbarkeitsprognosen haben als grobe Tendenz gemeinsam, dass in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts die maximale Produktion, möglicherweise im Zeitraum 2020-2030, an konventionellem Erdöl erreicht wird. Die Welt hat in den kommenden Jahrzehnten mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen Überfluss an Erdöl, das seinen Höhepunkt als Energieträger wohl in der ersten Hälfte de 21. Jahrhunderts überschreiten wird und seine Führungsposition im Energiemarkt an andere Energieträger abgeben wird. Ein die weitere Entwicklung der Weltwirtschaft hemmender Mangel ist gleichwohl nicht zu befürchten, da bedingt durch einen allmählichen längerfristigen Förderabfall sowie ausreichend vorhandener anderer fossiler Energieträger und regenerativer Energien ein gradueller Übergang zu einem anderen Energiemix möglich ist. Erdöl ist in allen seinen Anwendungen substituierbar.

Die Lichter werden, auch bei deutlichem Bevölkerungswachstum und steigendem Wohlstand in Entwicklungsländern, nicht ausgehen, sondern Intelligenz und Kreativität des Menschen, verbunden mit neuen Technologien, werden wie in der Vergangenheit auch in der Zukunft ein ausreichendes Angebot an Primärenergie bereitstellen. Allerdings wird die künftige Energieversorgung verstärkt von den Faktoren Akzeptanz, Umwelt, Klima, Kosten, Wirtschaftlichkeit, Substitution, Nachhaltigkeit und intelligenteren Lösungen durch neue Technologien bestimmt.

2. Einführung

Erdöl und Erdgas sind gegenwärtig die wichtigsten Energieträger. Zusammen decken sie über 60% des Welt-Primärenergiebedarfes (Abb. 1), in einzelnen Ländern und Regionen noch wesentlich mehr. Mit ca 40% ist das Erdöl der global führende Energie-Rohstoff, aber mit prozentual leicht abnehmender Tendenz, das Erdgas hat einen Anteil von ca 20% mit einer sehr dynamischen Entwicklung und zunehmendem Anteil am Verbrauch. Seit mehr als 100 Jahren wird Erdöl industriell gewonnen. Die Nutzung von Erdgas in grösserem Umfang setzte später ein, da die entsprechenden Märkte, bedingt durch eine aufwendige Infrastruktur mit hohen Vorlauf-Investitionen, sich erst allmählich entwickelten. Erdöl ist von grösster Bedeutung für Transportwesen, Wärmemarkt sowie als Rohstoff für die Chemie, Erdgas wird schwerpunktmässig für Wärme- und Stromerzeugung sowie ebenfalls als Grundstoff für die Chemie eingesetzt.

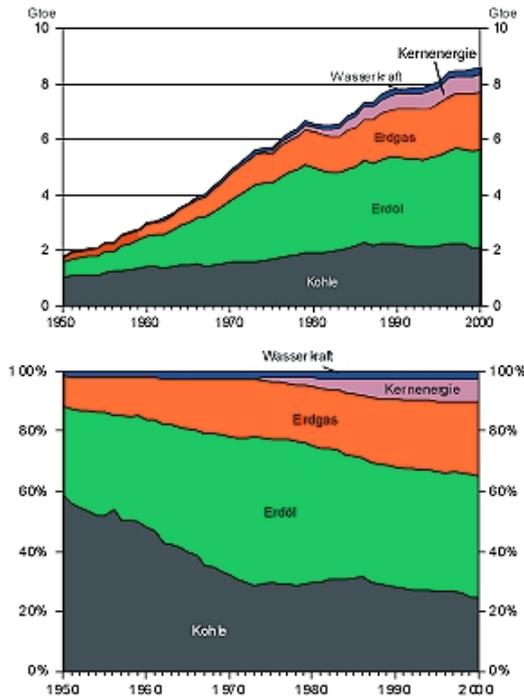


Abbildung 1: Entwicklung des Primärenergie-Verbrauchs weltweit absolut und anteilmässig nach Energieträgern (ohne Biomasse)

Erdöl und Erdgas sind endliche, nicht-erneuerbare Rohstoffe und gespeicherte Sonnenenergie, da ihre Entstehung organischen Ursprungs ist, das Leben aber auf Sonneneinstrahlung basiert. Der Verbrauch hat heute solche gewaltigen Dimensionen erreicht, dass die jährlich konsumierten Mengen an Erdöl und Erdgas einem Bildungszeitraum von einigen Millionen Jahren entsprechen.

Es werden konventionelle und nicht-konventionelle Erdöle und Erdgase unterschieden. Die heute geförderten Lagerstätten sind im wesentlichen konventionelle Kohlenwasserstoffe, an nicht-konventionelle Lagerstätten sind aber noch sehr grosse Vorräte gebunden. Deren künf-

tige Verfügbarkeit und Nutzung hängt wesentlich vom Energiepreisniveau, Technologien, Akzeptanz und Klimadiskussionen ab. Konventionelles Erdöl und Erdgas sind vom Umfang der ursprünglichen Reserven und Ressourcen etwa gleich, die günstigere Situation bei Erdgas bei den heutigen Reserven und Ressourcen liegt in der schon wesentlich längeren Nutzung des Erdöls, während sich die Erdgasmärkte erst später entwickelten. In diesem Vortrag wird schwerpunktmässig das Erdöl behandelt.

Wie bereits vorher erwähnt wird zwischen konventionellem und nicht-konventionellem Erdöl unterschieden. Zum konventionellem Erdöl gehören Erdöl im klassischen Sinne (freifliessend, mit Abstand der grösste Anteil der heute geförderten Mengen) und Kondensat (NGL, Natural Gas Liquids; gasförmig in der Lagerstätte, flüssig an der Erdoberfläche). Zum nicht-konventionellem Erdöl werden Schweröl, Schwerstöl, Ölsande, Ölschiefer und Synthetisches Erdöl (aus Kohle oder Erdgas) gezählt.

3. Reserven und Ressourcen

Reserven sind zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Mengen an Erdöl einer Kohlenwasserstoff-Lagerstätte. Sie werden noch nach dem Grad der Nachweissicherheit in sichere, wahrscheinliche und mögliche Reserven unterteilt. Bei sich ändernden Rahmenbedingungen wie Erdölpreisen oder neuen Fördertechnologien ändert sich die Höhe der Reserven aus den schon bekannten Vorkommen. Gewinnbare Erdölreserven entsprechen etwa 30% bis 50% des gesamten Lagerstätteninhaltes an Erdöl (oil in place), je nach Fließfähigkeit und Lagerstättenparameter wie z.B. Porosität.

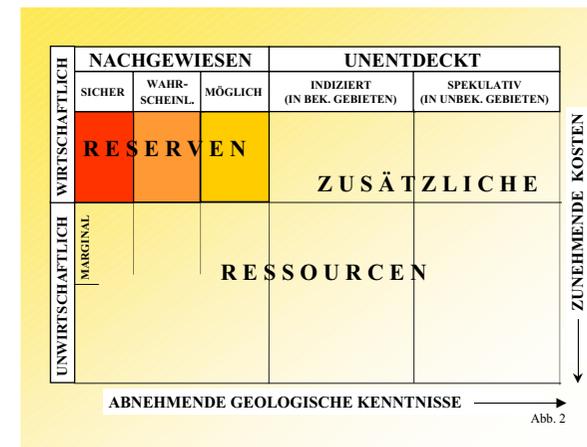


Abbildung 2: Reserven und Ressourcen

Ressourcen sind nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare, sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Mengen an Erdöl („yet to find“). Diese geologischen Möglichkeiten zur Entdeckung noch nicht nachgewiesener Mengen ergeben sich aus der Tatsache, dass die Erdölbildung an ein bestimmtes Temperaturfenster in der Erdkruste („oil window“) und an organische Ablagerungen in sog. Sedimentbecken gebunden ist. Damit kann das noch zu findende Potential „geologisch eingegrenzt“ werden. Von sehr gut erkundeten Sedimentbecken wird analog auf das Potential weniger explorierter Sedimentbecken geschlossen.

Das System Reserven und Ressourcen ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Durch mögliche steigende Gewinnungskosten bei höherem Energiepreinsniveau werden nachgewiesene Ressourcen und mit steigendem geologischem Kenntnisstand durch Exploration werden noch nicht nachgewiesene Ressourcen in Reserven überführt.

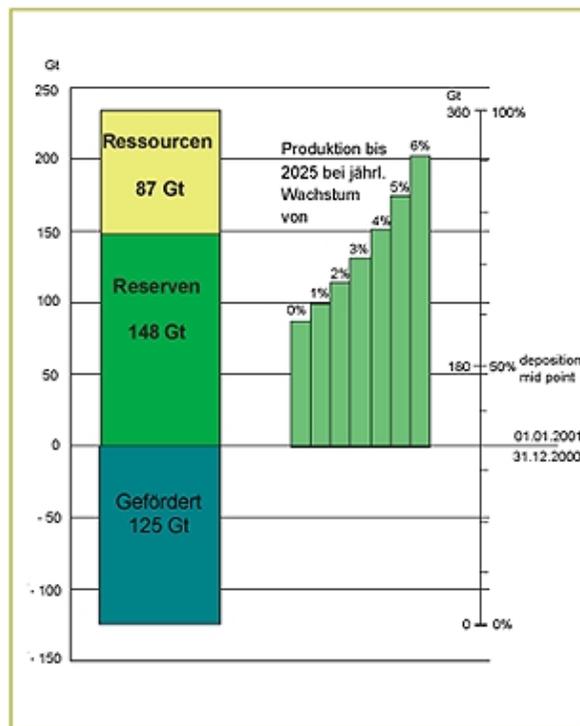


Abbildung 3: Gesamtpotential und Verfügbarkeit von konventionellem Erdöl weltweit

Nach Einschätzung der BGR lagen Ende 2000 das insgesamt zu fördernde Potential an konventionellem Erdöl bei ca 360 Gt (Millarden Tonnen), von denen 125 Gt bereits gefördert wurden, 148 Gt als Reserven vorliegen und ca 87 Gt Ressourcen, die noch in Reserven überführt werden können (Abb. 3).

Das insgesamt gewinnbare Potential, international auch unter dem Begriff EUR (Estimated Ultimate Recovery) bekannt, ist wie in Abbildung 4 dargestellt in den letzten beiden Jahrzehnten kaum noch gewachsen, obwohl die nachgewiesenen Reserven sich noch deutlich erhöht haben. Die einzelnen Punkte in dieser Abbildung beziehen sich auf Schätzungen unterschiedlicher Autoren, die von uns hindurchgelegte mittlere Kurve bewegt sich asymptotisch in die Horizontale. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist, dass mit steigendem Kenntnisstand und Erforschung der Erdkruste eine Begrenzung des Gesamtpotentials (EUR) deutlich wird und auch mit neuen Technologien und ggf. steigenden Energiepreisen dieses Niveau bei konventionellem Erdöl wegen der Endlichkeit der Ressourcen nicht mehr gesteigert werden kann.

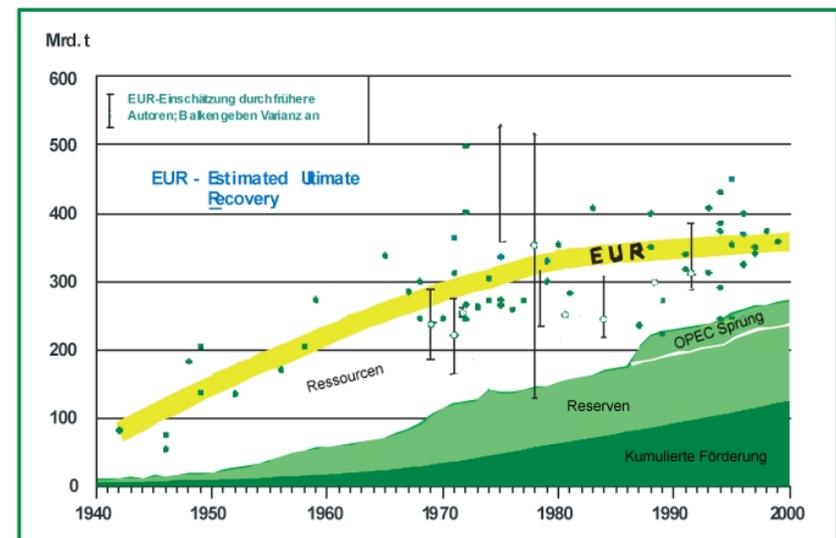


Abbildung 4: Konventionelles Erdöl 1940 – 2000
Entwicklung von EUR, Reserven und Förderung weltweit

Bezogen auf die Reserven von 148 Gt und die jährliche Förderung von ca 3,5 Gt ergibt sich eine „statische Reichweite“ von etwas über vierzig Jahren, unter Hinzurechnung der noch zu findenden Ressourcen von über sechzig Jahren. Der hierfür häufig gebrauchte Begriff „Lebensdauer“ ist insofern irreführend, weil es sich nur um eine statische Momentaufnahme in

einem dynamische Ssystem handelt, bei dem sich Faktoren wie Reserven, Förderung, Preise, Kosten und Technologien laufend ändern. Eine Lagerstätte bzw. eine Lagerstättenprovinz, ein Land oder die gesamte Welt kann aus lagerstättendynamischen Gründen auch nicht auf gleichem Förderniveau bis zur totalen Erschöpfung produzieren, sondern ist durch einen lang anhaltenden asymptotischen Abfall gekennzeichnet.

Aus Erfahrung einzelner Erdölfelder oder ganzer Erdölprovinzen ist bekannt, dass nach Förderung der Hälfte der gewinnbaren Menge, dem sog. „depletion mid point“, zwangsläufig ein Förderabfall einsetzt. In Abbildung 3 ist eine jährliche Fördersteigerung von 0% bis 6% über eine Dauer von 25 Jahren berechnet. Die höheren Produktionssteigerungen dürften dabei unrealistisch sein, da sie neben den Reserven schon einen wesentlichen Teil der Ressourcen in Anspruch nehmen würden. Auch bei gleichbleibendem Förderniveau wäre der bei 180 Gt liegende „depletion mid point“ schon in der Hälfte dieses 25-Jahreszeitraumes erreicht.

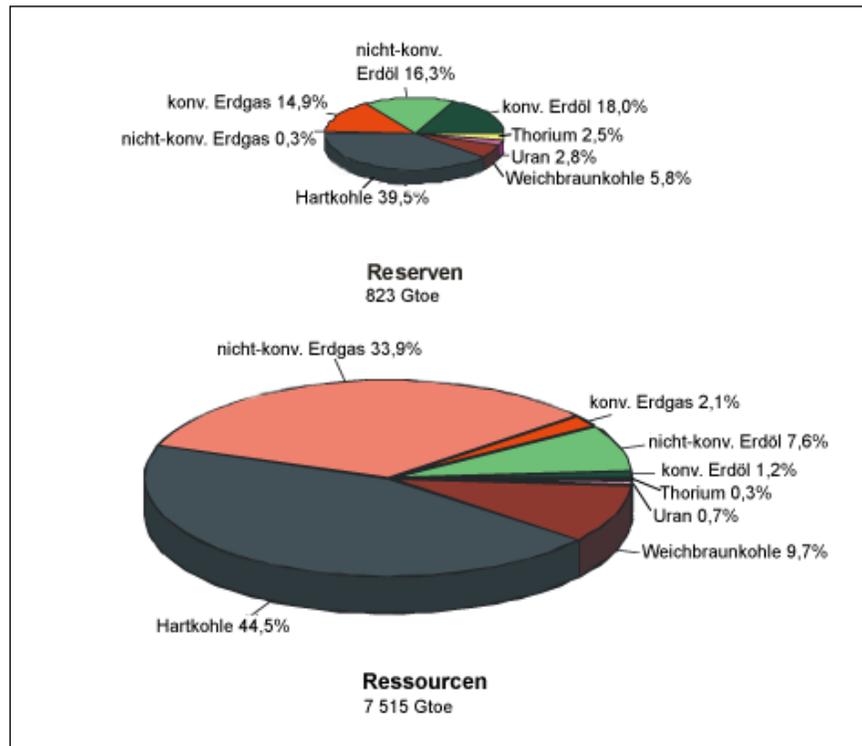


Abbildung 5: Reserven und Ressourcen von Energie-Rohstoffen

Sensationelle grosse neue Erdölfelder sind nicht mehr zu erwarten, da die Sedimentbecken und die Bildungsbedingungen weitgehend bekannt sind. Eine wesentliche Steigerung des Gesamtpotentials (EUR) wäre möglich, wenn der Entölungsgrad bekannter Lagerstätten über höhere Energiepreise, die höhere Produktionskosten erlauben, und die damit verbundenen verbesserten Fördertechnologien gesteigert werden könnte.

In Abbildung 5 ist der Anteil von Erdöl an den Reserven und Ressourcen nicht erneuerbarer Energie-Rohstoffe dargestellt. Während das konventionelle Erdöl bei den Reserven noch einen Anteil von 18,0% hat, sinkt dieser Wert bei den Ressourcen wegen der starken Stellung von Kohle und nicht-konventionellem Erdgas (überwiegend Gashydrate) auf nur noch 1,2%.

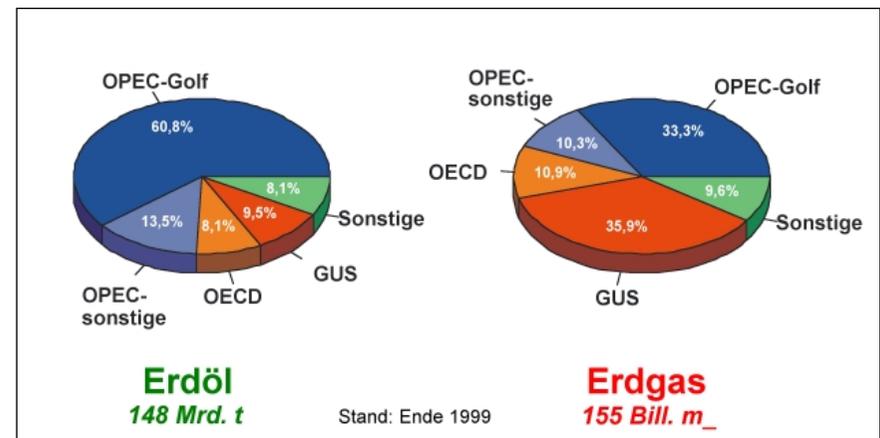


Abbildung 6: Verteilung der Erdöl- und Erdgasreserven nach wirtschaftspolitischen Gruppen

Die Verteilung der Erdölreserven nach wirtschaftspolitischen Gruppen ist in Abbildung 6 dargestellt, die starke Stellung der OPEC mit fast 65% kommt deutlich zum Ausdruck. Länder mit Erdölreserven von über 1 Gt zeigt Abbildung 7, ca. 70% der Welterdölreserven liegen innerhalb einer „strategischen Ellipse“.

In Abbildung 8 ist die weltweite Entdeckung von Erdöl im 5-Jahresmittel dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die grössten Felder in den 40-, 50- und 60-iger Jahren gefunden wurden. Der Zuwachs der Reserven der letzten beiden Jahrzehnte ist zu ca 75% auf Höherbewertung vorhandener Lagerstätten zurückzuführen.

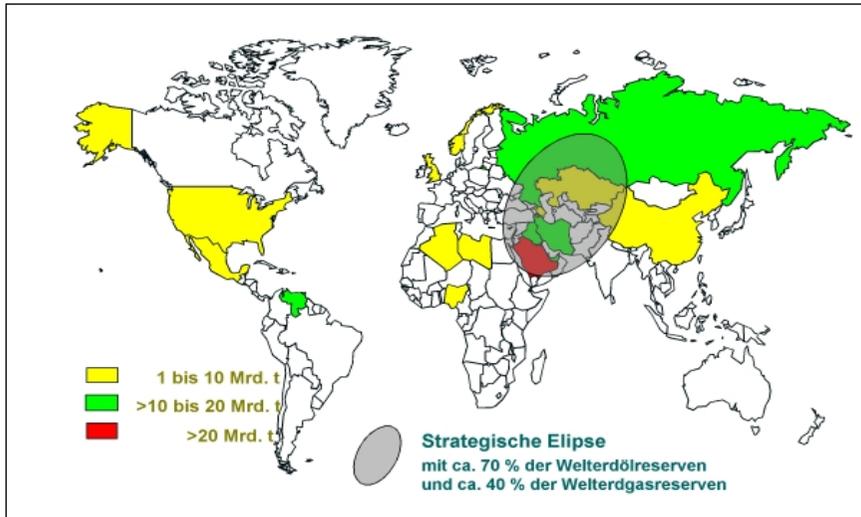


Abbildung 7: Länder mit Erdölreserven > 1 Mrd. t

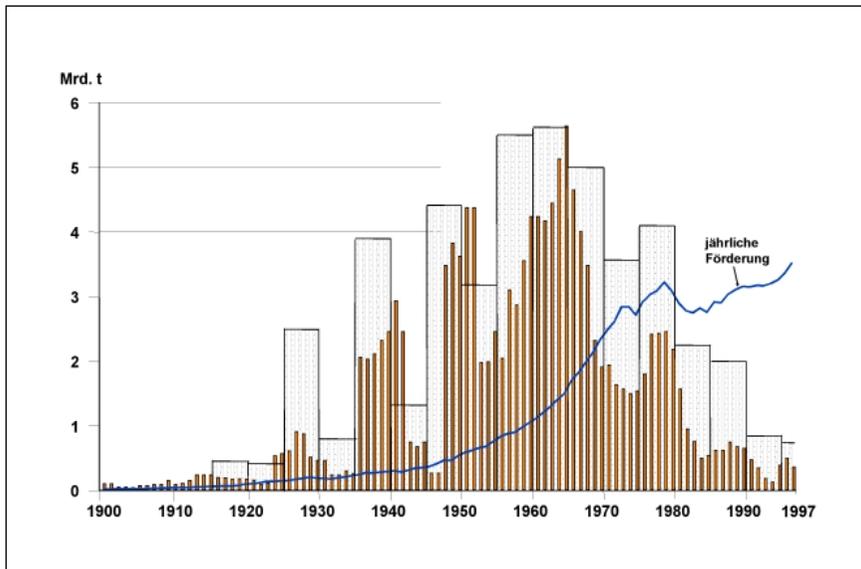


Abb. 8: Weltweite Entdeckung von Erdöl (im 5-Jahresmittel) und Erdölförderung seit 1900 die dünnen dunklen Säulen markieren den Anteil durch giant, super und mega giant Erdölfelder (aus HILLER 1999 nach MASTERS et al. 1994, MILLER 1997, CAMPBELL 1997 und BGR-Datenbank)

4. Lernkurven

Aufgrund der Erfahrung von Exploration (Aufsuchung, Erschließung) und Förderung (Gewinnung) von Erdöl ergeben sich charakteristische „Lernkurven“ oder „Erfahrungskurven“, die Hinweise auf das insgesamt zu findende bzw. zu fördernde Erdöl ergeben. Bei der Exploration werden Aufwand gegen Erfolg geplottet, wobei der Aufwand durch die Zahl der Explorationsbohrungen (bzw. Kosten) und der Erfolg durch die kumulierten gefundenen Reserven dargestellt wird. In Abbildung 9 sind drei Beispiele unterschiedlicher Größenordnungen dargestellt, und zwar bezogen auf ein Sedimentbecken, eine Lagerstättenprovinz und eine ganze Region. Die Kurven steigen zunächst steil an, da zuerst die grösseren Felder gefunden werden und flacht dann ab, weil die Grösse der zugefundenen Felder und damit der Reserven zuwachs abnimmt. Wenn alle wirtschaftliche Felder gefunden sind, nimmt die Kurve einen asymptotischen Verlauf und die Exploration endet wegen mangelnder weiterer Erfolge. Diese Kurve, international auch „creaming curve“ genannt, bildet das insgesamt gewinnbare Reservenpotential einer Lagerstätte, Lagerstättenprovinz, Sedimentbeckens, Regions oder der Welt ab.

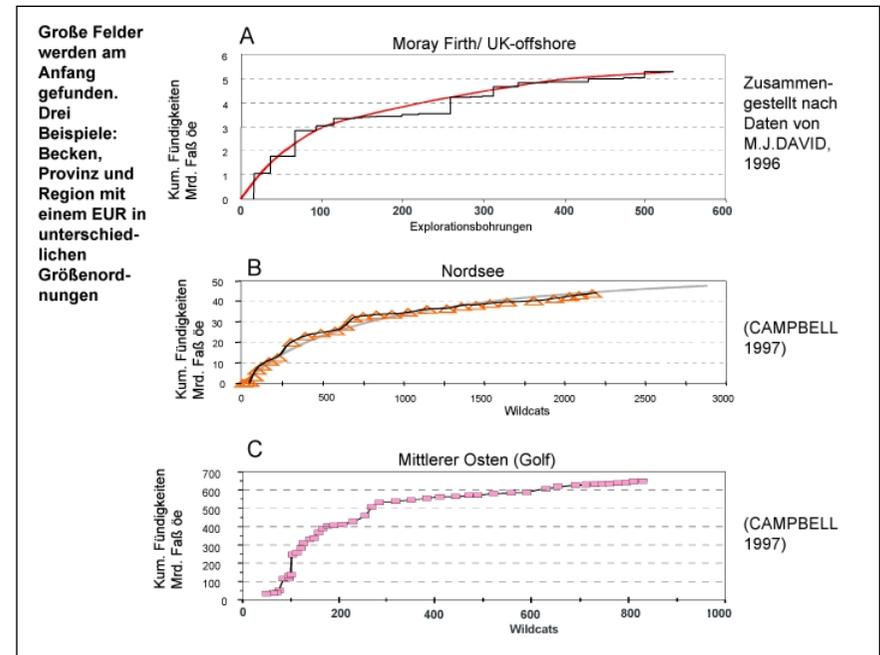


Abbildung 9: Drei Erfahrungskurven bei der Exploration grosser Felder

Die Jahresproduktion eines Feldes über der Zeit ergibt typischerweise eine Art Glockenkurve, normalerweise mit einem steileren Anstieg und einem längeren asymptotischen Abfall. In Abbildung 10 ist die Förderung der USA von 1900 bis heute und projiziert bis 2050 dargestellt. Der amerikanische Geologe Hubbert prognostizierte 1956, dass die USA ihren Förderhöhepunkt etwa 1965 bis 1970 erreichen würde und wurde damals dafür, auch in Fachkreisen, belächelt. Tatsächlich wurde das Fördermaximum 1970 erreicht, weil der „depletion mid point“ überschritten wurde und die Produktion zwangsläufig Lagerstätten bedingt zurückgehen musste. Auch die modernste den USA zur Verfügung stehende Fördertechnologie und mehrere Energiepreiserhöhungen konnten diesen Abfall nicht verhindern. Damit ist die These von Wirtschaftsforschern widerlegt, die künftige Verfügbarkeit von Erdöl hänge nur von Technologie und Kapital ab. Es gibt zahlreiche weitere Beispiele für einzelne Felder, Lagerstättenprovinzen oder Regionen in einem reiferen Förderstadium, die einen ähnlichen Förderverlauf zeigen.

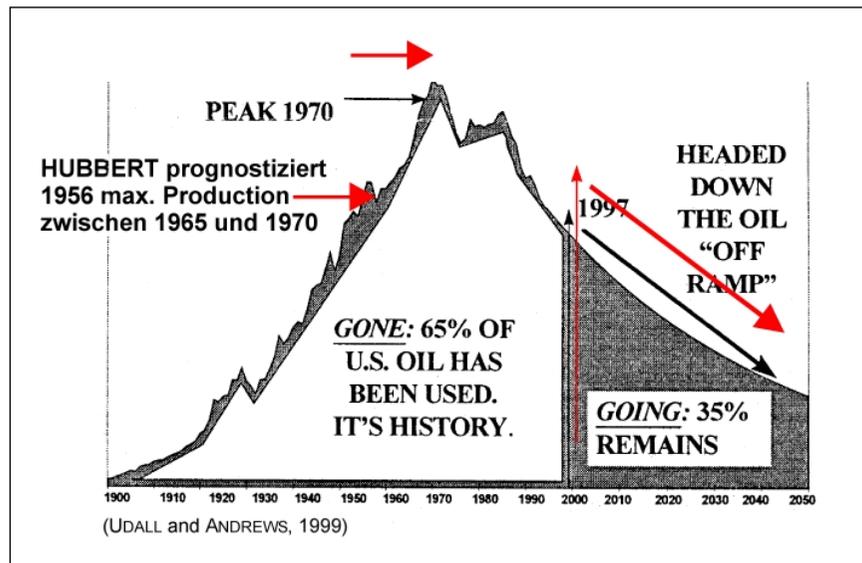


Abbildung 10: U.S. Erdölproduktion 1900 bis 2050

5. Ausblick

Aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen und den Vorstellungen über das gesamte Potential an förderbarem Erdöl ist in Abbildung 11 ein mögliches Förderszenario bis 2050 dargestellt. Die Welt-Produktion würde demnach ihren Höhepunkt im Zeitraum 2010 bis 2020 mit 4,5 bis

5,0 Gt erreichen. Eine Auswahl verschiedener Prognosen für die Erdölproduktion bis 2150, z.T. auch unter Einbeziehung nicht-konventioneller Erdöle, ist in Abbildung 12 dargestellt. In der Mehrzahl der Fälle wird ein Maximum der Produktion in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts erreicht. In der Abbildung 13 wird ein von der BGR entwickeltes Szenario, ebenfalls bis 2150, dargestellt. Auch die Einbeziehung eines bedeutenden Anteiles an Erdöl aus Schweröl, Schwerstöl und Ölsanden kann den längerfristigen Förderabfall nicht verhindern, sondern nur verlängern.

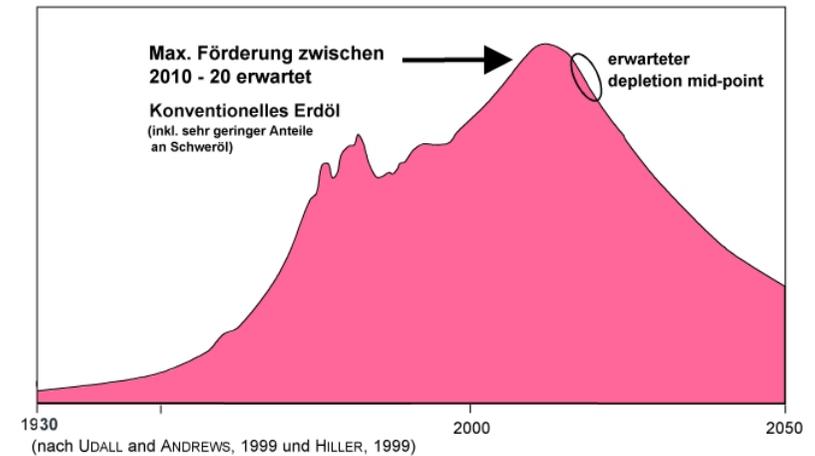


Abbildung 11: Weltweite Erdölproduktion 1930 - 2050

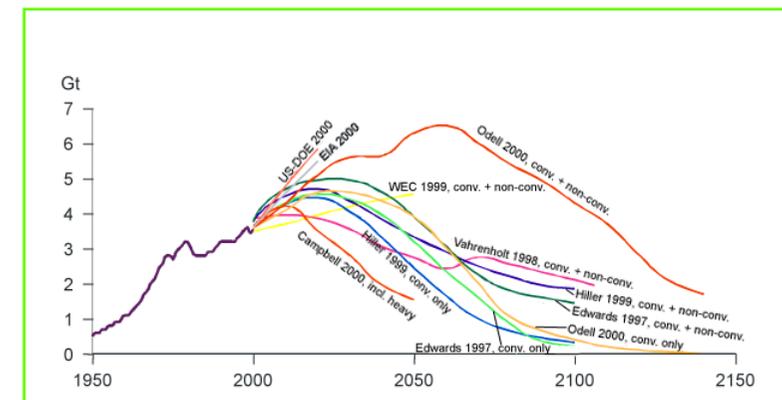


Abbildung 12: Auswahl verschiedener Prognosen für die Erdölproduktion

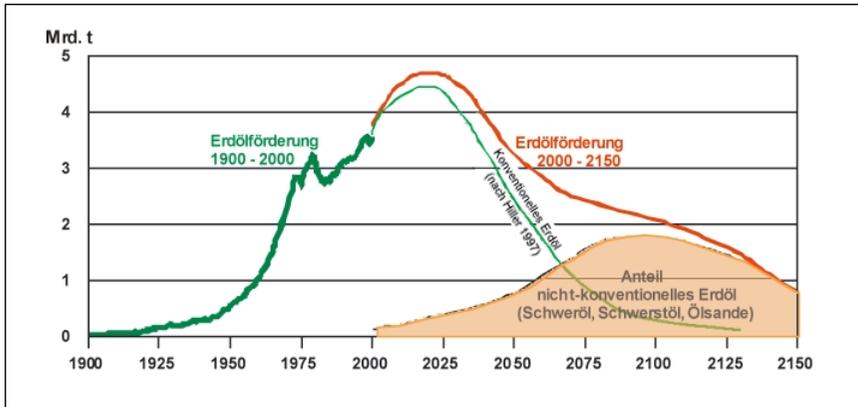


Abbildung 13: Weltweite Erdölförderung 1900 – 2150
Rückblende und Versuch eines Ausblicks

Ein von Shell vorgelegtes Szenario (Vahrenholt 1998) der Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs zeigt in 2060 einen Anteil von regenerativen Energien von über 50%. Erdöl ist in allen seinen Anwendungen wie Transport, Wärme oder Rohstoff für die Petrochemie ersetzbar.

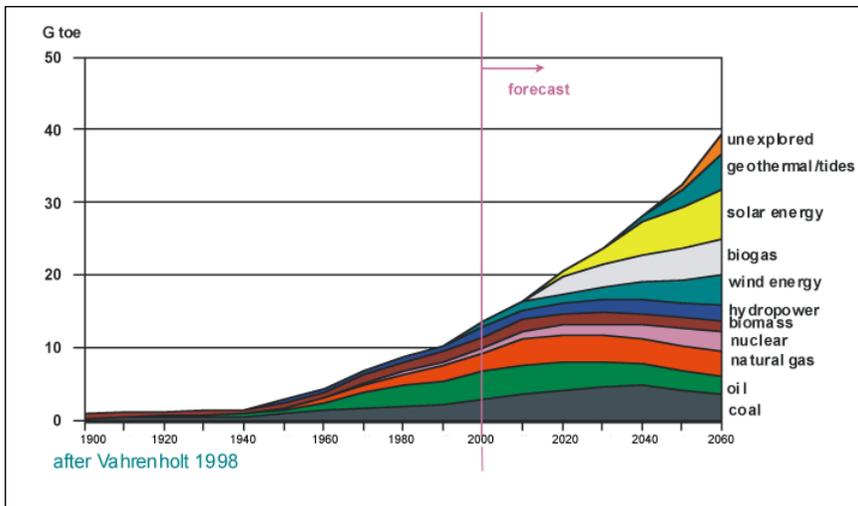


Abbildung 14: Entwicklung des Primärenergie-Verbrauchs weltweit

Ein möglicher Lastwechsel der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas in Beziehung zur Entwicklung der Weltbevölkerung ist in Abbildung 15 dargestellt. Erdgas wird zunächst einen Teil der von Erdöl gestellten Energie übernehmen, dann aber in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts auch das Fördermaximum überschreiten. Wegen der günstigen Situation der Kohle hinsichtlich Reserven und Ressourcen sind in dem dargestellten Zeitraum noch keinerlei Grenzen zu erkennen.

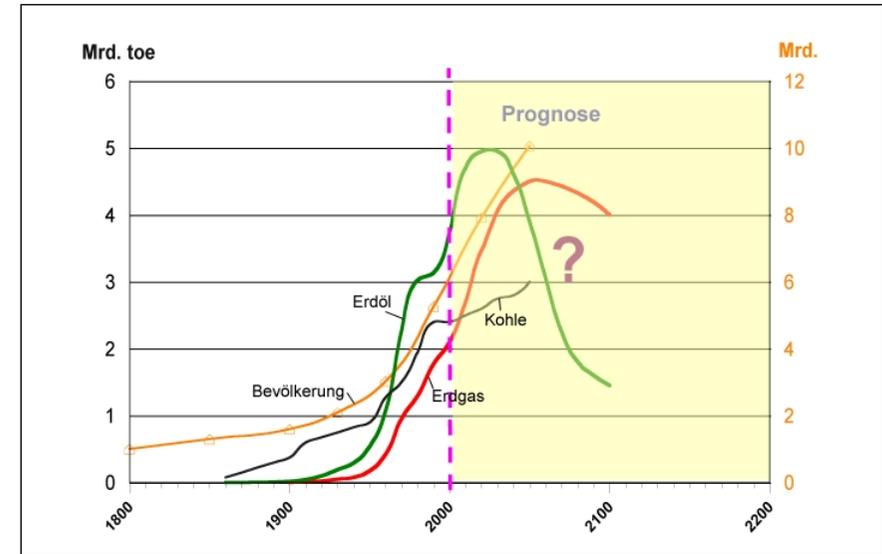


Abbildung 15: Entwicklung des Energieverbrauchs und der Weltbevölkerung

Das sog. Erdöl-Zeitalter wird keineswegs dadurch enden, dass alles im Untergrund förderbare Erdöl gewonnen wurde. Vielmehr werden Fragen wie Umwelt, Klima, Akzeptanz, Einsparungen und steigende Förderkosten, die intelligentere Lösungen mit anderen Energieträgern möglich machen, diese kurze Episode in der Geschichte der Menschheit beenden. Erdöl als Rohstoff in kleineren Mengen wird noch in Jahrhunderten gefördert werden. Kreativität des Menschen wird zu einem neuen Energiemix jenseits der Kohlenwasserstoffe Erdöl und Erdgas führen. Energie ist ausreichend vorhanden und der Welt werden nicht die Lichter ausgehen, auch angesichts steigender Weltbevölkerung und zunehmenden Wohlstands.

Ausgewählte Referenzen

BGR: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen,
in: Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, XXIV, 398 S., Schweizerbart, Stuttgart 1998

K. Hiller & P.Kehrer: Erfahrungskurven bei der Suche nach und Förderung von Erdöl,
in: Erdöl, Erdgas, Kohle, **116,9**, 427 – 430, Hamburg 2000

Danksagung

Herr Dipl.Geol. Hilmar Rempel von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
war freundlicherweise bei der Gestellung von Daten und Abbildungen behilflich.