

## Vom Erdöl- zum Methanzeitalter

Betrachtungen zur langfristigen Technologieentwicklung  
und der potentiellen Rolle von Erdgas im 21. Jahrhundert\*

*Arnulf Grübler*

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)  
Schloß Laxenburg, A-2361 Laxenburg

### 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 (Abbildung 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 (Abbildung 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 Erdöltechnologien 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 Veränderungen 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 IIASA 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 Abbildung 3 veranschaulichen wir diesen Substitutionsprozeß anhand der Einführung von 17 verschiedenen Innovationen, die von Fisher-Pry untersucht wurden.

\* Gastvortrag anlässlich der Jahresversammlung der USOGAS und des Verbandes der Schweizerischen Gasindustrie, Zug, 20. Mai 1987.

Bevor wir uns einem höheren Komplexitätsgrad der Analyse, nämlich der Beschreibung von Systemen, in denen mehrere Technologien um Marktanteile konkurrieren, zuwenden, betrachten wir noch eine wichtige Transformation der logistischen Substitutionsfunktion in Abbildung 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 (Abbildung 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 in 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 Abbildung 4 ersichtlich, ist die Kernenergie jedoch 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 Jahre\* 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 Solarenergie oder um Kernfusion handeln könnte.

---

\* 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.

## 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 Abbildung 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 einem den 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 in Gegensatz zu Erdölvorräten komprimierbar -- und immanenten Vorteilen in Umweltfreundlichkeit und vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten) nur ungenügend erkannt wurden. Historisch gesehen ist Erdgas als (oft unerwünschtes und abgefackeltes) *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 abzuzeichnen 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 weit verbreitet 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 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 zukünftiger dominierender Energiequelle sprechen, wollen wir die historische Entwicklung der Primärenergiesubstitution und die daraus folgende Projektion in die Zukunft aus Abbildung 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 (Abbildung 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\* 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 Abschwungs- 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 durch ein kurzfristiges "Ausschlagen" der Preise im allgemeinen und der Energiepreise im besonderen begleitet wird.

Abbildung 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) beschrieben. Ferner wird die Entwicklung des realen Energiepreisindex gezeigt. Die einzelnen Energieträger der Primärenergiesubstitution umfassen Holz und Futtermittel (Energieförderer 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 Energiequelle Futtermittel gekennzeichnet. Der Strukturbruch führt zu einem Ausschlagen der

---

\* Kondratieff erkannte, daß die Depression der 30'er Jahre sich nicht zwangsläufig aus der Marx'schen 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.

Energiepreise und Einführung eines neuen Energieträgers (Erdöl). Die der Depression folgende Wachstumsphase ist durch die Dominanz des Primärenergieträgers Kohle und dem Wachstum der mit ihm verbundenen Industrien (Dampfkraft, Eisenbahn, Bessemerstahl, etc.) 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 dem Wachstum ihm verbundener Industrien und Produkte (Verbrennungsmotor, Automobilindustrie, Petrochemie, Kunststoffe, etc.) 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 IASA 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 auf Grund 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 weiters bekannt, daß die Häufigkeitsverteilung der Vorräte von Erdgas und Erdöl über die Teufe *unterschiedlich* ist. Das heißt, daß 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 Metern gefördert wird, an der Oberfläche immer noch ein Faß Erdöl, wohingegen ein Faß (komprimiertes) Erdgas 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, Malaysia ja sogar aus dem Kathmandutal im Himalayagebiet werden Gasfunde berichtet).

Wie Abbildung 6 veranschaulicht, sind die nachgewiesenen Vorräte von Erdgas viel schneller angestiegen als die Erdölvorräte, sodaß 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 vier mal 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 (Abbildung 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.

In der bisherigen Argumentation haben wir jedoch nur einen kleinen Teil der möglichen Methanvorräte betrachtet, nämlich sogenanntes konventionelles Erdgas. Methan existiert darüberhinaus jedoch in überaus großen Mengen in Form von nicht-konventionellem Erdgas (Methan in Kohleflözen, Gasvorkommen unter hohem Druck in Sand- und Schiefer-schichten 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 wiederaufgelebt ist und überraschende (obwohl nicht unumstrittene) Möglichkeiten des nicht-biologischen Ursprungs von Methan aufzeigt, was praktisch unbeschränkte Vorräte bedeuten würde.

Schätzungen über nicht-konventionelle Erdgasvorräte existieren zwar nur für die USA, sie sind aber nichtsdestotrotz beeindruckend. Hannemann hat 1986 die nichtkonventionellen Erdgasvorkommen der USA auf über 230 Trillionen Kubikmeter geschätzt. Dies ist 40 Mal die Menge der konventionellen Vorräte und über 500 (!) Mal 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, sodaß 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 1.500 Metern erfolgreich niedergebracht werden können?

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 brilliant vom 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 6 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 etc. 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 zukünftiger 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 der Exploration, Bohrung und Förderung, Transport, 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 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 Anwendungsgebiete der Nutzung von Erdgas (etwa die direkte Reduktion von Eisen-erz) zeigen deutlich, daß die Möglichkeiten der weiteren evolutionären technischen Entwicklung von Erdgastechnologien nicht länger unberücksichtigt bleiben können. Entsprechende Untersuchungen am IASA haben gezeigt, daß selbst bei nur sehr

konservativer Fortschreibung der vergangenen Trends der technologischen Veränderungen und Effizienzsteigerungen der Erdgastechnologien das Wachstumspotential von Erdgas viel größer ist als gemeinhin 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.

Stellvertretend für die große Anzahl von Erdgastechnologien, die unserer Meinung nach ein großes Verbesserungspotential besitzen, wollen wir die Entwicklung von Tiefbohrtechnologien und hocheffizienter Gasturbinen herausgreifen.

Abbildungen 8 und 9 veranschaulichen die Lernkurve der Bohrtechnologien gemessen an der größten erreichten Teufe. Wie 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 zu 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 abgeschlossen. Gasturbinen erreichen gegenwärtig Wirkungsgrade von 48 Prozent (bei Kraft-Wärme Kopplung noch bedeutend mehr). Verbesserungen des Wirkungsgrades bis knapp 60 Prozent sind keine Unmöglichkeit, umsomehr 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 Erdgastechnologien beträchtlich ist und sich längerfristig in weiteren ökonomischen und Umweltvorteilen von Erdgas niederschlagen wird.

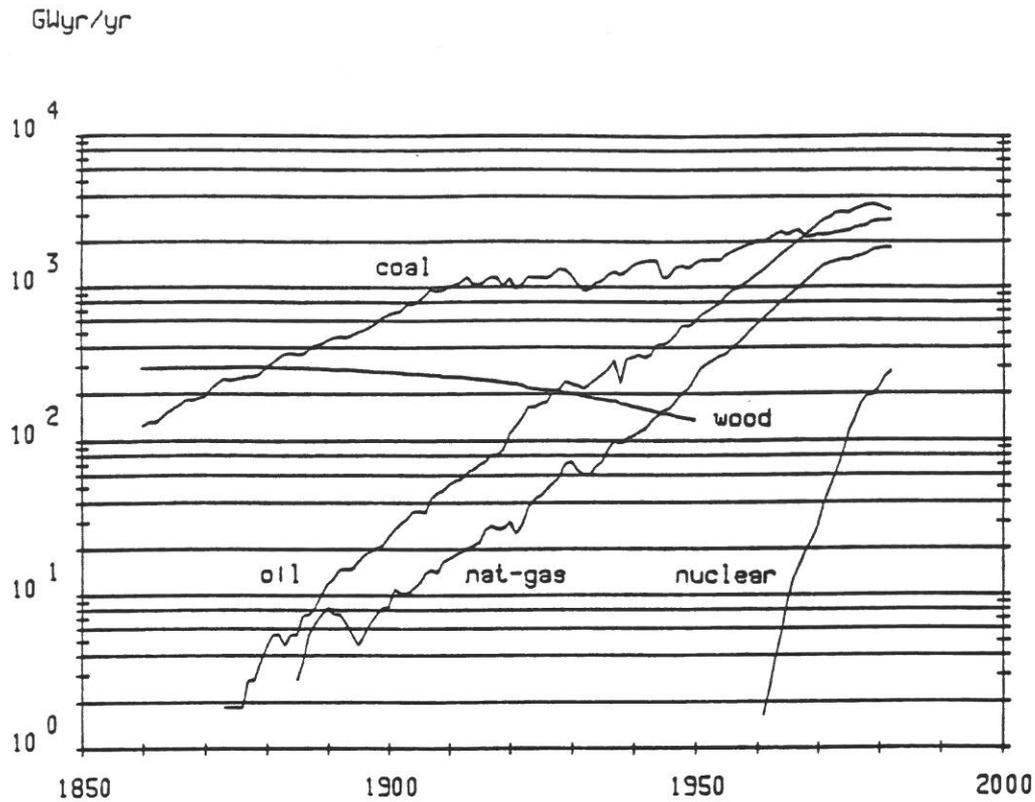
### *Umweltfreundlichkeit*

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 und allgemein akzeptiert ist. Erdgas ist frei von  $\text{SO}_2$ -Emissionen, hat im Vergleich zu anderen Brennstoffen niedrige  $\text{NO}_x$ -Emissionen, die noch dazu durch einfache, billige Maßnahmen, wie neue Brennerkonfigurationen drastisch reduzierbar sind. Diese Vorteile sind besonders wichtig in 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  $\text{CO}_2$ -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 (Abbildung 10). Das Methanzeitalter könnte uns so in ein Wasserstoffzeitalter, in dem keine Emissionen mehr entstehen, führen.

## LITERATUR

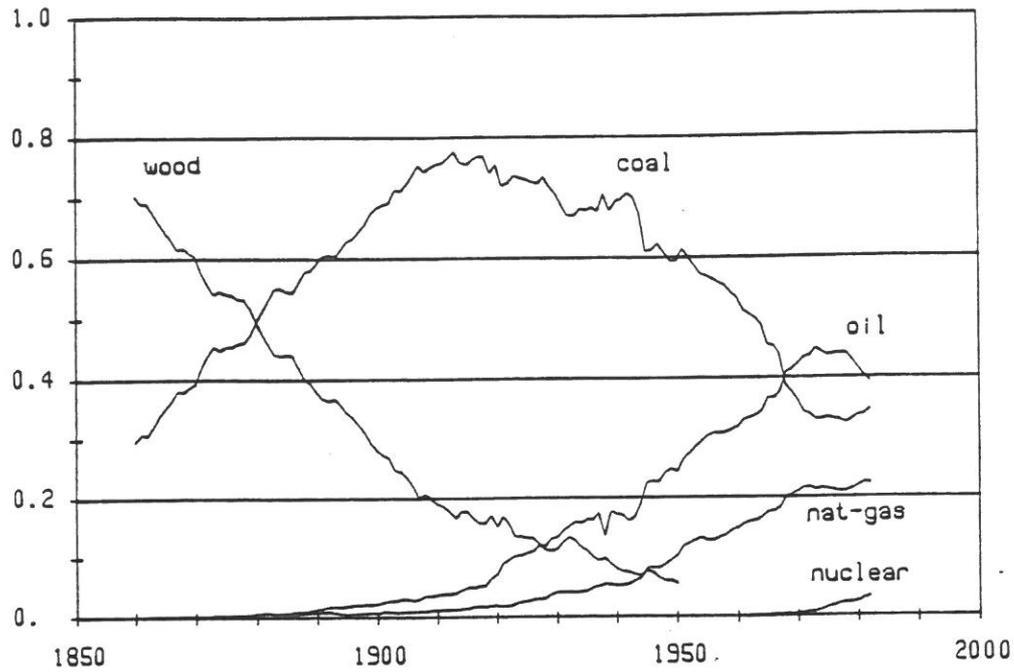
- Fisher, J.C. und R.H. Pry, 1971. *A Simple Substitution Model of Technological Change*. Technological Forecasting and Social Change 3:75-88.
- Goell, N.S., S.C. Maitra und E.W. Montroll., 1971. *On the Volterra and Other Nonlinear Models of Interacting Populations*. Rev. Mod. Phys. 43:231-276.
- Grenon,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



**Abbildung 1.** Entwicklung des Weltprimärenergieverbrauchs (Grübler und Naki-cenovic, 1987)

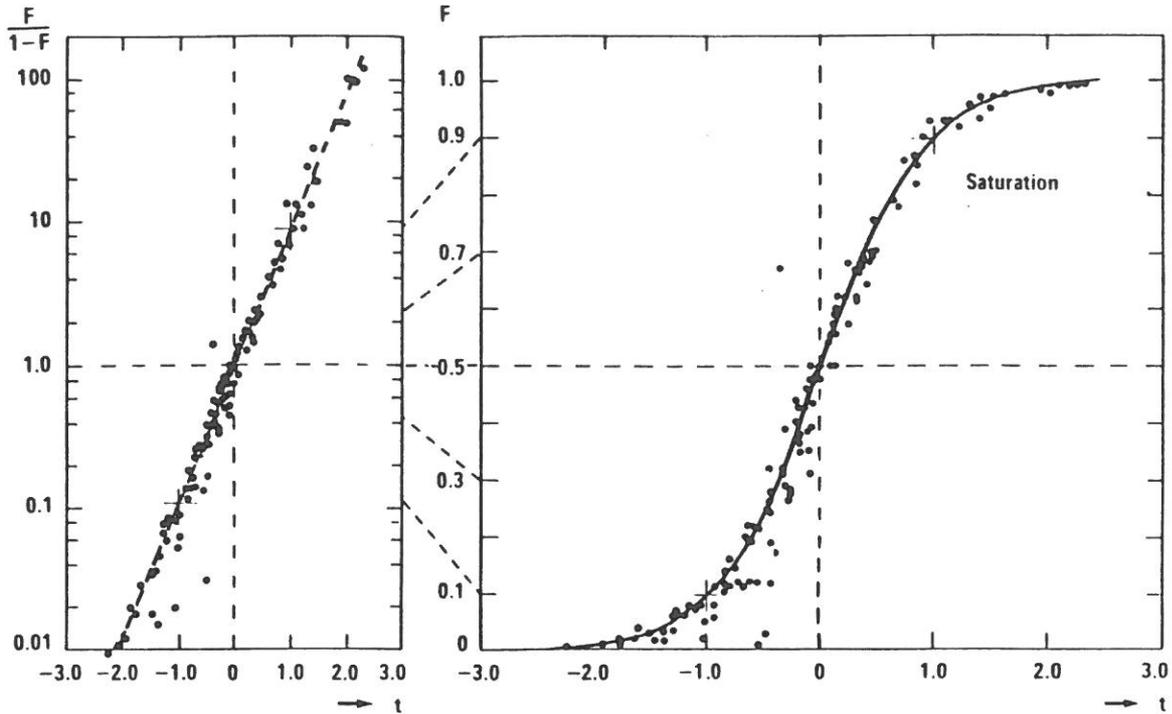
Globaler Verbrauch verschiedener Primärenergieträger (Holz, Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie) in GW-Jahren pro Jahr (Ein GW-Jahr entspricht etwa einer Million Tonnen Steinkohleneinheiten). Im logarithmischen Maßstab können die unterschiedlichen Wachstumsraten einzelner Energieträger, bzw. deren Veränderungen deutlich abgelesen werden. Diese unterschiedlichen Wachstumsraten führen zu Veränderungen im Marktanteil einzelner Energieträger.

fraction (f)



**Abbildung 2.** Entwicklung der Anteile einzelner Energieträger am Weltenergieverbrauch. (Grübler und Nakicenovic, 1987)

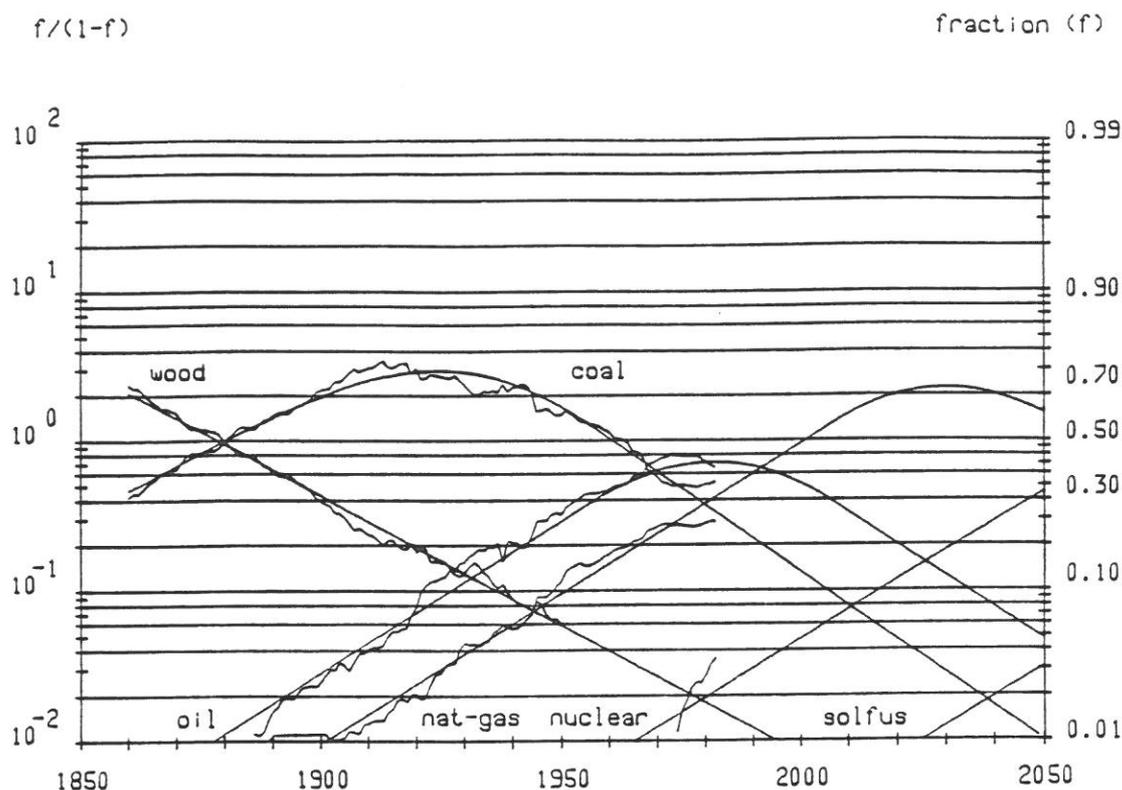
Anteil ( $f$  mal 100 ergibt den Prozentanteil) am Gesamtenergieverbrauch einzelner Primärenergieträger (Holz, Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie). Die unterschiedlichen Wachstumsraten führen zu Verschiebungen im Marktanteil einzelner Energieträger, die wir mittels des logistischen Substitutionsmodells nachvollziehen können.



**Abbildung 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, etc.) gemessen am Marktanteil  $F$ , den die neue Technologie am Markt innehält. Im einfachen Fall betrachten wir nur zwei Technologien, die alte, die verdrängt wird (und in der Abbildung nicht aufscheint) und die neue (vorteilhaftere) Technologie, die zunehmend Marktanteile gewinnt. Technologien verhalten sich wie biologische Spezies, die in eine 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 Transformation der logistischen Substitutionsfunktion. Wenn keine neuere Technologie die zuletzt eingeführte verdrängt, strebt diese der völligen Marktbeherrschung (100 Prozent Marktanteil) zu.



**Abbildung 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 Jahren 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.

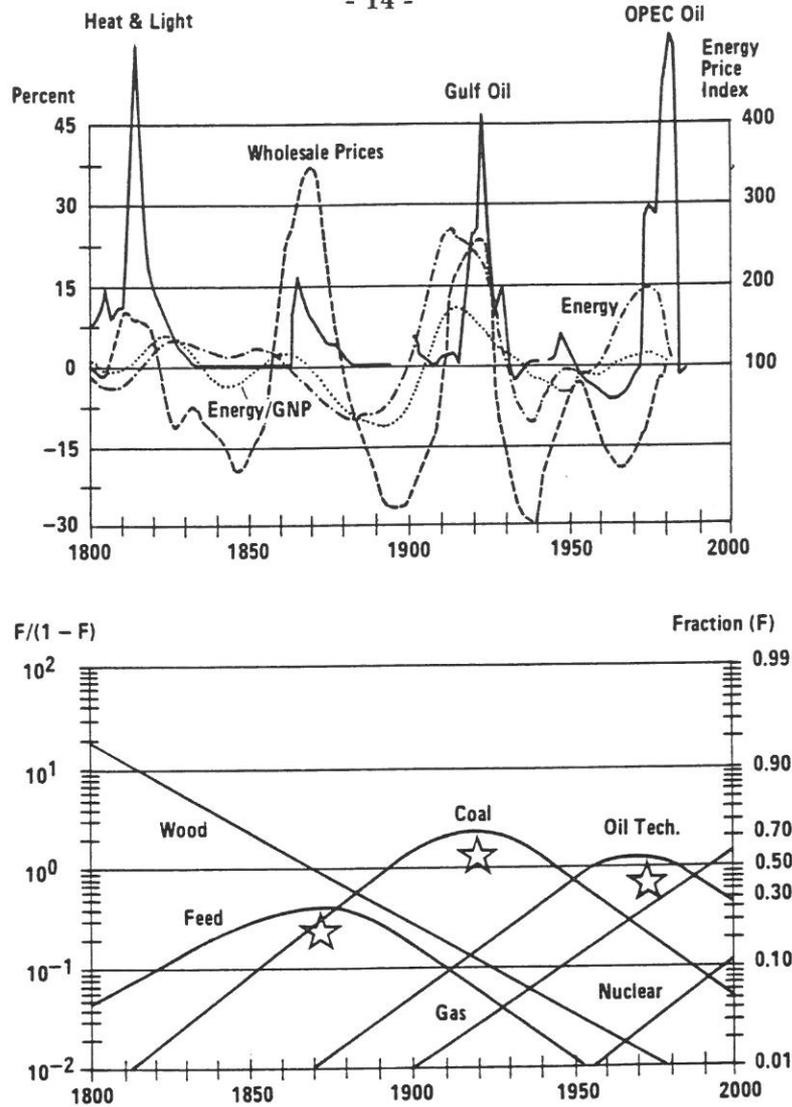


Abbildung 5. Primärenergiesubstitution und lange Wellen der wirtschaftlichen Entwicklung in den USA (Marchetti, 1981 und Nakicenovic, 1986)

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 70'er 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.

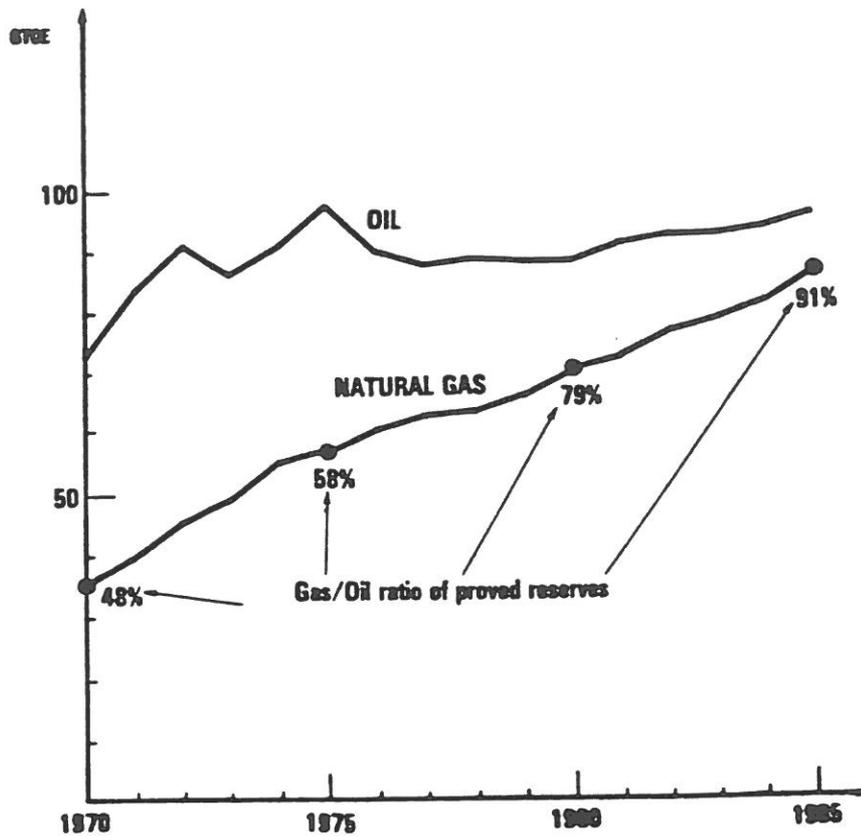
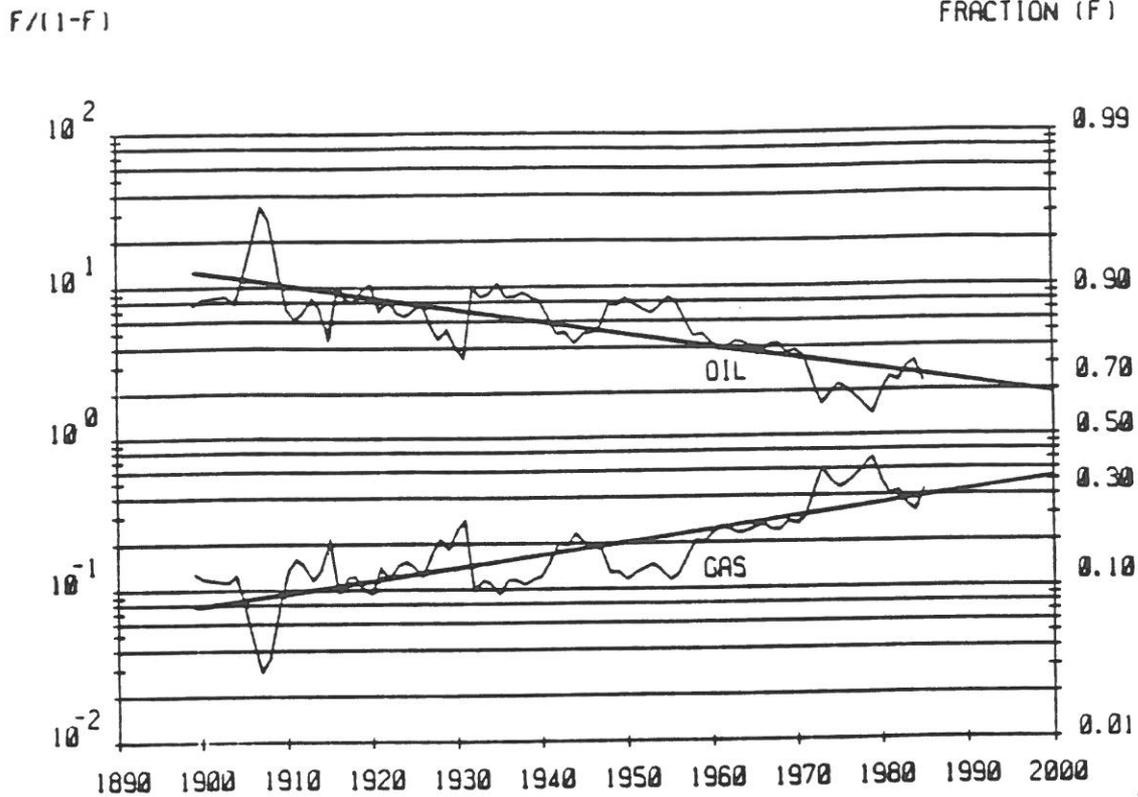


Abbildung 6. Entwicklung der Erdöl- und Erdgasreserven 1970 bis 1985 (Rogner et al., 1986)

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.



**Abbildung 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 Ölgeologen als hoffnungslos beurteilt werden.

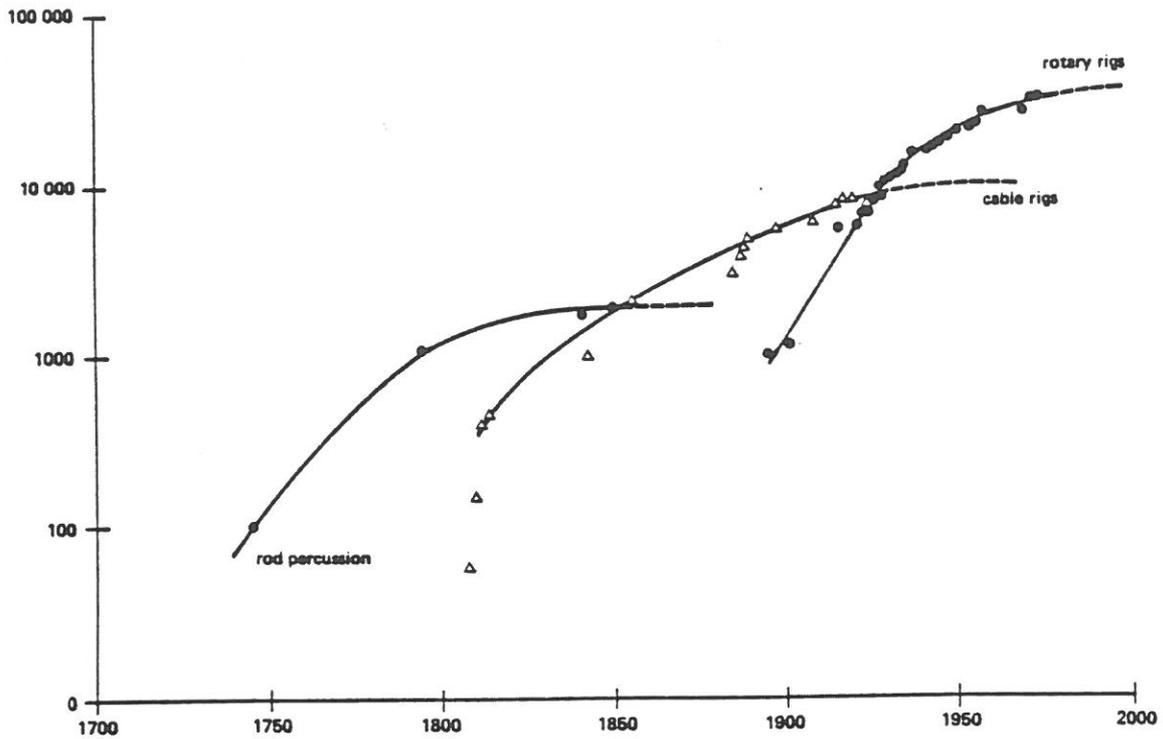
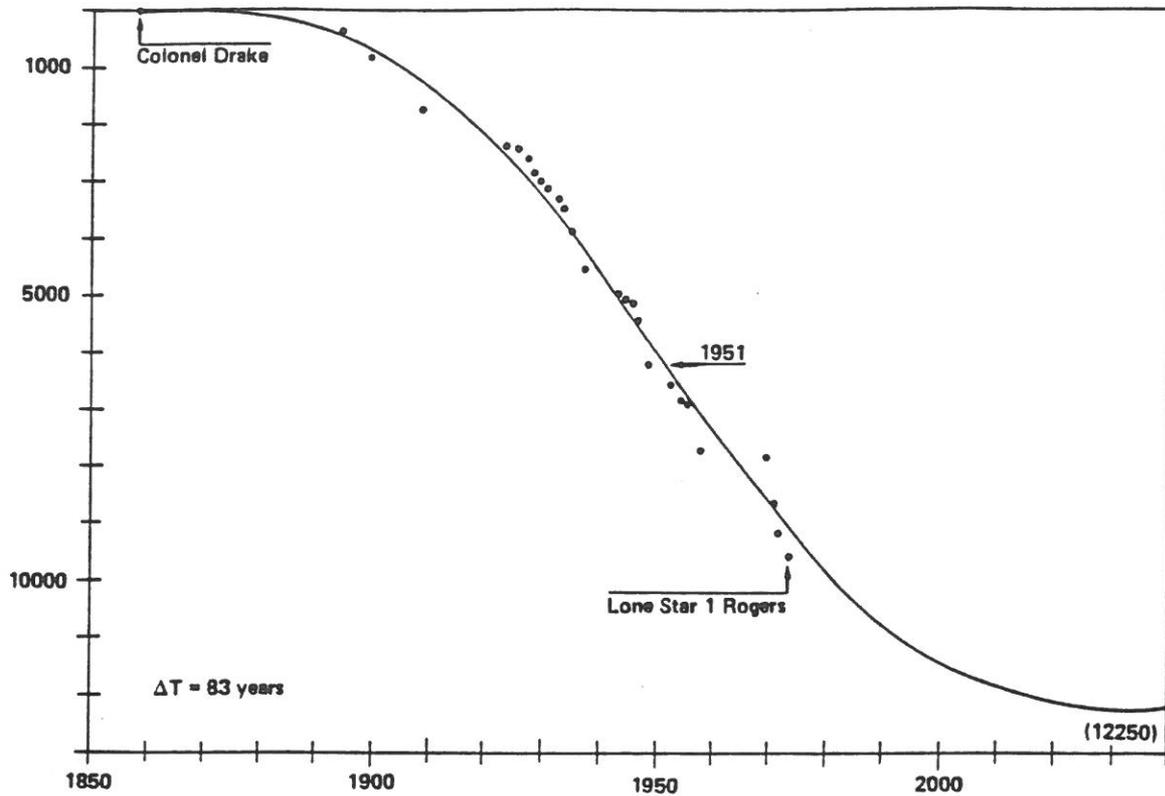


Abbildung 8. Rekorde in den erzielten Bohrtiefen (in Fuß) verschiedener Bohrtechnologien (Grübler und Nakicenovic, 1987)

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.



**Abbildung 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.

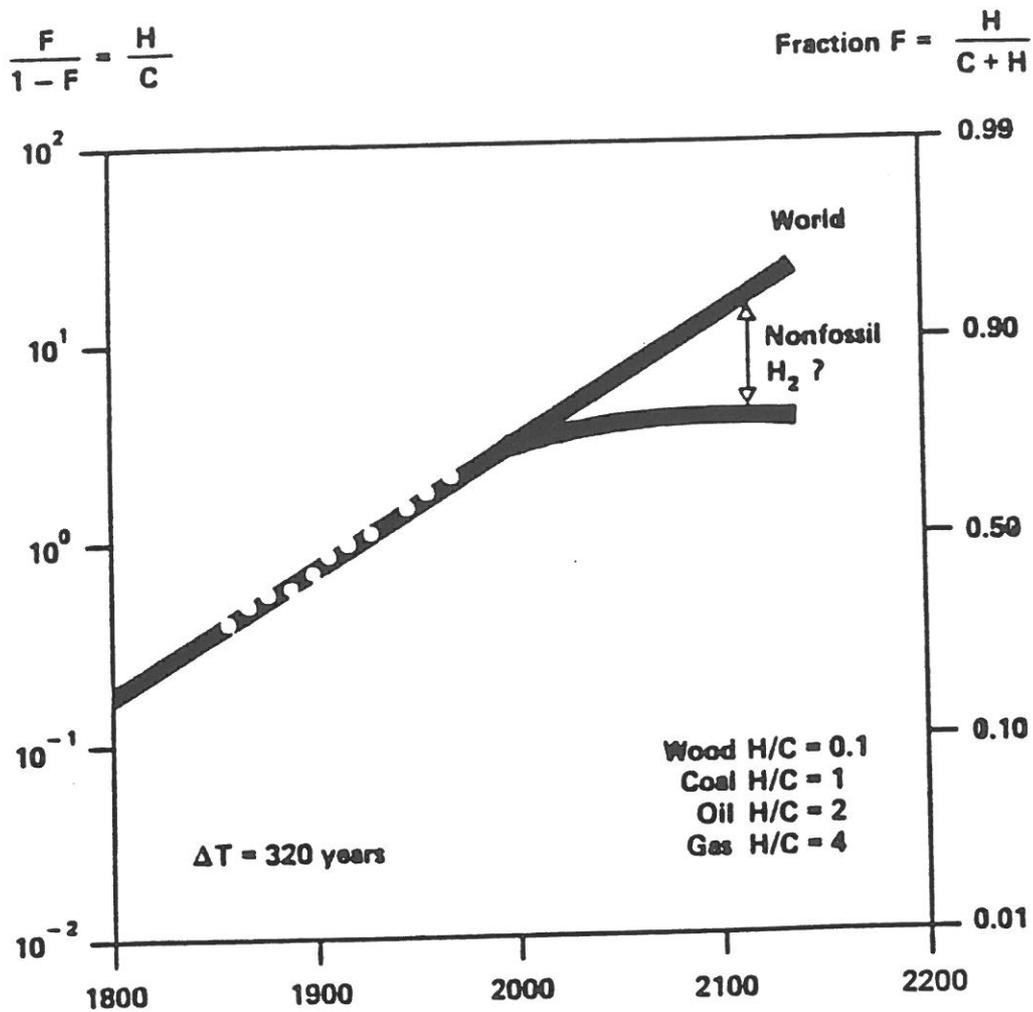


Abbildung 10. Wasserstoff zu Kohlenstoffverhältnis im Weltenergieverbrauch (Marchetti, 1982)

Historisch hat sich das Energiesystem in die Richtung von (höherwertigen) Brennstoffen mit immer höherem Wasserstoff zu Kohlenstoff Verhältnis 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. *Methan ist der ideale Energieträger zur Überleitung ins Wasserstoffzeitalter.*