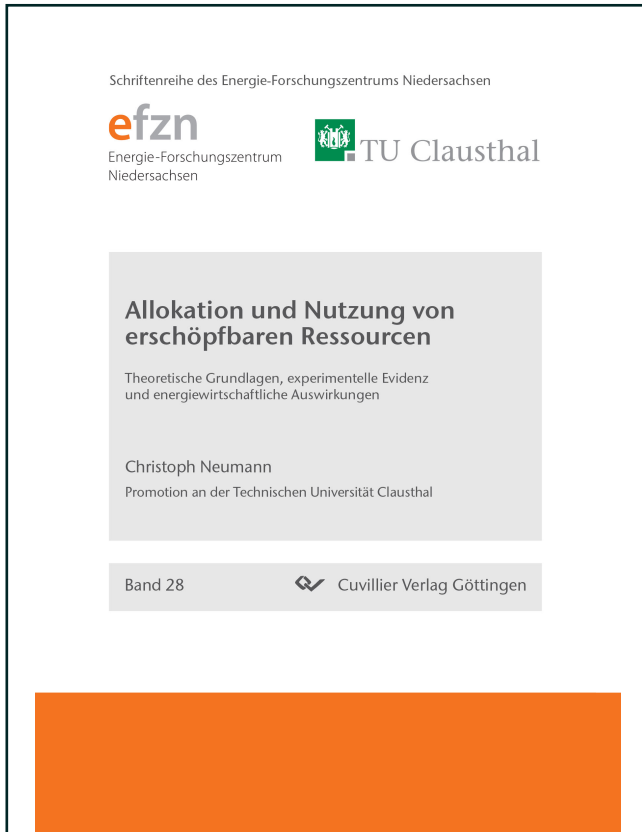




Christoph Neumann (Autor)
Allokation und Nutzung von erschöpfbaren Ressourcen
*Theoretische Grundlagen, experimentelle Evidenz und
energiewirtschaftliche Auswirkungen*



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7019>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

“Scientific progress relies crucially on the testing of theories.”

Falk und Fehr (2003, S. 399)

1 Einleitung

Die Versorgung mit Rohstoffen und Energie ist für eine Volkswirtschaft von essentieller Bedeutung, um die Bedürfnisse der Menschen zu befriedigen und die Fortentwicklung der Gesellschaft sicherzustellen. Ein Großteil der heute verwendeten Primärenergieträger sind fossile und für unsere Zeithorizonte *erschöpfbare Ressourcen* wie Erdöl, Erdgas, Kohle und Natururan. Das Erdöl ist immer noch der wichtigste Primärenergieträger in Deutschland und in der Welt. Trotz großer politischer Bemühungen einen höheren Anteil an einer regenerativen Energieversorgung anzustreben, wird die Zukunft von einem steigenden Weltenergiebedarf und einer Dominanz von fossilen Energieträgern gekennzeichnet sein.

Die Preisentwicklung einerseits und die tatsächliche Nutzung der Energierohstoffe andererseits sind für die Angebotsländer sowie für die Nachfrageländer gleichermaßen hoch bedeutend. Nicht zuletzt mit der bislang längsten und größten Preissteigerung von Erdöl zwischen 2003 und 2008 (Bretschger et. al 2010), erlangte das Thema der Preisentwicklung einmal mehr eine hohe Aufmerksamkeit. Vor diesem Hintergrund bestehen interessante Fragestellungen, ob und unter welchen Bedingungen sich wohlfahrtsoptimale Preis- und Abbaupfade einstellen. Auch angesichts von Preissprüngen und einer volatilen Preisentwicklung stellt sich die Frage, inwieweit Märkte in der Lage sind, die Allokation von Ressourcen in einer Wirtschaft optimal zu steuern (Bretschger et. al 2010). Um Fragen wie diese beantworten zu können, ist es essentiell, ein System



von Aussagen zur Erklärung dieser Erscheinungen und der ihnen zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten zu besitzen.² Mit anderen Worten stellt sich die Frage, welche Theorie die Ökonomie für die Allokation und Nutzung von erschöpfbaren Ressourcen anbietet.

Einen Grundstein zur Ökonomik erschöpfbarer Ressourcen stellte Harold Hotelling in seinem Artikel „The economics of exhaustible resources“ bereits im Jahr 1931 vor (Hotelling 1931). Dadurch, dass eine heute verbrauchte Einheit zukünftig keinen Nutzen mehr stiftet, ergibt sich die volkswirtschaftliche Frage nach der optimalen intertemporalen Allokation von erschöpfbaren Ressourcen. Hotelling postuliert, dass eine sogenannte Knappheitsprämie³, die die Opportunitätskosten der heutigen Nutzung wieder spiegelt, berücksichtigt werden muss. Die Hotelling-Regel besagt: Der Preis – genauer gesagt die Knappheitsprämie – einer erschöpfbaren Ressource wächst mit der Zinsrate im Zeitverlauf an. Sofern die Annahmen der Standardtheorie erfüllt sind, impliziert diese Gleichgewichtslösung gleichzeitig ein soziales Optimum.

Diese Vorstellung liefert auch heute noch das Grundverständnis, wie sich ein Markt mit einer erschöpfbaren Ressource entwickeln sollte. Rund 80 Jahre nach Hotellings Veröffentlichung stellt Livernois (2009, S. 38) fest,

“The Hotelling Rule continues to be a central feature of models of nonrenewable resource markets in the literature”.

Nicht nur in der ökonomischen Literatur, sondern auch in ressourcen- bzw. energieökonomischen Lehrveranstaltungen an Hochschulen hat sich dieses Grundmodell etabliert. Mit Blick auf die zahlreichen Studien zur empirischen Überprüfung der Theorie muss jedoch das Resümee gezogen werden, dass – neben wenigen Ausnahmen – diese Tests oftmals zu einer Ablehnung der Theorie führen.

Die Gründe hierfür können in zwei Aspekte unterteilt werden. Zum einen kann argumentiert werden, dass die genutzten Modelle die komplexe Realität nicht hinreichend genau abbilden und damit (möglicherweise entscheidende) Variablen unberücksichtigt bleiben. Neben der Kritik an den Modellen an sich wird zum anderen im Rahmen dieser Arbeit Kritik an der bislang verwendeten Methode geübt: Die für die Untersuchung im

² In Anlehnung der Definition des Begriffs „Theorie“ gemäß Duden (2014).

³ In der Literatur werden diverse Synonyme verwendet, u.a. Schattenpreis, royalty, scarcity rent, Knappheits-, Hotelling-Rente, Nutzungskosten.

Fokus stehende Variable ist nicht direkt erfassbar. Marktpreise sind aggregierte Werte aus verschiedenen Komponenten, so dass die Knappheitsprämie nicht zu beobachten ist und – anstelle dessen – geschätzt werden muss. Die in diesen Sektoren üblicherweise vertikal integrierten Unternehmen stellen zudem nicht die Daten zur Verfügung, die für die Analyse hilfreich wären. Infolge dessen ist die Theorie nur mit erheblichen Hindernissen zu überprüfen.

Grundsätzlich ist bei Modellen, die sich empirisch bislang nicht bewährt haben, Vorsicht geboten, insbesondere wenn weitreichende Schlussfolgerungen hieraus abgeleitet werden (Erlei 2008b). Auch Hart und Spiro (2011) warnen davor, aufgrund der theoretischen Überlegungen klare Empfehlungen – beispielsweise in der Energie- und Klimapolitik – auf Basis eines sogenannten grünen Paradoxons auszusprechen, welches auf der hier diskutierten Theorie der Ressourcenökonomie fußt (vgl. Kapitel 3).

Auf der anderen Seite bestehen Argumente, warum die Theorie der erschöpfbaren Ressourcen – trotz der entmutigenden empirischen Sachlage – eine Berechtigung haben könnte. Erstens basiert sie auf der insgesamt bewährten ökonomischen Gleichgewichtstheorie. Zweitens kann ein Ignorieren der Theorie zu hohen sozialen Kosten führen. Und drittens können ressourcenökonomische Modelle auf wichtige Wirkungszusammenhänge aufmerksam machen. Dadurch kann das Verständnis von Märkten mit erschöpfbaren Ressourcen verbessert werden (Erlei 2008b).

Aus diesen Gründen ist es essentiell, die Forschungsaktivitäten weiterhin zu verfolgen, um die Theorie einer umfassenden und adäquaten Überprüfung zu unterziehen. Dabei stellt sich die Frage, ob eine neue bzw. andere Herangehensweise einen Ausweg aus der methodischen Misere schaffen kann.

Lange Zeit herrschte ein Konsens in der Ökonomie, dass eine experimentelle Methode – wie sie zum Beispiel in der Physik oder Biologie genutzt wird – in den Wirtschaftswissenschaften nicht anwendbar sei und man sich wie in der Astronomie mit Beobachtungen begnügen müsse. Seit einigen Jahren erfreut sich jedoch die experimentelle Forschung in den Wirtschaftswissenschaften immer mehr an Beliebtheit. Nicht zuletzt



durch die Verleihung des Nobelpreises an Vernon L. Smith⁴ (in 2002) oder Elinor Ostrom (in 2009) hat die Untersuchungsmethode Aufmerksamkeit auf sich gezogen.

In dieser Arbeit soll diese verhältnismäßig neue Methodik angewendet werden, um die bestehenden, angesprochenen Unzulänglichkeiten zu umgehen. Nach eigenen Recherchen ist dieser am Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre der Technischen Universität Clausthal begonnene Ansatz der erste⁵, der die Theorie der erschöpfbaren Ressourcen als wettbewerblichen Markt – ausgestaltet in einer doppelten Auktion – in einem Labor einer Theorieüberprüfung unterzieht. Auch die experimentell untersuchten Modellerweiterungen, wie die Hinzunahme einer perfekten Substitutionsmöglichkeit, erscheinen bei Sichtung der vorliegenden Literatur Neuland zu sein.

Ziel dieser Arbeit ist es, mithilfe der experimentellen Wirtschaftsforschung einen Ausweg über die Methodik zu schaffen, um zu überprüfen, inwieweit mit menschlichem Verhalten unter restriktiven Randbedingungen die theoretischen Überlegungen verifiziert oder falsifiziert werden können. Dadurch soll ein Beitrag geliefert werden, der eine signifikante Ergänzung zu den zahlreichen traditionell-empirischen Untersuchungen sowie theoretischen Überlegungen darstellt.

Abbildung 1.1 zeigt die Struktur der vorliegenden Arbeit. Ein Kasten repräsentiert jeweils eines der sechs Kapitel. Da das Themenspektrum an mehreren Ansatzpunkten mit der Sinnhaftigkeit umwelt- und energiepolitischer Maßnahmen verknüpft ist, wird an verschiedenen Stellen hierzu Stellung bezogen. Die Interdependenz entsteht dadurch, dass die Nutzung von fossilen Energieressourcen ein maßgeblicher Treiber für die anthropogen verursachten Emissionen von Treibhausgasen ist.

⁴ „für den Einsatz von Laborexperimenten als Werkzeug in der empirischen ökonomischen Analyse [...]“ (Nobelpreise 2014).

⁵ Neben lediglich einem Arbeitspapier von Sonnemans und Veldhuizen (2011) existiert nach eigenen Recherchen keine weitere Studie, die einen experimentellen Ansatz wählt. In dem Beitrag wird jedoch weniger auf eine Theorieüberprüfung fokussiert, als vielmehr die Suche nach einem Fehler bei der Umsetzung des Modells in der Praxis in den Mittelpunkt gestellt (vgl. Kapitel 4.3).

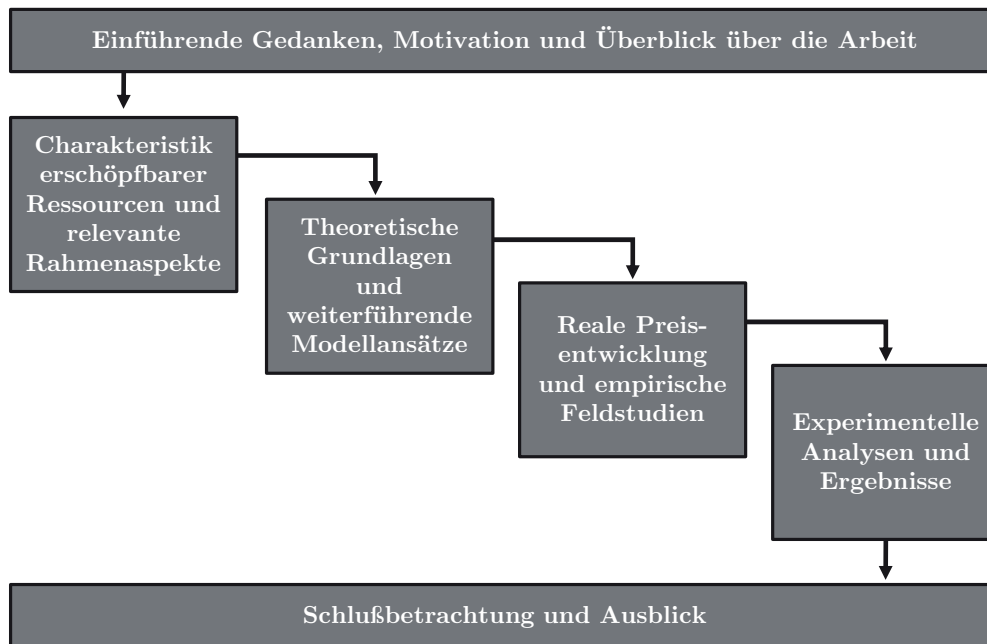


Abbildung 1.1 Kapitelstruktur der vorliegenden Ausarbeitung.

Im zweiten Kapitel wird zunächst ein Überblick über die erschöpfbaren Ressourcen gegeben, wobei eine Fokussierung auf die Charakteristika und die tatsächliche Nutzung von Energieressourcen erfolgt. Das dritte Kapitel legt die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit und stellt zunächst das Hotelling-Modell vor. Anschließend werden verschiedene Modellparameter variiert und deren Einflüsse diskutiert, bevor näher auf drei Modellerweiterungen eingegangen wird. Auch das angrenzende Thema der grünen Paradoxa wird hier aufgegriffen. Im darauffolgenden Kapitel 4 soll die Preisbildung auf realen Ressourcenmärkten im Mittelpunkt stehen. Ein Schwerpunkt in diesem Abschnitt ist die Analyse der bisherigen empirischen Ergebnisse. Zudem wird ausgeführt, wie verschiedene Einflussfaktoren (z.B. staatliche Interventionen auf Ressourcenmärkten) wirken. Das fünfte Kapitel beschreibt die experimentellen Untersuchungen des Autors und bildet damit den Kern der vorliegenden Arbeit. Ausgehend von einer Einführung in die Methodik und das zugrunde gelegte Modell wird das Design der Experimente erläutert. Insgesamt vier verschiedene Treatments werden im Anschluss vorgestellt und ausgewertet. Dem eiligen Leser sei das jeweilige Kurzfazit am Ende der Kapitel 2 bis 5 empfohlen. Das letzte Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungsfragen.



„Menschliches Leben und Wirtschaften ist ohne die Entnahme von Ressourcen aus der Natur nicht möglich.“

Endres und Querner (1993, S.V)

2 Erschöpfbare Ressourcen

Ziel dieses Kapitels ist es, die relevanten Eigenschaften der wichtigsten erschöpfbaren Ressourcen aufzuzeigen. Ein Schwerpunkt der Analyse wird auf den Kosten der Bereitstellung der Energierohstoffe liegen. Das Problem der anthropogen verursachten THG⁶-Emissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe soll inklusive eines ökonomischen Lösungsansatzes thematisiert werden, um die Implikationen für die Ressourcenökonomie hieraus abzuleiten. Schließlich werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

2.1 Begriffsdefinitionen

Erschöpfbare Ressourcen gehören zu den natürlichen Ressourcen. Unter letzterem versteht man Ressourcen, die man der Natur entnimmt, da sie einen ökonomischen Wert aufweisen (Endres und Querner 1993). Abbildung 2.1 zeigt die Unterscheidung⁷ bei den natürlichen Ressourcen zwischen erschöpfbaren und nicht erschöpfbaren.

⁶ Treibhausgas

⁷ Gegenüber der Darstellung sind durchaus auch andere Klassifizierungen denkbar. So könnte man beispielsweise definieren, dass natürliche Ressourcen Bestandteile der Natur mit einem ökonomischen Wert sind, die eine Regenerationsquote sowie eine Recyclingquote aufweisen. Sofern beide Quoten den Wert null aufweisen, resultiert die Kategorie der erschöpfbaren, nicht recycelbaren natürlichen Ressource.

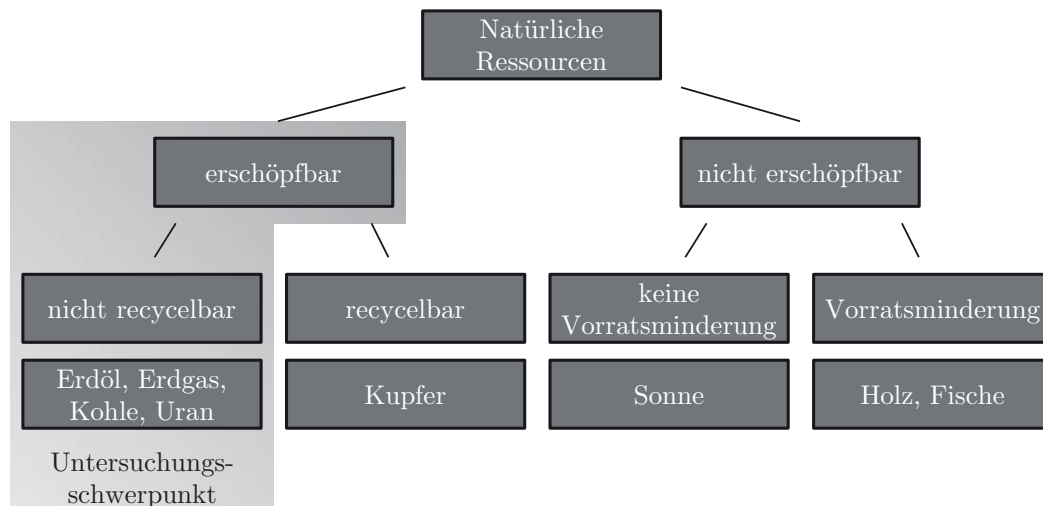


Abbildung 2.1 Definition des Ressourcenbegriffs.

Der Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit sind erschöpfbare, nicht recycelbare Ressourcen. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Energierohstoffe dieser Kategorie näher vorgestellt werden: Erdöl und –gas sowie Kohle und Uran. Für diese Ressourcen gilt, dass der auf der Erde vorhandene Gesamtbestand nicht erweiterbar ist, da der notwendige Entstehungszeitraum nicht vergleichbar mit den Zeiträumen menschlicher Planung ist. In der Folge bedeutet dies, dass der Verbrauch einer Ressourceneinheit den Gesamtbestand um eine Einheit reduziert.

Der Unterschied bei den *recycelbaren* Ressourcen ist der, dass eine Ressourcennahme nicht (vollständig) zu einer Bestandsminderung führt. Kupfer beispielsweise ist theoretisch ohne Qualitätsverluste zu 100% recycelbar. Tatsächlich beträgt die Wiederverwertungsquote in Deutschland über 50% (Langolf 2011).

Der Bereich der *nicht erschöpfbaren* Ressourcen gliedert sich in solche mit einer Vorratsminderung und solche ohne. Letztere sind auch unter dem Begriff der Backstop-Technologie bekannt. In den späteren Kapiteln wird dieser Aspekt einer unbegrenzt zur Verfügung stehenden Substitutionstechnologie theoretisch (Kapitel 3.3.2) sowie auch experimentell (Kapitel 5.6) diskutiert.

Um einige grundsätzliche Begrifflichkeiten für dieses aber auch die nachstehenden Kapitel zu klären werden weitere Definitionen im Folgenden vorgestellt.

Energierohstoffe werden gemäß einer Vorratsklassifikation eingeordnet. Dabei werden unter **Reserven** die Mengen eines Energierohstoffes verstanden, „die mit großer Ge-

nauigkeit erfasst wurden und [die] mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können“ (BGR 2009, S. 83). Dadurch wird deutlich, dass die Reserven vom Wissensstand über die Lagerstätte, vom Rohstoffpreis und vom Stand der Technik abhängen. Davon abzugrenzen⁸ sind **Ressourcen**, die die Mengen eines Energierohstoffes umfassen, „die geologisch nachgewiesen sind, aber derzeit nicht wirtschaftlich gewonnen werden können und die Mengen, die nicht nachgewiesen sind, aber aus geologischen Gründen in dem betreffenden Gebiet erwartet werden können“. Die Summe aus Reserven und Ressourcen werden als verbleibendes Potenzial bezeichnet. Das sogenannte Gesamtpotenzial⁹ ergänzt das verbleibende Potenzial um die insgesamt bereits geförderten Mengen (BGR 2009, S. 83).

Üblicherweise werden diese Zusammenhänge, wie Abbildung 2.2 zeigt, in sogenannten McKelvey-Diagrammen visualisiert.

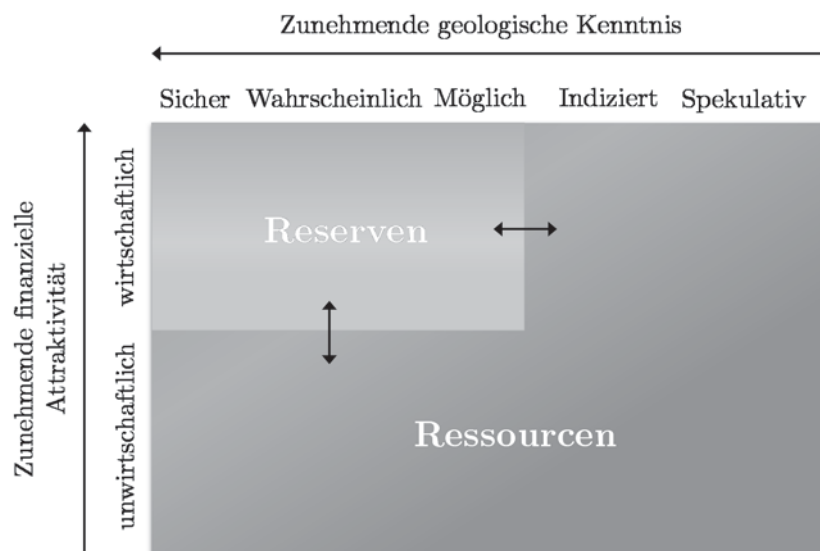


Abbildung 2.2 Reserven und Ressourcen im McKelvey-Diagramm.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an McKelvey (1972).

Auf der Ordinate ist die ökonomische Dimension abgetragen. Steigt beispielsweise der Rohstoffpreis, werden Anteile der Ressourcen den Reserven zugeführt. Gleichzeitig sind hier aber auch indirekt technische Aspekte einflussnehmend. Eröffnen sich beispielsweise neue Gewinnungsmöglichkeiten, können in der Folge Ressourcen in wirtschaftlich

⁸ Während die Reserven in der ökonomischen Literatur üblicherweise als Teilmenge der Ressourcen definiert werden, wird sich hier dem Verständnis der BGR angeschlossen, dass Reserven und Ressourcen getrennte Mengen sind.

⁹ Gebräuchlich für Kohlenwasserstoffe ist auch Estimated Ultimate Recovery, EUR (BGR 2013).

gewinnbare Einheiten umgewandelt werden. Auf der Abszisse sind die naturwissenschaftlichen bzw. geologischen Aspekte zusammengefasst. Steigt der Grad der geologischen Kenntnis, kann eine Lagerstätte in die Kategorie der Reserven überführt werden.

Um Aussagen über die **Reichweiten** von Reserven und Ressourcen zu treffen, ist die Angabe verschiedener Kennzahlen möglich. Bei Annahme einer konstanten Wachstumsrate der Förderung mit einem exponentiellen Wachstum lässt sich eine **dynamische Reichweite** modellieren (Ströbele et. al 2010):

$$\int_0^T e^{wt} \cdot F dt = S_0 \quad (2-1)$$

Dabei beschreibt w die Wachstumsrate, F die Jahresförderung und S_0 den Reservenbestand oder Ressourcenbestand. Für den Spezialfall einer Wachstumsrate von $w = 0$ folgt

$$T_{statisch} = S_0/F \quad (2-2)$$

Damit ergibt sich die **statische Reichweite**¹⁰ aus dem Quotienten der Reserven S_0 und der derzeitigen Jahresförderung F . Die Aussagekraft dieser Kennzahl ist jedoch begrenzt und der Begriff „Reichweite“ ist nicht wörtlich zu nehmen, da die Produktion sowie die Menge an Reserven zeitlich veränderliche Größen darstellen. Daraus ist abzuleiten, dass diese oft angeführte Kenngröße weniger als Indikator der Rohstoffverfügbarkeit geeignet ist. So ist die Höhe der statischen Reichweite für Erdöl in den letzten Jahrzehnten gestiegen bzw. konstant geblieben. Ein Steigen der statischen Reichweite könnte beispielsweise daraus resultieren, dass sich das Interesse der Explorationsindustrie an diesem Rohstoff erhöht hat oder dass sich die Nachfrage bzw. Jahresförderung¹¹ aufgrund einer Wirtschaftskrise verringert hat. Ein sehr extremes Beispiel liefert das Land China: Zeitweilig ist dort pro Woche ein Kohlekraftwerk errichtet worden.¹² In Folge der hohen Kohlenachfrage ist die Jahresförderung in China in den letzten 20

¹⁰ Auch R/P-Ratio genannt (R=Reserves, P=Production).

¹¹ Im langjährigen Durchschnitt können Verbrauch und Produktion bzw. Förderung als Synonym verwendet werden, da die gewonnenen Energierohstoffe auch verbraucht werden.

¹² Unterstellt man eine durchschnittliche Kraftwerksgröße, bedeutet dies, dass China *in einem Jahr* in einer Größenordnung installierte Kapazität errichtet hat, wie Deutschland mit einer Jahreshöchstlast von rund 80 GW *insgesamt* benötigt.



Jahren um den Faktor drei angestiegen (BP 2014). Ceteris paribus würde dies eine Drittelung der statischen Kohlereichweite bedeuten.

Die dynamische Reichweite erweitert die Betrachtung um den Aspekt einer von null ungleichen Wachstumsrate der Förderung. Unterstellt man eine jährliche Wachstumsrate der Ölnachfrage mit einem durchaus realistischen Wert von ca. einem Prozent, würde sich der Ölbedarf theoretisch¹³ nach ca. 70 Jahren verdoppeln. Mit dem Ansatz aus Formel (2-1) ergeben sich folgende Zusammenhänge.

$$\left| \frac{1}{w} e^{wt} F \right|_0^{T_{dyn}} = \left(\frac{1}{w} e^{wT_{dyn}} F \right) - \left(\frac{1}{w} e^{w \cdot 0} F \right) = S_0 \quad (2-3)$$

$$\frac{1}{w} F (e^{wT_{dyn}} - 1) = S_0 \quad (2-4)$$

$$e^{wT_{dyn}} = \frac{S_0 w}{F} + 1 \quad (2-5)$$

$$T_{dyn} = \frac{1}{w} \ln \left(\frac{S_0 w}{F} + 1 \right) \quad (2-6)$$

Mit Gleichung (2-2) ergibt sich die dynamische Reichweite zu

$$T_{dyn} = \frac{1}{w} \ln (T_{statisch} w + 1) \quad (2-7)$$

Um die beiden Ansätze [Formel (2-2) und (2-7)] mit einem Rechenbeispiel zu veranschaulichen, ist in der Tabelle 2.1 auf Basis der weltweiten Reserven des Erdöls im Jahr 2012 die statische und dynamische Reichweite berechnet.

Tabelle 2.1 Statische und dynamische Reichweite im Vergleich am Beispiel Erdöl im Jahr 2012.

S_0 [Mrd. t]	F [Mrd. t]	$T_{statisch}$ [a]	w [%]	T_{dyn} [a]
216	4	54	0,5	47,8
			1,0	43,2
			2,0	36,6
			3,0	32,1
			4,0	28,8

Hinweis: Eigene Berechnungen. Die Datengrundlage des Rechenbeispiels (Reserven und der Jahresförderung) ist BGR (2013) entnommen. Der Wert der Reserven umfasst konventionelle sowie nicht-konventionelle Reserven.

¹³ Die Verdopplungszeit lässt sich nach einer Faustregel näherungsweise über $\ln(2)/Zins$ bestimmen.

Der konstante Wert der statischen Reichweite ist dabei stets größer als die Werte der dynamischen Reichweite, die mit steigender Wachstumsrate der Förderung kleiner werden. Entgegen einer etwaigen Intuition verringert sich die dynamische Reichweite im Vergleich zur statischen um rund 11 Jahre bzw. 20%, wenn eine Wachstumsrate von „nur“ 1% unterstellt würde.

Belastbare Informationen über die langfristige Verfügbarkeit eines Rohstoffs liefert jedoch auch die Kennzahl der dynamischen Reichweite nicht. Vielmehr handelt es sich um Momentaufnahmen in einem sich dynamisch entwickelnden System und nicht um Angaben des endgültigen Erschöpfungszeitpunkts (BGR 2008). Das vielleicht prominenteste Beispiel, wie schwer es ist, Prognosen in diesem Bereich zu erstellen, liefert der Bericht des Club of Rome „The Limits to Growth“ von 1972. Um dennoch Aussagen zur Versorgungssicherheit und Ressourcenverfügbarkeit zu treffen und eine objektive Bewertung zu ermöglichen, werden üblicherweise Risikoindikatoren gebildet. Diese beziehen sich jedoch eher auf die kurz- und mittelfristige Perspektive und zielen damit auf vorübergehende Engpässe ab. Dabei werden beispielsweise die Importanteile eines Rohstoffs aus den verschiedenen Ländern mit Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich Angebotsunterbrechungen bewertet. Ergebnis entsprechender Untersuchungen ist die Feststellung eines seit den 70iger Jahren gestiegenen Energieversorgungsrisikos, das insbesondere durch erhöhte Importquoten verursacht wird (Frondel 2009).

2.2 Energierohstoffe

2.2.1 Energierohstoffe in der globalen Energieversorgung

Zunächst soll ein historischer Überblick über das Energiezeitalter des Menschen gegeben werden. Abbildung 2.3 zeigt schematisch, dass wir uns gegenwärtig im „fossilen Zeitalter“ befinden. Da die bedeutsamsten erneuerbaren Energien alle den gemeinsamen Ursprung¹⁴ in der Strahlungsenergie der Sonne haben, wird in der Abbildung der erste Abschnitt als „1. Solarenergiezeitalter“ bezeichnet. Bis ins 19. Jahrhundert hinein war die Biomasse, also das Feuerholz, die meist genutzte Energiequelle. Mit der Industrialisierung ging der Übergang auf die Kohle und später auf das Erdöl als dominierender

¹⁴ Eine direkte Nutzung der Sonnenenergie ist bei der Solarthermie sowie Photovoltaik (PV) bekannt. Die Sonne war (und ist) aber auch eine indirekte Energiequelle für die erneuerbaren Energien Wasserkraft, Windenergie (z.B. Mühlen, Schifffahrt) und Biomasse (z.B. Feuerholz).



Energieträger einher. Vor diesem Hintergrund ist die Nutzung von fossilen Energieresourcen noch relativ jung. Was in einem Entstehungsprozess über viele Millionen von Jahren entstanden ist, wird derzeit im fossilen Zeitalter in wenigen hundert Jahren verbraucht.

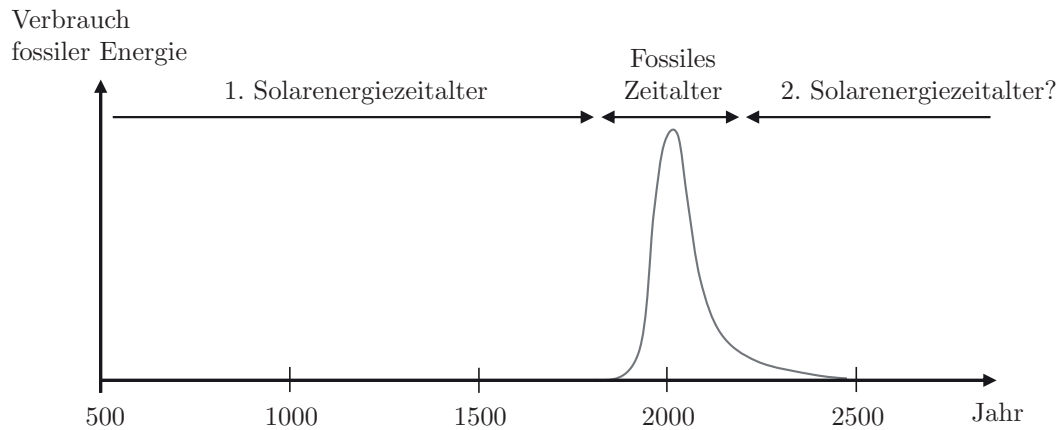


Abbildung 2.3 Schematischer Überblick des Energiezeitalters des Menschen.

Quelle: Eigene Darstellung nach Jischa (2005).

Insbesondere getrieben durch die Endlichkeit der Ressourcen sowie durch das CO₂-Senkenproblem wird seit Anfang des Jahrtausends die Vision eines 2. Solarenergiezeitalters gesponnen. Um nur ein Beispiel als Indikator für diesen Trend zu nennen sei auf die weltweiten Neuinstallationen von PV-Anlagen hingewiesen. In 2013 betrug die neu geschaffene Kapazität 37,5 GWp/a, für 2019 wird ein Anstieg um 75% auf 65,6 GWp/a erwartet (Lux 2014). Abgeleitet aus einem riesigen theoretischen Potenzial der Sonnenenergie entstehen Zukunftsvisionen, in denen der Übergang zu einem „2. Solarenergiezeitalter“ – zumindest mit Blick auf die Stromversorgung¹⁵ – als realistisches Szenario darstellt wird. Entsprechende Technologien müssen jedoch nicht nur hinsichtlich der Quantität, sondern auch mit einer vergleichbaren Qualität die Energieversorgung der Menschheit gewährleisten. Die fossilen Energieträger weisen bis heute in ihren Eigenschaften eine Überlegenheit auf, die zu einer hohen Dominanz dieser Energiequellen

¹⁵ Beispielsweise hat der Sachverständigenrat für Umweltfragen in Deutschland eine Studie verfasst, in der die *vollständige* Versorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien bis 2050 für „möglich, sicher und bezahlbar“ gehalten wird (SRU 2011, S. 31). Die Bundesregierung hat in 2010 ein Energiekonzept veröffentlicht, welches den Übergang auf eine größtenteils regenerative Energieversorgung vorsieht (BMWi 2010).

geführt haben. Die hohe Energiedichte und die durch den festen oder flüssigen Aggregatzustand ermöglichte Transport¹⁶- und Lagerfähigkeit und damit Speicherbarkeit sind entscheidende Vorteile. Große und kostengünstig erschließbare Vorkommen kombiniert mit bestehenden Infrastrukturen und investitionsintensiven Technologien verlangsamten Transformationsprozesse. Abbildung 2.4 zeigt, dass in 2013 der weltweite Primärenergieverbrauch (PEV) zu 91% auf fossilen Energieträgern basierte. Immerhin 87% der Ressourcen beinhalten in chemisch gebundener Form Kohlenstoff.

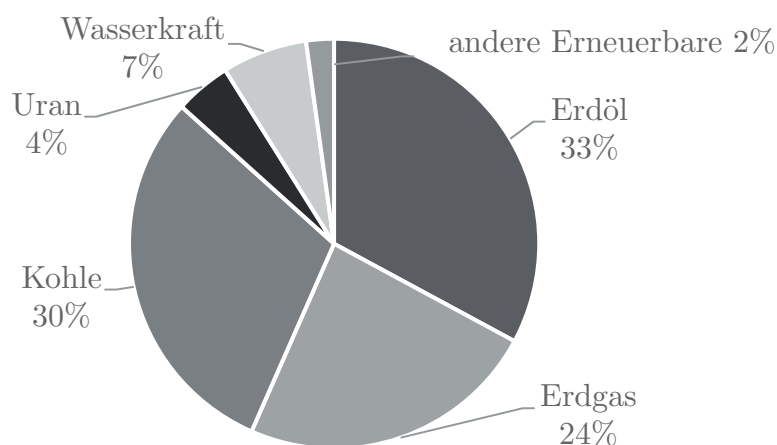


Abbildung 2.4 Weltweiter Primärenergieverbrauch in 2013 nach Energieträgern.

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von BP (2014).

Insgesamt betrug der PEV in 2013 weltweit 12.730,4 Mio. toe. Davon entfielen 43% auf OECD-Länder und 57% auf Nicht-OECD-Länder, wobei letztere deutlich höhere Wachstumsraten im Hinblick auf die Energienachfrage aufweisen. Separat betrachtet hatte die europäische Union einen Anteil von 13%. Deutschland alleine weist einen Wert¹⁷ von 2,6% am weltweiten PEV auf (BP 2014).

Auch wenn der relative Anteil der fossilen Energieträger zukünftig tendenziell sinken wird, steigt der absolute Verbrauch getrieben durch eine steigende Nachfrage nach Energie weiter an. Vergleicht man die heutigen Verbrauchsdaten mit dem Szenario der Internationalen Energieagentur (IEA) für 2035, so stellt man fest, dass sich der PEV in den nächsten 20 Jahren um rund 36% erhöhen wird (BP 2014 i.V.m. IEA 2013).

¹⁶ Gilt nicht für Braunkohle, die aufgrund eines relativ hohen Wasseranteils aus wirtschaftlichen Gründen nicht über weite Strecken transportiert wird.

¹⁷ In AGEB (2014) wird ein PEV für Deutschland von 13.908 PJ ausgewiesen. Mit dem Umrechnungsfaktor von 1PJ/0,024 Mio. toe ergibt sich der Vergleichswert i.H.v. 333,8 Mio. toe (2,6%).

Insbesondere eine steigende Nachfrage von aufstrebenden Märkten in Nicht-OECD-Staaten wird hierfür die Ursache sein. Der Anteil der fossilen Ressourcen geht um 9% auf 81% zurück und bleibt damit dominierend. Die Nutzung von kohlenstoffbasierten Energieträgern sinkt um 13% auf 76%. Der steigende Anteil der erneuerbaren Energien wird gemäß der Prognose jedoch nicht den absoluten Anstieg des Anteils der kohlenstoffbasierten Energieträger verhindern, die zum Klimaproblem beitragen. Abbildung 2.5 fasst die gemachten Ausführungen zum prognostizierten globalen PEV für das Jahr 2035 grafisch zusammen.

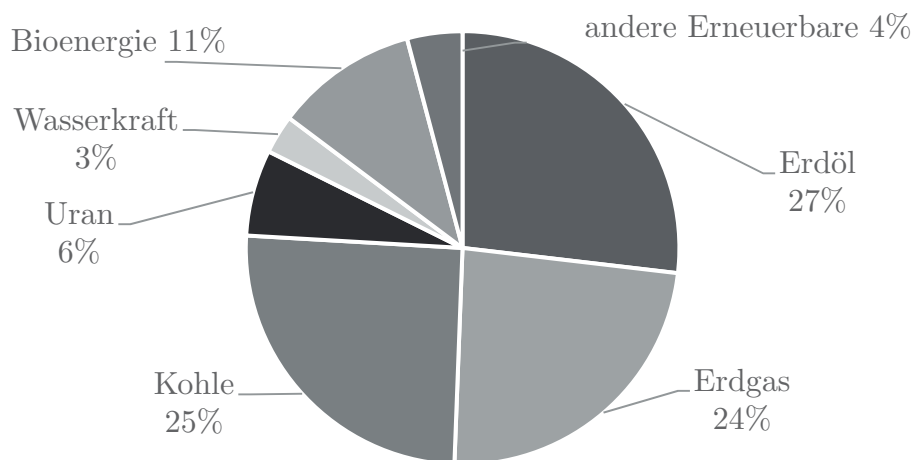


Abbildung 2.5 Prognose des weltweiten Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern für das Jahr 2035 im „New Policies Scenario“¹⁸ der IEA.

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von IEA (2013).

Im Folgenden sollen die Energieträger Erdöl, -gas, Kohle und Uran, die zu der Kategorie der erschöpfbaren Ressourcen zu zählen sind, näher betrachtet werden. Ziel ist es, nach einem *Überblick* und *Einblick in aktuelle Entwicklungen* zu der jeweiligen Energieressource insbesondere auf die *Kosten* der Bereitstellung einzugehen. Auf diese Informationen sollen an späteren Stellen dieser Arbeit regelmäßig zurückgegriffen werden.

2.2.1.1 Erdöl

Der über Millionen von Jahren unter hohem Druck und hoher Temperatur entstandene Energierohstoff ist heute der meist genutzte Primärenergieträger. Für die Wirtschaft war die günstige Bereitstellung von Energie in Form von Erdöl ein entscheidender

¹⁸ Das „New Policies Scenario“ dient als Basisszenario im World Energy Outlook und unterstellt, dass im Konsens gefundene politische Klimaschutzmaßnahmen auch Umsetzung finden. Eine detaillierte Beschreibung der Annahmen ist in IEA (2013) ab S. 34 zu finden.

Treiber für den Industrialisierungsprozess. Auch in Zukunft wird das Erdöl der weltweit wichtigste Energieträger bleiben.

Erdöl ist geologisch sehr ungleich in der Welt verteilt. Auf die OPEC¹⁹ entfällt rund die Hälfte des Gesamtpotentials; gut 70% sind im Besitz von nur 10 Ländern (BGR 2009). Durch den sogenannten „Fracking-Boom“ in den USA hat sich das Bild diesbezüglich etwas gewandelt. Diese Vorkommen sind nämlich deutlich gleichmäßiger auf der Welt verteilt, als es für die konventionellen Öl- (und Gas)vorkommen der Fall ist (BP 2011). Durch den Einsatz von horizontaler Bohrtechnik und dem „Hydraulic Fracturing“, also dem hydraulischen Aufbrechen von Gesteinsschichten mit geringer Durchlässigkeit, ist es möglich, Öl- und Gasvorkommen zu explorieren. Früher bestand hierfür aus technischen und wirtschaftlichen Gründen noch keine Möglichkeit. Während diese Innovation die Energiewirtschaft in den USA zurzeit sehr beeinflusst, distanziert man sich in Deutschland insbesondere aus umwelttechnischen Gesichtspunkten und Akzeptanzgründen von dieser Methode. In den USA führen die Entwicklungen zurzeit dazu, dass man sich vom Energieimporteur hin zu einem -exporteur entwickelt. Prognosen zufolge könnte das Land zukünftig hinsichtlich der Förderhöhe mit Saudi-Arabien aufschließen (Taheripour und Tyner 2014).

Nichtsdestotrotz erwarten geowissenschaftliche Kompetenzzentren, dass ein globales Maximum der Erdölproduktion in einem für die heutigen Gesellschaften relevanten Zeitraum eintreten wird (BGR 2013). Sofern man die Neuentdeckungen der Vergangenheit auf den Zeitpunkt ihrer Entdeckung zurückdatiert („Backdating“), erkennt man in Abbildung 2.6, dass die Entdeckung von Erdöl in den letzten Jahrzehnten abgenommen hat.

¹⁹ Organization of the Petroleum Exporting Countries