

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 40

Artikel: Vom Erdöl- zum Methanzeitalter: langfristige Technologieentwicklung und die potentielle Rolle von Erdgas im 21. Jahrhundert
Autor: Grübler, Arnulf
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76719>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Vom Erdöl- zum Methanzeitalter

Langfristige Technologieentwicklung und die potentielle Rolle von Erdgas im 21. Jahrhundert

Von Arnulf Grübler, Laxenburg

Der Beitrag behandelt nach einer grundlegenden methodologischen Einführung die historische Entwicklung der Weltenergiesituation und gelangt sodann im besonderen auf die Perspektiven der Nutzung des Erdgases als «dominierender Energieträger im 21. Jahrhundert». Obwohl die Prognose überraschen mag angesichts der Energiediskussion der letzten Jahre, sprechen doch eine Reihe von gewichtigen Gründen für die Thesen des Verfassers. **Red.**

Energiestrukturwandel als technologischer Substitutionsprozess

Über einen Zeitraum von 130 Jahren entwickelte sich der Weltprimärenergieverbrauch mit einer Wachstumsrate von 2,2 Prozent jährlich. Das unterschiedliche Wachstum einzelner Energieträger (Bild 1) führte zu einer Reihe von evolutionären Veränderungen in der Struktur des Energiesystems, in dem jeweils ältere durch neuere Energieträger ersetzt wurden. Dies kann am besten aus der Entwicklung der Marktanteile einzelner Primärenergieformen (Bild 2) ersehen werden: So wurde Holz als dominierender Primärenergieträger (rund 70 Prozent Marktanteil im Jahre 1860) zunehmend durch Kohle ersetzt, deren Marktanteil um 1910 stagniert und durch Einführung neuerer Energiequellen (Erdöl und Erdgas) seither zurückgeht.

Es muss betont werden, dass diese Substitution alter durch neue Energieträger nicht deswegen erfolgte, weil die verfügbaren Vorräte beschränkt oder neue Energieträger bei ihrer Einführung billiger waren. Erdöl ersetzte die Kohle, obgleich praktisch unbegrenzte Mengen von Kohlevorräten weiterhin zur Verfügung standen und obgleich Erdölprodukte erst zu einem späteren Zeitpunkt (nach Entwicklung der Erdöl-

technologien und -infrastrukturen und damit einhergehender Kostenreduktionen) preislich mit Kohle konkurrieren konnten. Der Grund für die Einführung von Erdöl lag vielmehr darin, dass Erdöl eine grössere Energiedichte aufwies und dass die mit dem Erdöl verbundenen *Technologien* auf allen Ebenen der Produktion (Bohrförderung anstatt Abbau in Bergwerken), der Lagerung und des Transports (Rohrleitungen) und der Verwendung der Endprodukte (flüssige Treibstoffe für Verbrennungsmotoren anstatt kohlegefeuerter Dampfmaschinen) den Kohletechnologien überlegen waren. Die Ver-

änderungen des Energiesystems müssen daher in erster Linie als *technologische Substitutionsprozesse* verstanden werden, wobei jeweils neue Technologien, die sich in Produktion und Verwendung als überlegen erweisen, die existierenden ersetzen.

In Analogie zur Biologie betrachten wir verschiedene Technologien als verschiedene «Spezies», die innerhalb einer «Marktnische» um Marktanteile konkurrieren. Mathematisch beschreiben wir dies am IIASA¹ durch Anwendung der allgemeinen Lotka-Volterra-Funktion, die das dynamische Gleichgewicht innerhalb von Biozönosen beschreibt. In einem einfachen Fall, in dem wir nur zwei Technologien betrachten, stellen wir fest, dass die neue (vorteilhaftere) Technologie die alte mittels eines charakteristischen S-förmigen Musters ersetzt, wobei wir diesen Substitutionsprozess an der Entwicklung der Marktanteile der neuen Technologie messen und als logistische Substitutionsfunktion (als spezielle Anwendung der allgemeinen Lotka-Volterra-Funktion) beschreiben. In Bild 3 veranschaulichen wir diesen Substitutionsprozess anhand der Einführung von 17 verschiedenen Innovationen, die von Fisher-Pry untersucht wurden.

Bevor wir uns einem höheren Komple-

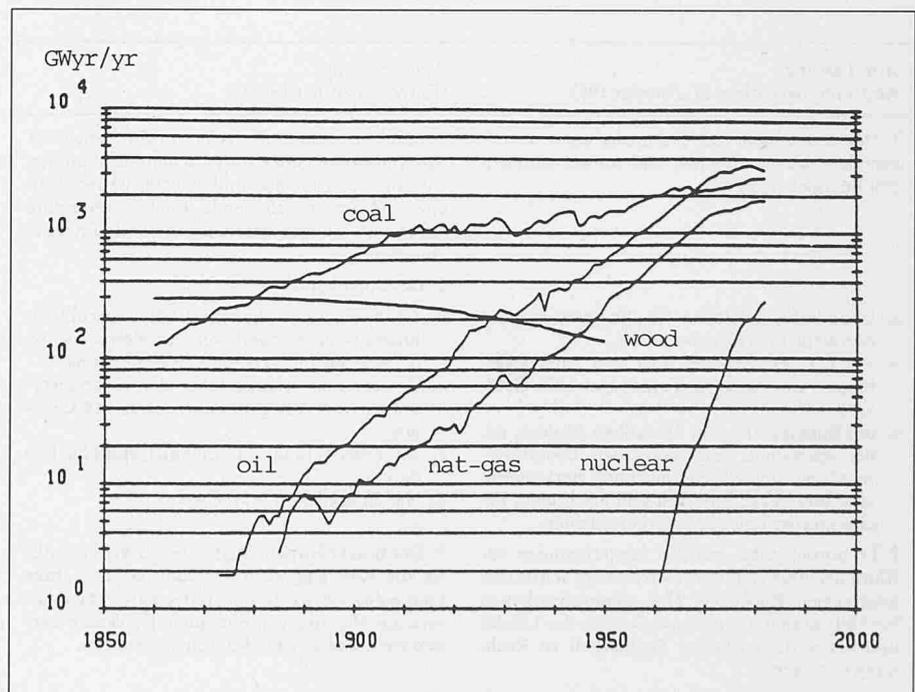


Bild 1. Entwicklung des Weltprimärenergieverbrauchs (Grübler und Nakicenovic, 1987). Globaler Verbrauch verschiedener Primärenergieträger (Holz, Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie) in GW-Jahren pro Jahr (ein GW-Jahr entspricht etwa einer Million Tonnen Steinkohleeinheiten). Im logarithmischen Massstab können die unterschiedlichen Wachstumsraten einzelner Energieträger bzw. deren Veränderungen deutlich abgelesen werden. Diese unterschiedlichen Wachstumsraten führen zu Veränderungen im Marktanteil einzelner Energieträger.

¹ International Institute for Applied Systems Analysis. Dieses Institut, das von 16 Akademien der Wissenschaften oder äquivalenten Organisationen getragen wird, ist ein interdisziplinäres Ost-West-Institut und hat es sich zur Aufgabe gesetzt, systemanalytische Methoden auf Problemstellungen globaler Bedeutung anzuwenden. Einzelne Forschungsprojekte befassen sich mit mathematischer Grundlagenforschung, Umwelt, Demographie und wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen von Technologiewandel.

xitätsgrad der Analyse, nämlich der Beschreibung von Systemen, wo mehrere Technologien um Marktanteile konkurrieren, zuwenden, betrachten wir noch eine wichtige lineare Transformation der logistischen Substitutionsfunktion in Bild 3. Wird der Quotient der bereits erreichten Marktanteile (F) durch die noch zu erreichenden Marktanteile ($1-F$) im logarithmischen Massstab gezeichnet (d.h. $\log[F/(1-F)]$), erscheint die logistische Substitutionskurve als Gerade, die sich besser zur optischen Analyse der Einführungs- und Sättigungsphase des technologischen Lebenszyklus eignet, weswegen in den hier vorgestellten Beispielen in der Regel die Transformation $\log(F/(1-F))$ der logistischen Substitutionsfunktion Verwendung findet.

Weltprimärenergiesubstitution

Nach dieser grundlegenden methodologischen Einführung können wir uns jetzt wieder der Betrachtung der historischen Entwicklung der Weltenergiesituation zuwenden (Bild 4). Hier verwenden wir ein multiples Substitutionsmodell, wie es von Marchetti-Nakicenovic am IIASA entwickelt wurde. Wie ersichtlich, können wir die Entwicklung der Struktur des Weltprimärenergiesystems als Abfolge der Einführung, Sättigung und Verdrängung verschiedener Primärenergieträger beschreiben. Die Entwicklung der Marktanteile einzelner Primärenergieträger (in der Transformation $F/(1-F)$, d. h. Marktanteil eines Energieträgers gebrochen durch die Summe der verbleibenden Marktanteile aller übrigen Energieträger und dargestellt im logarithmischen Massstab) zeigt sich als regelmässige Abfolge von Substitutionen alter durch neue Energietechnologien, wobei die historische Entwicklung gut nachvollzogen werden kann und wir deshalb diese in die Zukunft extrapolieren wollen.

Für solch einen Blick in die Zukunft bedarf es noch weiterer Annahmen. Die erste betrifft die Wachstumsrate der Kernenergie, da die vorhandenen Daten nicht ausreichen, die Wachstumsrate aus der Vergangenheit zu bestimmen. Die historischen Zeitkonstanten der Einführung und Verdrängung von Primärenergieträgern sind in den Fällen Holz, Kohle, Erdöl und Erdgas jeweils rund 100 Jahre, um von 1 auf 50 Prozent Marktanteil zu wachsen, bzw. zu schrumpfen. In Analogie haben wir eine gleiche Wachstumsrate auch für die zukünftige Entwicklung der Kernenergie angenommen. Wie aus Bild 4 ersichtlich, ist die Kernenergie jedoch

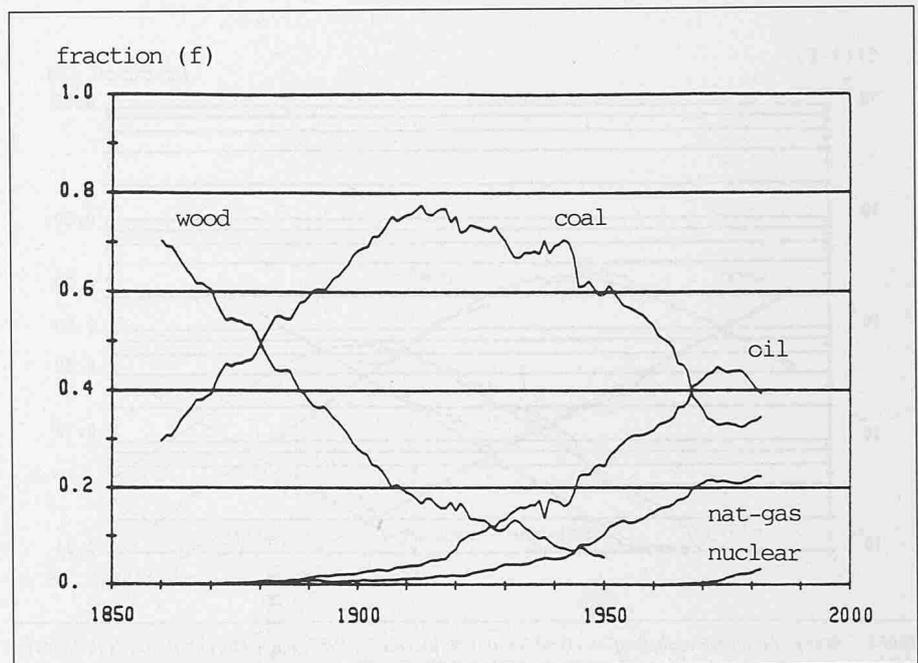


Bild 2. Entwicklung der Anteile einzelner Energieträger am Weltenergieverbrauch (Grübler und Nakicenovic, 1987)
Anteil (f mal 100 ergibt den Prozentanteil) am Gesamtenergieverbrauch einzelner Primärenergieträger (Holz, Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie). Die unterschiedlichen Wachstumsraten führen zu Verschiebungen im Marktanteil einzelner Energieträger, die wir mittels des logistischen Substitutionsmodells nachvollziehen können.

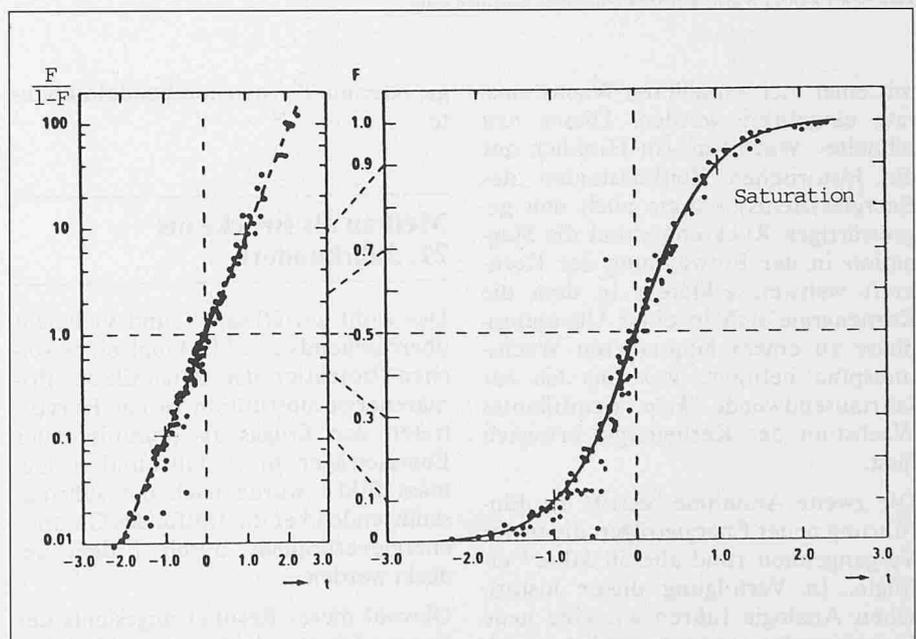


Bild 3. Lebenszyklus in der Einführung neuer technologischer Innovationen (nach Fisher und Pry, 1971)
Neue Technologien (und Primärenergieträger) werden in einem typischen zeitlichen Verlaufsmuster (S-Kurve) im Markt eingeführt. Die Abbildung zeigt die Einführung von 17 verschiedenen Innovationen (Elektrostahl, Kunstfasern, Waschmittel usw.) gemessen am Marktanteil F , den die neue Technologie am Markt innehat. Im einfachen Fall betrachten wir nur zwei Technologien, die alte, die verdrängt wird (und in der Abbildung nicht aufsteigt), und die neue (vorteilhaftere) Technologie, die zunehmend Marktanteile gewinnt. Technologien verhalten sich wie biologische Spezies, die in eine neue Ökonomie eindringen und, so sie besser angepasst sind, die alte Spezies verdrängen.
Die Entwicklung des Marktanteils der neuen Technologie beschreiben wir mittels einer logistischen Kurve. Diese Kurve können wir transformieren, um sie als Gerade darzustellen. Zeichnet man das Verhältnis der bereits erreichten (F) Marktanteile zu den noch zu erreichenden ($1-F$) in logarithmischem Massstab (d.h. $\log(F/(1-F))$) erscheint die logistische Substitutionsfunktion als Gerade, die sich besser zur optischen Analyse der Einführungs- und Sättigungsphase eignet. Deswegen verwenden wir in der Regel diese lineare Transformation der logistischen Substitutionsfunktion. Wenn keine neuere Technologie die zuletzt eingeführte ihrerseits verdrängt, strebt diese der völligen Marktbeherrschung (100 Prozent Marktanteil) zu.

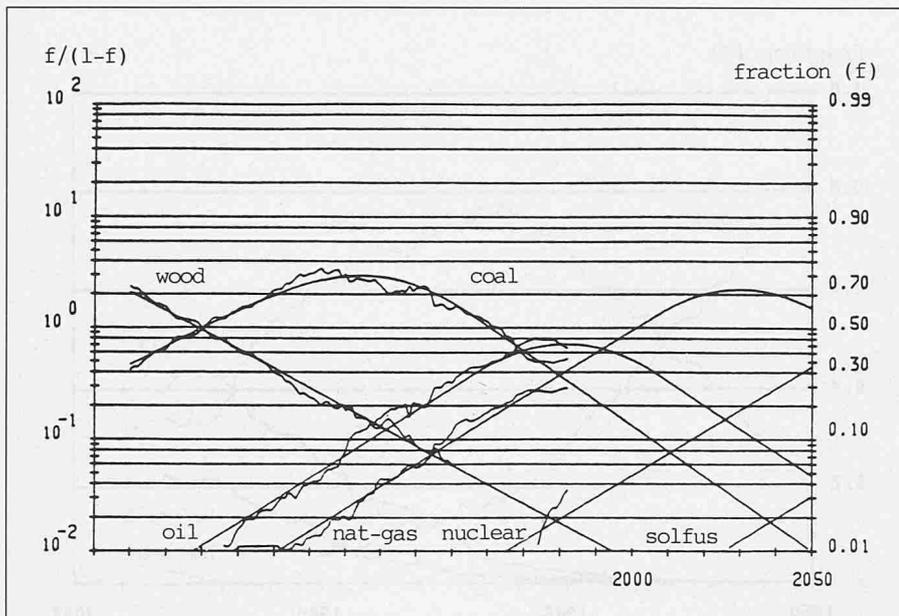


Bild 4. Weltprimärenergiesubstitution (Grübler und Nakicenovic, 1987, nach Marchetti und Nakicenovic, 1979)

Entwicklung der Marktanteile einzelner Energieträger der Abbildung 2 in der Transformation $F/(1-F)$ (d.h. Marktanteil eines Energieträgers gebrochen durch die Summe der Marktanteile aller übrigen Energieträger) und in logarithmischem Massstab. Aus dem Verhalten der Vergangenheit bestimmen wir die Parameter für das logistische Substitutionsmodell. Wie ersichtlich, können wir damit die Strukturveränderungen des Energiesystems sehr gut nachvollziehen. Für die Prognose unterstellen wir, dass die Wachstumsrate der Kernenergie ähnlich wie in der Vergangenheit für Kohle, Erdöl und Erdgas verlaufen wird. Die neue Energiequelle nach der Jahrtausendwende (wir nennen sie Solfus, da sie sowohl Solarenergie als auch Kernfusion sein könnte) wird in Analogie zur Vergangenheit rund 50 Jahre nach der Einführung der Kernenergie zu erwarten sein.

Das regelmässige Muster der Einführung neuer und der Verdrängung alter Energieträger resultiert in einer grossen Zukunft für Erdgas, das zum dominierenden Energieträger des 21. Jahrhunderts bestimmt ist. Der Anteil des Erdöls ist gesättigt und wird zurückgehen, die Bedeutung der Kohle weiter abnehmen. Die Kernenergie muss auf einen langsameren Wachstumspfad umschwenken, was bis zur Jahrtausendwende kein signifikantes Wachstum der Kernenergie bedeuten würde.

mit einer viel schnelleren Wachstumsrate eingeführt worden. Dieses «zu schnelle» Wachstum (in Hinblick auf die historischen Zeitkonstanten des Energiesystems) könnte auch den gegenwärtigen Rückschlag und die Stagnation in der Entwicklung der Kernkraft weltweit erklären, in dem die Kernenergie sich in einer Übergangsphase zu einem langsameren Wachstumspfad befindet, was uns bis zur Jahrtausendwende kein signifikantes Wachstum der Kernenergie erwarten lässt.

Die zweite Annahme betrifft die Einführung neuer Energieträger, die in der Vergangenheit rund alle 50 Jahre² erfolgte. In Verfolgung dieser historischen Analogie führen wir eine neue Energiequelle nach der Jahrtausendwende ein, die wir Solfus nennen, um anzudeuten, dass es sich um Solarener-

² Wir wollen später noch kurz auf die Begründung dieser Annahme eingehen, die sich im wesentlichen aus der Analyse der langfristigen wirtschaftlichen Wechsellagen (Kondratieff-Wellen), herleitet. Diese wirtschaftlichen Wechsellagen entstehen durch das gebündelte Auftreten von wichtigen Innovationen, die zu neuen Produkten und Industriezweigen führen, die das Wachstum eines Kondratieff-Zyklus entscheidend beeinflussen und deren gleichzeitige Sättigung zu Krisen (Depressionen) führt.

gie oder um Kernfusion handeln könnte.

Methan als Brücke ins 21. Jahrhundert

Das wohl auffälligste - und vielleicht überraschendste - Merkmal einer solchen Projektion der Dynamik der Primärenergiesubstitution ist das Hervortreten von Erdgas als dominierender Energieträger im 21. Jahrhundert. Gemäss Bild 4 würde nach der Jahrtausendwende über die Hälfte des Gesamtenergieverbrauchs durch Erdgas gedeckt werden.

Obwohl dieses Resultat angesichts der Energiedebatte der letzten 15 Jahre vielleicht überrascht, sprechen doch eine Reihe von Gründen für diese «Brückenfunktion» von Erdgas ins 21. Jahrhundert. Diese Gründe, die Erdgas (Methan) zu einer der anderen Energieträgern in vielerlei Hinsicht überlegenen Energieform machen und die wir später noch näher ausführen wollen, betreffen vor allem die *grosse Verfügbarkeit* von Vorräten und deren *weitere und weniger konzentrierte Verbreitung*, die *Umweltfreundlichkeit*, die

günstigen Kosten (etwa im Vergleich zu Synthesegas aus Kohle) und *hohe Flexibilität* sowie die (beträchtlichen) Möglichkeiten der eigenständigen *technologischen Weiterentwicklung und Verbesserung* der Technologien zur Produktion, Transport und Endnutzung von Erdgas.

Die Stiefschwester wird mündig

Dieses grosse Potential von Erdgas ist bislang weitgehend unterschätzt worden, weil die Eigenheiten von Erdgas gegenüber Erdöl (sowohl in Hinblick auf geologisches Vorkommen, Eigenheiten von Gaslagerstätten - Methan ist im Gegensatz zu Erdölvorräten komprimierbar - und immanenten Vorteilen in Umweltfreundlichkeit und vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten) nur ungenügend erkannt wurden. Historisch gesehen ist Erdgas als - oft unerwünschtes und abgepackeltes - Nebenprodukt der Produktion von Erdöl, sozusagen als dessen «Stiefschwester» anzusehen.

Die zunehmende Entkoppelung der Erdgas- von der Erdölindustrie ist eine Tendenz, die sich erst seit wenigen Jahren abzeichnen beginnt. Die enge historische Verbindung zu Erdöl bewirkte, dass Gaslagerstätten als Nebenprodukt der Exploration nach Erdöl (assoziiertes Gas) oder als reine Gaslagerstätten im Zuge der Erdölexploration quasi «zufällig» entdeckt wurden. Die enge Verbindung zu Erdöl bewirkte aber auch, dass Erdgas, zu Unrecht, wie wir meinen, als knappe und kostbare Energiequelle, die es möglichst nicht anzutasten oder nur bestimmten Nutzungen vorzubehalten galt, angesehen wurde. Eine Ansicht, die noch immer weitverbreitet ist und zu einer Reihe von Beschränkungen führte, die die technologische Entwicklung und die verstärkte Nutzung von Erdgas behindern.

Die grosse Verfügbarkeit und weite Verbreitung der Vorräte sowie die grossen Vorteile, die für eine verstärkte Nutzung des Erdgases sprechen, rechtfertigen die Entkoppelung des Erdgases vom Erdöl und die damit einhergehende Betrachtung von Erdgas als eigenständigen Energieträger mit, im Gegensatz zu Erdöl, beträchtlichem Wachstumspotential. Erdgas ist der logische Energieträger in der weiteren evolutionären Entwicklung des Energiesystems, ja, es mag für manchen beruhigend wirken, dass die potentielle Rolle von Erdgas eine einseitige massive Abhängigkeit von Kernenergie oder von alternativen Energiequellen um rund 50 Jahre

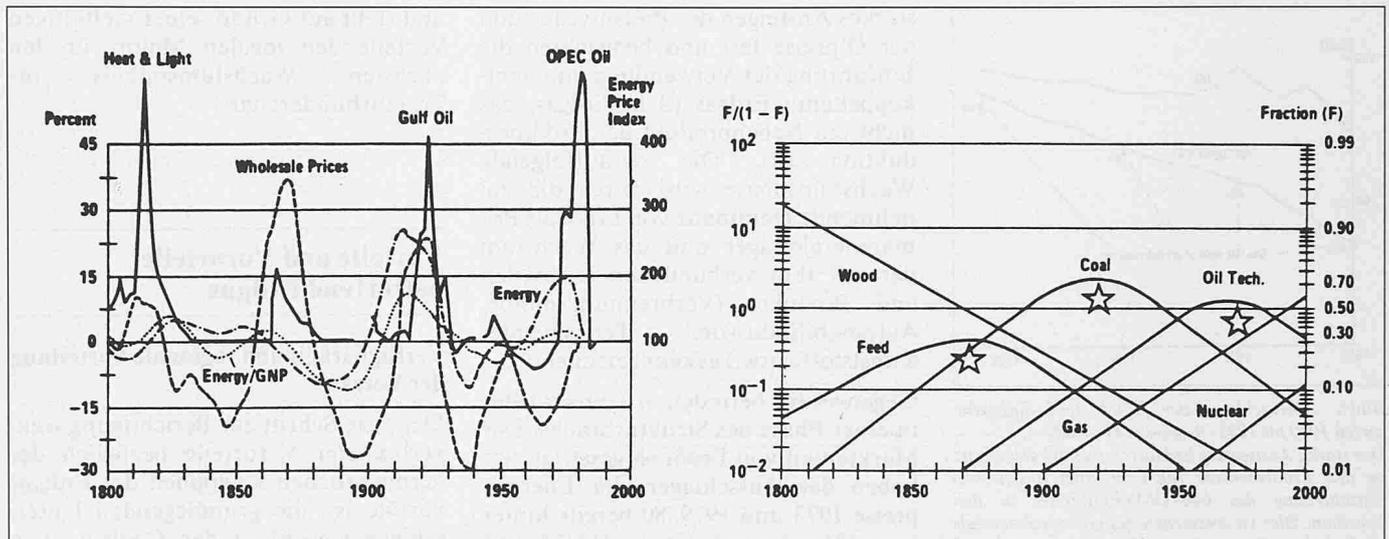


Bild 5. Primärenergiesubstitution und lange Wellen der wirtschaftlichen Entwicklung in den USA (Marchetti, 1981, und Nakicenovic, 1986) Primärenergien (Holz, Futtermittel für tierische Arbeitskraft, Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie) stehen hier stellvertretend für eine ganze Reihe von Industrien und Produkten. Deren Marktsättigung führt zu Krisen und Strukturbrüchen (Depressionen), während derer neue Produkte, neue Energieträger und neue Industriezweige eingeführt werden, die den Wiederaufschwung bewirken. Diese langfristigen Fluktuationen der Wirtschaftsentwicklung sind als «lange Wellen» bekannt. Diese werden mit Hilfe der Trendabweichungen dreier Indikatoren (Grosshandelspreisindex, Energieverbrauch und Energieintensität,

d.h. Energieverbrauch pro Geldeinheit des BNP gemessen und zeigen die langfristigen zyklischen Schwankungen der «langen Wellen».

Die Sättigung wichtiger Industrien und Produkte (darunter des dominierenden Energieträgers) während der Depressionsphase stellt einen Strukturbruch des Systems dar. Während dieser Strukturbrüche beobachten wir ein Ausschlagen der Energiepreise nach oben. Insofern überraschen uns die Ölpreisschocks der siebziger Jahre nicht. Marchetti hat anhand dieser Überlegungen bereits 1980 den drastischen Fall der Erdölpreise prognostiziert. In Analogie zur Vergangenheit erwarten wir einen real stabilen Ölpreis während der nächsten 40 Jahre.

in die Zukunft verschiebt. Somit bleibt Zeit, um alternative Energiequellen (darunter zählen wir auch Reaktortypen, die neue Massstäbe hinsichtlich Umweltschutz, Sicherheit und Vielfältigkeit in der Anwendung, jenseits der Produktion von Elektrizität) zu entwickeln.

Primärenergiesubstitution und lange Wellen in der Konjunktur

Bevor wir die einzelnen Gründe näher ausführen, die für Erdgas als zukünftige dominierende Energiequelle sprechen, wollen wir die historische Entwicklung der Primärenergiesubstitution und die daraus folgende Projektion in die Zukunft aus Bild 4 noch näher begründen. Wir wollen damit zeigen, dass die historisch beobachtete Regelmässigkeit in der Primärenergiesubstitution nicht nur eine phänomenologisch beobachtete Tatsache ist, sondern sich geradezu zwangsläufig aus der Theorie der langfristigen konjunkturellen Wechsellagen erklärt. Wir benutzen

auf Grund der guten Verfügbarkeit historischer Daten die USA als Beispiel, um die Begründung zu illustrieren (Bild 5).

Langfristige konjunkturelle Wechsellagen – d.h. eine regelmässige Abfolge von wirtschaftlichen Prosperitäts- und Depressionsphasen – in einem Zeitabstand von rund 55 Jahren wurden erstmals vom russischen Ökonomen *Kondratieff*³ beschrieben. Diese wirtschaftlichen Wechsellagen wurden vom Österreicher *Schumpeter* erstmals theoretisch begründet. Vereinfacht ist *Schumpeters* These, dass Prosperitätsphasen durch das Wachstum neuer Industrien und Produkte entstehen und dass deren gleichzeitige Sättigung zu Abschwung- und Depressionsphasen der wirtschaftlichen Entwicklung führen. Während der Depressionsphase («Prozess der schöpferischen Zerstörung») erfolgt ein neuer Innovationsschub, der wiederum die nächste Wachstumsphase einleitet. *Schumpeters* These des konzentrierten Auftretens von wichtigen Innovationen und die daraus resultierenden Wachstumsschübe ist seither durch zahlreiche theoretische und empirische Studien untermauert worden.

Wir wollen nun zeigen, dass die Primärenergiesubstitution vor diesem Hintergrund erklärt werden kann, in dem jede Primärenergieform eine wichtige Innovation in einem *Kondratieff*-Zyklus darstellt, ja sogar mit einer grossen Anzahl weiterer Hauptinnovationen des Zyklus in enger Verbindung steht. Jede Depressionsphase eines Zyklus wird

durch die Sättigungsphase eines Primärenergieträgers charakterisiert, während derer ein neuer Energieträger, der den übernächsten Zyklus dominiert, eingeführt wird. Die Sättigungsphase einer Primärenergiequelle, stellvertretend für eine Reihe von wichtigen Industrien und Produkten ihres Zyklus, stellt einen Strukturbruch im System dar, der von einem kurzfristigen «Ausschlagen» der Preise im allgemeinen und der Energiepreise im besonderen begleitet wird.

Bild 5 veranschaulicht dies für die USA. Die konjunkturellen Wechsellagen werden durch die Trendabweichungen dreier Indikatoren (Grosshandelspreisindex, Energieverbrauch und Energieintensität, d.h. Energieeinsatz pro Geldeinheit des Bruttonationalproduktes) beschreiben. Ferner wird die Entwicklung des realen Energiepreisindex gezeigt. Die einzelnen Energieträger der Primärenergiesubstitution umfassen Holz und Futtermittel (Energielieferant für tierische Arbeits- und Transportleistung), Kohle, Erdöl- und Erdgastechnologien (die Produktion von Erdgas aus Erdölfeldern wurde der Erdöltechnologie zugerechnet und nur die entkoppelte Erdgasproduktion als Gastechnologie gezählt) sowie Kernenergie.

Wie ersichtlich, können wir ein sehr regelmässiges Muster der wirtschaftlichen Entwicklung, der Primärenergiesubstitution und der Preise feststellen.

Die Depression von 1870 wird durch das Maximum des Marktanteils der

³ *Kondratieff* erkannte, dass die Depression der dreissiger Jahre sich nicht zwangsläufig aus der *Marxschen* These der zunehmenden Krisenanfälligkeit des kapitalistischen Systems ergab und damit Anzeichen seines bevorstehenden Unterganges war, sondern dass es sich um eine zwar stärker ausgeprägte, aber dennoch periodisch auftretende konjunkturelle Wechsellage, die wieder von einer wirtschaftlichen Prosperitätsphase gefolgt wird, handelte. Dieser (publizierten) Erkenntnis *Kondratieffs* folgte seine mehrjährige Verbannung nach Sibirien.

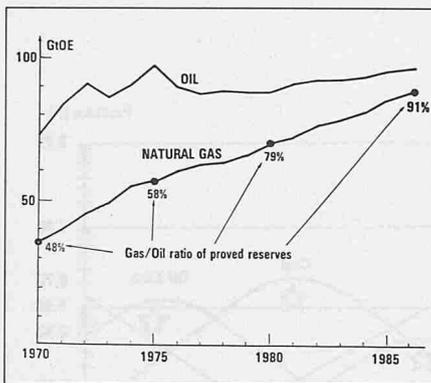


Bild 6. Entwicklung der Erdöl- und Erdgasreserven 1970 bis 1985 (Rogner et al., 1986)
Der starke Anstieg der Erdgasreserven im Gegensatz zu den Erdölvorräten führt zu einer drastischen Verschiebung des Gas-Öl-Verhältnisses in den Vorräten. Dies ist Anzeichen des grossen Potentials zusätzlicher Gasfunde. Erdgas ist in grossen Mengen vorhanden, und riesige Mengen nichtkonventioneller Gaslagerstätten einschliesslich vermuteter Tiefgasvorkommen harren ihrer Nutzung.

Energiequelle Futtermittel gekennzeichnet. Der Strukturbruch führt zu einem Ausschlagen der Energiepreise und Einführung eines neuen Energieträgers (Erdöl). Die der Depression folgende Wachstumsphase ist durch die Dominanz des Primärenergieträgers Kohle und das Wachstum der mit ihm verbundenen Industrien (Dampfkraft, Eisenbahn, Bessemerstahl usw.) bei fallenden (Energie-)Preisen gekennzeichnet.

Die Sättigung des Marktanteils von Kohle erfolgt während der Depression um 1930. Zur selben Zeit stellen wir ein

starkes Ansteigen des Preisniveaus und der Ölpreise fest und beobachten die Einführung der Verwendung von «entkoppeltem» Erdgas (d. h. Erdgas, das nicht ein Nebenprodukt der Erdölproduktion ist). Die darauffolgende Wachstumsphase wird durch die zunehmende Dominanz von Erdöl als Primärenergieträger und das Wachstum der mit ihm verbundenen Industrien und Produkte (Verbrennungsmotor, Automobilindustrie, Petrochemie, Kunststoffe usw.) gekennzeichnet.

Gegenwärtig befinden wir uns wieder in einer Phase des Strukturbruchs. Der Marktanteil von Erdöl ist gesättigt, wir haben das Ausschlagen der Energiepreise 1973 und 1979/80 bereits hinter uns (Marchetti hat am IIASA auf Grund dieser Überlegungen bereits 1980 den Fall der Rohölpreise prognostiziert, und wir würden auf Grund der vergangenen drei Zyklen für die Zukunft weiterhin gleichmässig niedrig bleibende Ölpreise erwarten) und erwarten den nächsten Wachstumsimpuls, der durch die steigende Bedeutung von Methan begleitet wird.

Diese Überlegungen sollen uns darauf hinweisen, dass sehr viele Phänomene, die kurzfristig gesehen als überraschend erscheinen, sich bei entsprechender Betrachtungsweise als langfristige Dynamik und Regelmässigkeit der wirtschaftlichen Entwicklung herausstellen. Erdgas erscheint aus dieser Perspektive als logische, evolutionäre Fortsetzung der historischen Entwicklung

und stellt auf Grund seiner vielfältigen Vorteile den idealen Motor für den nächsten Wachstumsimpuls ins 21. Jahrhundert dar.

Vorteile und Vorurteile betreffend Erdgas

Verfügbarkeit und regionale Verteilung der Vorräte

Der erste Schritt zur Berichtigung weitverbreiteter Vorurteile bezüglich der vermeintlichen Knappheit der Erdgasvorräte ist, die grundlegenden Unterschiede sowohl in der Geologie von Erdgaslagerstätten als auch in den physikalischen Eigenschaften von Erdgas zu verdeutlichen. Diese grundlegenden Unterschiede sind wegen der historisch engen Verbindung der Gasproduktion mit der Prospektion und Produktion von Erdöl weitgehend unbeachtet geblieben.

Methanvorkommen werden praktisch in allen Sedimenten der Welt beobachtet und deren wirtschaftliche Gewinnung ist nicht an die speziellen - und seltenen - Lagerstättenbedingungen (Antiklinalen oder stratigraphische «Fallen» sowie das Vorkommen in einem speziellen Teufenbereich, dem sogenannten «Ölfenster»), die für eine wirtschaftliche Produktion von Erdöl erforderlich sind, gebunden.

Zweitens sind Methanvorkommen nicht wie Erdöl aus Temperatur- und Druckgründen nur bis zu einer gewissen Teufe vorhanden. Methan ist vielmehr bis zu Tiefen von rund 30 km (wo Temperaturen von rund 1000 Grad und ein Druck bis 10 000 bar herrschen) thermisch stabil. Es ist weiter bekannt, dass die Häufigkeitsverteilung der Vorräte von Erdgas und Erdöl über die Teufe unterschiedlich ist. Das heisst, das in grösseren Teufen, wo wir normalerweise kaum mehr Erdölfunde erwarten, die Häufigkeit von Gasvorkommen steigt. Da in der Vergangenheit die Explorationstätigkeit aber hauptsächlich auf die Suche nach Erdöl konzentriert war, wurden diese tieferen Sedimentschichten nur in den seltensten Fällen untersucht.

Drittens ist Erdgas im Gegensatz zu Erdöl komprimierbar. Dies ist vor allem deswegen von Bedeutung, weil dadurch Gas aus Schichten produziert werden kann, die für Erdöl keine Permeabilität aufweisen. Schliesslich ist ein Fass Rohöl, das in einer Tiefe von 10 000 m gefördert wird, an der Oberfläche immer noch ein Fass Erdöl, wohingegen ein Fass (komprimiertes) Erd-

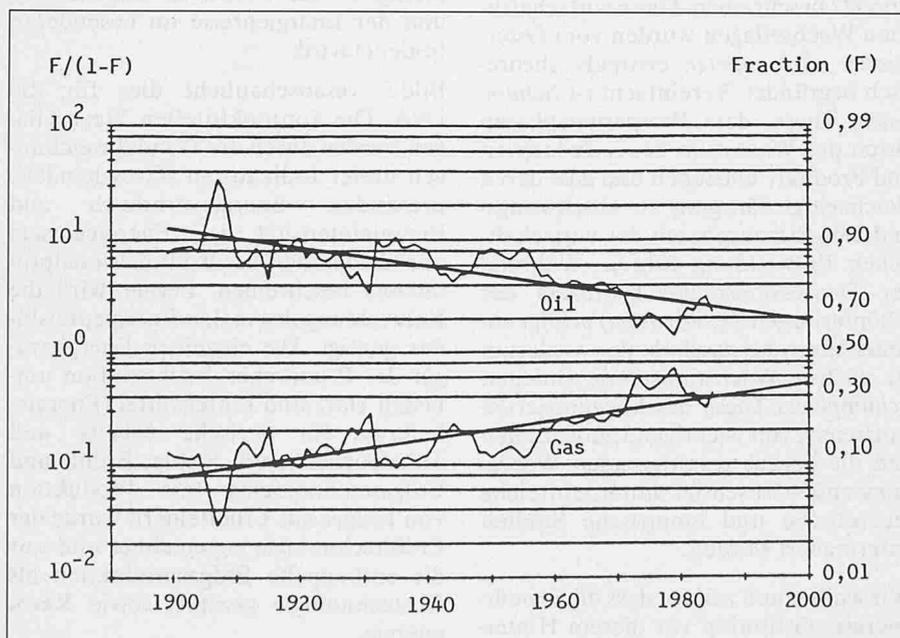


Bild 7. Anteil der Öl- und Gasfunde in den erfolgreichen Bohrungen der USA (Grübler und Nakicenovic, 1987)
Öl- versus Gasfunde in den USA beschrieben als logistischer Substitutionsprozess. Immer mehr erfolgreiche Bohrungen resultieren in Erdgasfunden, obwohl historisch gesehen praktisch kaum intensiv nach Erdgas gesucht wurde. Die historisch enge Bindung an die Erdölindustrie muss aufgegeben werden. Die Eigenheiten im geologischen Vorkommen und der Lagerstättenverhältnisse von Erdgas müssen endlich berücksichtigt werden. Gezielte Exploration nach Erdgas wird auch in jenen Regionen Erfolg zeigen, die von den Ölogeologen als hoffnungslos beurteilt werden.

gas aus dieser Teufe an der Oberfläche bis zu 500 Fass Methan entspricht.

Aufgrund all dieser Faktoren ist es nicht weiter verwunderlich, dass die Erdgasvorräte viel weiter geographisch verbreitet sind als Erdölvorräte. Rund 100 Länder verfügen über kommerziell nutzbare Erdgasvorkommen. Erdgas wurde in zahlreichen Ländern, in denen man die Suche nach Erdöl bereits als erfolglos eingestellt hatte, in wirtschaftlich gewinnbaren Mengen entdeckt (z. B. in Neuseeland, Malaysien, ja sogar aus dem Kathmandutal im Himalayagebiet werden Gasfunde berichtet).

Wie Bild 6 veranschaulicht, sind die nachgewiesenen Vorräte von Erdgas viel schneller angestiegen als die Erdölvorräte, so dass das Verhältnis von Erdgas- zu Erdölvorräten sich von 48% im Jahre 1970 auf 91% im Jahre 1985 zugunsten des Erdgases verschoben hat. Während dieser Periode sind die Weltgasvorräte viermal schneller gewachsen als der Gasverbrauch. Diese Tendenzen können wir auch in den USA, dem am besten explorierten Land der Welt, feststellen. So steigt der Anteil der Gasfunde an erfolgreichen Bohrungen kontinuierlich an (Bild 7). Wir würden gerne wissen, um wieviel mehr Gasvorräte entdeckt worden wären, hätte sich die Explorationstätigkeit in der Vergangenheit nicht praktisch ausschliesslich auf die Suche nach Erdöl beschränkt.

Nicht konventionelles Erdgas

In der bisherigen Argumentation haben wir jedoch nur einen kleinen Teil der möglichen Methanvorräte betrachtet, nämlich sogenanntes konventionelles Erdgas. Methan existiert darüber hinaus jedoch in überaus grossen Mengen in Form von nicht konventionellem Erdgas (Methan in Kohleflözen, Gasvorkommen unter hohem Druck in Sand- und Schieferschichten und in tiefen, unter Druck stehenden Grundwasserhorizonten). Schliesslich wollen wir auch erwähnen, dass die für lange Zeit als abgeschlossen betrachtete Diskussion über den Ursprung der Kohlenwasserstoffe in letzter Zeit wiederauflebte und überraschende (obwohl nicht unumstrittene) Möglichkeiten des nicht biologischen Ursprungs von Methan aufzeigt, was praktisch unbeschränkte Vorräte bedenken würde. Schätzungen über nicht konventionelle Erdgasvorräte existieren zwar nur für die USA; sie sind aber trotzdem beeindruckend. *Hannemann* hat 1986 die nicht konventionellen Erdgasvorkommen der USA auf über 230 Trillionen Kubikmeter geschätzt. Dies ist 40mal die Menge der konventionellen Vorräte

und über 500mal der jährliche Erdgasverbrauch der USA.

Zwar gibt es gegenwärtig keine Anzeichen, dass diese ungeheuren Mengen mit heutiger Technologie gewonnen werden können, wir werden jedoch später noch kurz die grossen Möglichkeiten der technischen Weiterentwicklung der Erdgastechnologien streifen, so dass wir entsprechende Verbesserungen der technischen Möglichkeiten nicht ausschliessen sollten. Wer hätte es übrigens vor zwanzig Jahren für möglich gehalten, dass Erdgas unter den Bedingungen des nördlichen Teils der Nordsee (z. B. des Troll-Feldes) produziert werden kann oder dass Bohrungen im Mittelmeer bei Wassertiefen von 1500 m erfolgreich niedergebracht werden können?

Nicht biologischer Ursprung der Kohlenwasserstoffe?

Zum Abschluss wollen wir auch noch kurz die aktuelle Diskussion über den nicht biologischen Ursprung der Kohlenwasserstoffe streifen. Diese Theorie, die bereits im 19. Jahrhundert von *Mendeleev* und von *Humboldt* vertreten wurde, wird sehr detailliert und brillant von Astrophysiker *Gold* vertreten. Prof. *Gold* vereint in seiner Theorie unser gegenwärtiges Verständnis des Entstehungsprozesses der Erde mit der beobachteten weiten Verbreitung von Kohlenwasserstoffen in unserem Sonnensystem. (Vergessen wir nicht, dass eine Reihe von Planeten eine Methanatmosphäre besitzen.)

Anhand dieser Theorie wäre die Entstehung fossiler Brennstoffe durch das Ausströmen von Methan aus dem Erdinneren zu erklären. Dieses Methan stellt ein praktisch unerschöpfliches Reservoir dar, das in entsprechender Tiefe und unterhalb undurchlässiger Schichten gestaut und von dort gewinnbar wäre. Anhand dieser Theorie hat dieses «Tiefgas» im Zuge seiner Migration an die Erdoberfläche auch Lagerstätten organischer Stoffe mit Kohlenstoff und Wasserstoff angereichert und so zur Bildung der fossilen Kohlenwasserstoffe Erdöl und Kohle beigetragen. So faszinierend diese Theorie und überzeugend die Argumente für sie auch sein mögen, steht ihre Verifikation noch aus. Immerhin muss gesagt werden, dass diese Theorie überzeugend genug war, um eine umfangreiche Bohrung im Siljan-Krater in Schweden (wo nach herkömmlicher Theorie keine Hoffnung auf ein Auffinden von Kohlenwasserstoffen besteht) auszulösen und Kapital für ihre Finanzierung aufzutreiben.

Unabhängig von dieser Diskussion können wir abschliessend festhalten,

dass bereits die bekannten konventionellen und nicht konventionellen Erdgasvorräte äusserst bedeutend und sehr weit verbreitet sind. Wegen der einseitigen Konzentration der Explorationstätigkeit auf Erdöl, das die Besonderheiten der Geologie und der Lagerstätten von Erdgas weitgehend unberücksichtigt liess, kann das endgültige Potential der Erdgasvorräte gegenwärtig noch nicht abgeschätzt werden, die Situation der Vorräte ist aber zweifellos eher eine des Überflusses als eine der Knappheit.

Kosten und Flexibilität

In Zeiten der Unsicherheit über Investitionsentscheidungen bietet Erdgas einen grossen Vorteil bezüglich Kosten und Flexibilität. Im Gegensatz zu Kohle- oder Kernenergiekraftwerken können hocheffiziente (Wirkungsgrad von 48% bei der Stromerzeugung, bei Kraft-/Wärmekopplung entsprechend höher), modulare Gasturbinen beträchtliche Kapitaleinsparungen bringen. Die Investitionskosten sind, wie eine MIT-Studie nachweist, in der Regel nur ein Drittel wie bei Kohlekraftwerken und in einer Mehrzahl von Fällen stellen methangefeuerte Gasturbinen die kostengünstigste Möglichkeit der Kapazitätserweiterung in den USA dar.

Installationszeiten von sechs Monaten, Lieferung «von der Stange», Möglichkeit, die Anlagen in der Nähe vom Konsumenten zu errichten (und so auch Abwärme zu nutzen), ohne emotionalen Widerstand befürchten zu müssen, Sicherheitsaspekte usw. sind eine Reihe von weiteren gewichtigen Argumenten, die für Erdgas als umweltfreundliche dezentrale Energiequelle sprechen. Somit steht die Verwendung von Erdgas auch im Stromerzeugungssektor ernsthaft zur Debatte, insbesondere in Zeiten grosser Unsicherheit über die Entwicklung der Nachfrage und zukünftige Umwelt- und Sicherheitsvorschriften, die die hohe Kapitalbelastung und das damit einhergehende Risiko von Kohle- oder Kernkraftwerken als schwer vertretbar erscheinen lassen.

Technische Entwicklungsmöglichkeit

Die Liste der Erdgastechnologien, in denen eine evolutionäre Verbesserung zu Kostenreduktionen und neuen Nutzungsmöglichkeiten führen kann, ist sehr lang und umfasst alle Bereiche von der Exploration, Bohrung und Förderung, Transport und Verteilung und Nutzung beim Endverbraucher (Industrie, Haushalt und Stromsektor). Die Möglichkeiten technologischer Verbesserungen und Effizienzsteigerungen wurden bislang in Energieprognosen nicht berücksichtigt, die Prognosen schreiben vielmehr in der Regel den

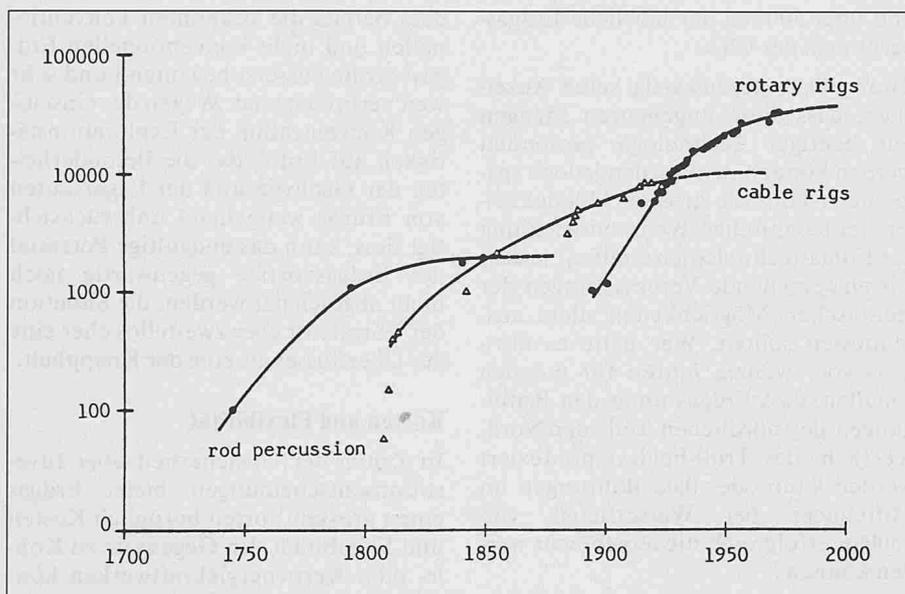


Bild 8. Rekorde in den erzielten Bohrtiefen (in Fuss) verschiedener Bohrtechnologien (Grübler und Nakicenovic, 1987)

Historisch beobachten wir eine Entwicklung neuer Bohrtechnologien, die es uns erlauben, in immer grössere Tiefen vorzustoßen. In grösseren Tiefen ist die Wahrscheinlichkeit, Öl zu finden, gering, die Wahrscheinlichkeit, Gas zu finden, jedoch sehr gross.

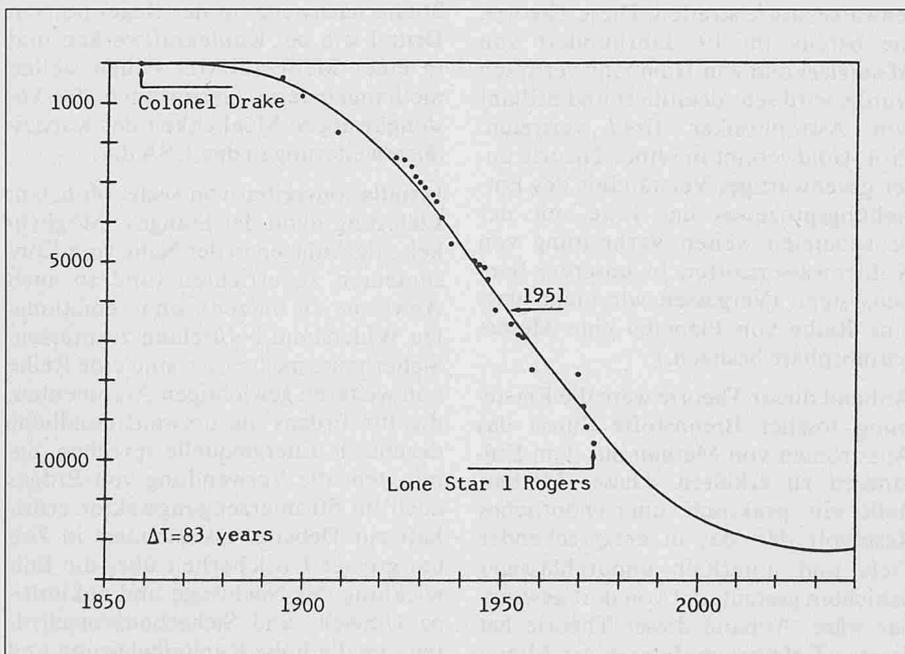


Bild 9. Maximale Teufe von Explorationsbohrungen in den USA (Grübler und Nakicenovic, 1987)

Die Hüllkurve (eine logistische Funktion) der technischen Leistungsfähigkeit der Bohrtechnologien aus Abbildung 8 zeigt für die USA, dass in naher Zukunft Bohrtiefen von über 10.000 Metern nicht nur möglich, sondern eher alltäglich sein werden. Dies begünstigt das Auffinden grosser Erdgaslagerstätten. Alle Datenpunkte der Kurve seit 1950 sind übrigens Erdgasbohrungen.

technischen Status quo über Zeiträume von 20 bis 30 Jahren in die Zukunft fort und kommen so zu dementsprechend konservativen Aussagen. Die Vergangenheit lehrt uns jedoch, dass technischer Fortschritt eine wesentliche Triebfeder der Entwicklung des Energiesystems war.

Die heutigen technischen Möglichkeiten der Erdgasproduktion aus sehr tiefen Horizonten oder unter schwierigsten Bedingungen, die Effizienzsteigerungen bei Endnutzung sowie neue An-

wendungsgebiete der Nutzung von Erdgas (etwa die direkte Reduktion von Eisenerz) zeigen deutlich, dass die Möglichkeiten der weiteren evolutionären technischen Entwicklung von Erdgas-technologien nicht länger unberücksichtigt bleiben können. Entsprechende Untersuchungen am IIASA haben gezeigt, dass selbst bei nur sehr konservativer Fortschreibung der vergangenen Trends der technologischen Veränderungen und Effizienzsteigerungen der Erdgas-technologien das Wachstumspotential von Erdgas viel grösser ist als ge-

meinlich angenommen. So könnte der Anteil von Erdgas im Energieverbrauch Westeuropas, der 1980 rund 14 Prozent betrug, sich innerhalb von 50 Jahren verdoppeln und sich bei entsprechenden technologischen Durchbrüchen (etwa einem neuen hocheffizienten Verfahren zur Herstellung von flüssigen Treibstoffen aus Erdgas) noch weiter erhöhen.

Die Entwicklung von Tiefbohrtechnologien und Gasturbinen

Stellvertretend für die grosse Anzahl von Erdgastechnologien, die unserer Meinung nach ein grosses Verbesse-

Literatur

- Fisher, J. C. und R. H. Pry: A Simple Substitution Model of Technological Change. *Technological Forecasting and Social Change* 3: 75-88, 1971.
- Goell, N. S., S. C. Maitra und E. W. Montroll: On the Volterra and Other Nonlinear Models of Interacting Populations. *Rev. Mod. Phys.* 43: 231-276, 1971.
- Grenon, M. und C. Delahaye: (Hersg.): Conventional and Unconventional World Natural Gas Resources. *Proceedings of the Fifth IIASA Conference on Energy Resources*. CP-83-S4. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1983.
- Gold, T. und S. Soter: The Deep Earth Gas Hypothesis. *Center for Radiophysics and Space Research, Cornell University, Ithaca, N. Y.*, 1980.
- Grübler, A. und N. Nakicenovic: The Dynamic Evolution of Methane Technologies. WP-87-2. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1987.
- Kondratieff, N. D.: Die langen Wellen in der Konjunktur. *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik* 56/3: 573-609, 1926.
- Marchetti, C. und N. Nakicenovic: The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model. RR-79-13. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1979.
- Marchetti, C.: Society as a Learning System: Discovery, Invention and Innovation Cycles Revisited. RR-81-29. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1981.
- Marchetti, C.: When Will Hydrogen Come? WP-82-123. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1982.
- Nakicenovic, N.: Patterns of Change - Technological Substitution and Long Waves in the United States. WP-86-13. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1986.
- Rogner, H. H., Messner, S. Strubegger, M. und E. Schmidt: The Methane Age, Likely Gains in Current Technologies, Emerging Technologies and Their Likely Consequences Economic - Political - Geopolitical. WP-86-68. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1986.
- Rogner H. H.: Technology and the Prospects for Natural Gas, Results of Current Gas Studies. *Energy Policy* (im Druck), 1987.
- Strubegger, M. und S. Messner: The Influence of Technological Change on the Cost of Gas Supply. WP-86-38. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1986.
- Schumpeter, J. A.: *Business Cycles*, Band 1 und Band 2. McGraw-Hill, New York, 1939.

Bild 10. Wasserstoff- zu Kohlenstoffverhältnis im Weltenergieverbrauch (Marchetti, 1982)

Historisch hat sich das Energiesystem in die Richtung von (höherwertigen) Brennstoffen mit immer höherem Wasserstoff- zu Kohlenstoffverhältnis entwickelt. Methan (CH_4) ist der Brennstoff mit dem höchsten H/C-Verhältnis. Selbst wenn wir die Weltprimärenergiesubstitution in die Zukunft fortschreiben und ein kommendes Methanzeitalter erwarten, müsste nach der Jahrtausendwende sukzessive reiner Wasserstoff ins Energiesystem eingeführt werden, um den historischen Trend fortzusetzen. Nicht zuletzt aus Umweltgründen (CO_2 -Problem) erwarten wir ein Wasserstoffzeitalter als Nachfolger des Methanzeitalters. Erste Wasserstoffautos fahren bereits heute in unseren Städten. Die Entwicklung von Flugzeugen im Hyperschallbereich, an denen derzeit intensiv geforscht wird (Orient Express), erfordert entweder Methan oder Wasserstoff als Brennstoff.

rungspotential besitzen, wollen wir die Entwicklung von Tiefbohrtechnologien und hocheffizienter Gasturbinen herausgreifen.

Die Bilder 8 und 9 veranschaulichen die Lernkurve der Bohrtechnologien gemessen an der grössten erreichten Teufe. Wir wir sehen, ermöglichte die Weiterentwicklung der Technologie die Bewältigung immer grösserer Teufen. Obwohl die Technologie in diesem Fall aus der Erdölindustrie kommt und ihre Weiterentwicklung (um den speziellen Anforderungen tiefer Erdgaslagerstätten besser zu entsprechen) erst in den Kinderschuhen steckt, sehen wir doch deutlich, dass die technologische Entwicklung der Bohrtechnologie die Entwicklung von Erdgasvorräten aus tieferen Horizonten begünstigt. Weitere Entwicklungen in den Bereichen der Mikroelektronik werden die Erfassung umfangreicher geologischer Daten und deren Auswertung vor Ort ermöglichen und so Kostenreduktionen und Verbesserungen in den Erfolgsaussichten von Bohrungen bewirken.

Die Entwicklung von hocheffizienten, schadstoffarmen Technologien zur Umwandlung von Gas in Elektrizität (und Wärme), wie etwa Brennstoffzellen oder Gasturbinen, ist noch nicht ab-

geschlossen. Gasturbinen erreichen gegenwärtig Wirkungsgrade von 48 Prozent (bei Kraft-/Wärmekopplung noch bedeutend mehr). Verbesserungen des Wirkungsgrades bis knapp 60 Prozent sind keine Unmöglichkeit, um so mehr als wir uns in dieser Technologie an den Fortschritten, die in der Entwicklung von Düsentriebwerken erzielt wurden, orientieren können. Wir sehen also, dass das Potential der Weiterentwicklung der Erdgasttechnologien beträchtlich ist und sich längerfristig in weiteren ökonomischen und Umweltvorteilen von Erdgas niederschlagen wird.

Umweltfreundlichkeit

Als letzten immanenten Vorteil von Erdgas wollen wir auch kurz seine Umweltfreundlichkeit betonen. Wir wollen dieses Thema nicht ausführlicher behandeln, weil dieser Vorteil am offenkundigsten ist und allgemein akzeptiert wird. Erdgas ist frei von SO_2 -Emissionen, hat im Vergleich zu anderen Brennstoffen niedrige NO_x -Emissionen, die noch dazu durch einfache, billige Massnahmen wie neue Brennerkonfigurationen drastisch reduzierbar sind. Diese Vorteile sind besonders wichtig im Hinblick darauf, dass diese beiden Schadstoffkomponenten als Hauptverursacher säurehaltiger

Niederschläge gelten. In der Betrachtung der globalen Umweltsituation hat Erdgas darüber noch den Vorteil der geringsten CO_2 -Emissionen fossiler Energieträger. Dies bedeutet, dass der Übergang in ein Methanzeitalter das drohende Problem weltweiter Klimaveränderungen deutlich mildern kann.

Methan stellt darüber hinaus die ideale Übergangsenergieform in ein zukünftiges Energiesystem, das keine Emissionen produzieren würde, dar. Historisch können wir in der Entwicklung des Energiesystems eine kontinuierliche Verbesserung des Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnisses beobachten (Bild 10). Das Methanzeitalter könnte uns so in ein Wasserstoffzeitalter, in dem keine Emissionen mehr entstehen, führen.

Adresse des Verfassers: Arnulf Grübler, Dipl.-Ing., International Institute for Applied Systems Analysis, Schloss Laxenburg, A-2361 Laxenburg.

Vortrag, gehalten an den Jahresversammlungen des Verbandes der Schweizerischen Gasindustrie VSG und der Genossenschaft Usogas vom 20. Mai 1987

