

**2.
Optimierung der Energie-Versorgung unter der Vor-
aussetzung der unterschiedlichen Wachstumspro-
gnosen und Wachstumsvorstellungen**

2.1.

Kurzfristige und langfristige Optimierungsstrategien aufgrund fester Vorgaben (statistische Strategien)

1. Einführung

In neuerer Zeit hat sich weltweit eine beträchtliche Aktivität zur Entwicklung von Modellen des Energiesystems ergeben, die als Hilfe für die Entscheidungsfindung in der Energieplanung dienen sollen. Dies könnte den Laien zu der Annahme führen, daß sich dieses zunehmende Interesse und die verstärkte Aktivität auf die Ölkrise des Jahres 1973 zurückführen läßt, aber das Interesse an diesem Problem liegt weiter zurück, obwohl die Energiekrise zweifellos das Energieproblem in die öffentliche Diskussion gerückt hat. Wir werden uns in zunehmendem Maße bewußt, daß die Bedürfnisse und Forderungen einer modernen Gesellschaft ständig komplexer werden und daß die Lösung technischer Probleme nicht in der Isolierung erfolgen kann; im Gegenteil: die gegenseitige Abhängigkeit zwischen dem Gesellschaftssystem und der technologischen Infrastruktur bedarf noch eines besseren Verständnisses, ehe technologische Entscheidungen gefällt werden. Dies gilt insbesondere bei der Planung des Energiesystems, da die Energie auf sämtlichen Gebieten menschlicher Betätigung eine wichtige Rolle spielt, nicht nur weil sie eine lebenswichtige Dienstleistung erbringt, sondern auch, weil sie eine entscheidende Rolle bei der Verschmutzung unserer Umwelt spielt.

In der Vergangenheit ist die ständig zunehmende Nachfrage nach Energie die Triebkraft zur Entwicklung neuer Energietechnologien gewesen: der historische Zusammenhang zwischen Wirtschaftswachstum und Energienachfrage ist oft so eng gewesen, daß die Energieplaner kaum mehr zu tun hatten, als die Kapazitäten in einem Verhältnis zu erweitern, das dem erwarteten Zuwachs des Bruttosozialprodukts entsprach. Soweit Modelle erstellt wurden, handelte es sich um Modelle mit einfacher Struktur und nur wenigen Parametern. Der bekannteste Grundsatz, der sich aus dieser Art historischer Trendplanung entwickelte, besagte, daß sich die Nachfrage nach elektrischer Energie alle 10 Jahre verdoppelt. Daß derart einfache prognostische Modelle trotzdem

brauchbare Ergebnisse lieferten, ist darauf zurückzuführen, daß Primärenergiequellen immer in genügendem Umfange vorhanden waren und daß die negativen Auswirkungen des Energiesystems zwar verhältnismäßig geringer waren, jedoch auch damals nicht voll verstanden wurden.

Das exponentielle Wachstum der Industrie und des zugehörigen Energiesystems hat nun in neuerer Zeit die Situation grundlegend verändert. Die Funktionsfähigkeit und Weiterentwicklung der modernen Industriegesellschaft ist in zunehmendem Maße abhängig von der reibungslosen Funktion des Energieversorgungssystems, das genügend Energie für ihre Bedürfnisse liefern muß. Aber allein schon die Größe und die Anforderungen des Energieversorgungssystems haben unweigerlich eine große Anzahl unerwünschter Nebenwirkungen mit sich gebracht: hierzu gehören die Umweltauswirkungen, die in vielen Ballungszentren der Welt schnell einen Krisenumfang erreichen, und die zunehmende Abhängigkeit des Energieversorgungssystems von importierten Primärenergieträgern.

Diese veränderte, aber auch komplexere Situation muß berücksichtigt werden, wenn man die Energieversorgungssysteme der Zukunft plant. Dies bedeutet, daß man die Planung des Energieversorgungssystems nicht mehr als ein rein technologisches und wirtschaftliches Problem ansehen darf, sondern daß viele soziale, umweltbedingte und politische Zwänge in die Entscheidungshilfen eingebaut werden müssen, die wir heute entwickeln. Diese Entscheidungshilfen sollten eine umfassende Analyse des Energieproblems erlauben.

Zusammengefaßt darf man aussagen, daß die Analyse des Energieproblems und die Planungsmethoden in der Lage sein müßten, eine umfassende Beschreibung sämtlicher möglichen Konsequenzen alternativer Energiepolitikbeschlüsse zu liefern, ehe die Entscheidungen getroffen werden. Zu diesem Zweck muß man die miteinander verknüpften Elemente des Energiesystems und der Umwelt analysieren und quantifizieren.

Im Rahmen einer Analyse der Energiepolitik kann man folgende Auswirkungsbereiche abgrenzen:

Wirtschaft

Kosten
Kapitalbedarf
Personalbedarf
Wirtschaftsstruktur

Umwelt

Luftverschmutzung
Wasserverschmutzung
Abfallbeseitigung
Klima

Natürliche Hilfsquellen	Wasser Land Rohstoffe
Mensch und Gesellschaft	Risiko Gesundheit Lebensstandard
Staatliche Politik	Forschungsbedarf Subventionen Bedarfssicherung

Die herkömmliche Energieanalyse hat sich auf die Wechselwirkungen der Energie mit dem Bereich „Wirtschaft“ konzentriert und die anderen Bereiche vernachlässigt. In neuerer Zeit haben wir uns intensiver mit den anderen Auswirkungsbereichen befaßt, aber die Arbeiten auf diesem Gebiet sind in methodischer Hinsicht noch im Entwicklungsstadium. Infolgedessen muß man weiterhin an der Erstellung von Planungsinstrumenten arbeiten, die eine Integration der Analyse künftiger Energieversorgungssysteme mit der Umwelt und ihrer Auswirkungen auf die Gesellschaft sicherstellen.

2. Erstellung von Modellen des Energieversorgungssystems

Modelle des Energieversorgungssystems umfassen die Gewinnung der Primärenergien, ihren Transport und ihre zentralisierte Umwandlung in andere Energieformen, sowie anschließend den Transport, die Verteilung und die Verwendung der Energie durch den Verbraucher. Damit ist nur ein Teil des Gesamtenergieproblems angesprochen, aber ein zentraler Teil, dessen Lösung einen notwendigen Ausgangspunkt darstellt, ehe man andere Energieprobleme behandeln kann.

Ehe wir die Rolle der Optimierungsmodelle bei der Erstellung von Energieversorgungsmodellen ausführlicher behandeln, erscheint es angebracht, den Begriff der Optimierungsmethode zu definieren. Optimierungsmethoden haben weder den Zweck, eine einzige „optimale“ Lösung zu finden, noch Prognosen abzugeben, sondern es handelt sich darum, eine Anzahl „durchführbarer“ Alternativen zur Erfüllung einer Anzahl von politischen Zielen unter gegebenen sozialen, ressourcenbedingten und umweltbedingten Zwängen zu untersuchen. Mit anderen Worten: wir verwenden diese Methoden als Werkzeug zum Vergleich alternativer Strategien.

In der Bundesrepublik hat man seit Anfang der sechziger Jahre Optimierungsmodelle im Energiebereich verwendet. Die frühesten dieser Modelle beschränkten sich auf die Analyse einzelner Sektoren oder Kraftwerke, z.B. bei der Planung von Erweiterungen des Kraftwerkssystems oder der Optimierung der Mischprobleme der Öltraffinerien.

Nach gewisser Zeit wurden Modelle des gesamten Energieversorgungssystems entwickelt, und neuerdings hat man Versuche unternommen, eine Integration dieser Modelle mit Modellen der Wirtschaft und der Umwelt vorzunehmen.

Eine grobe Klassifizierung der Optimierungsmodelle im Energiebereich ist nachstehend aufgeführt:

- Sektorale Modelle (d.h. der Elektrizitätssektor)
- Umfassende Modelle des Energieversorgungssystems
- Integrierte Modelle für die Bereiche Energie, Wirtschaft und Umwelt.

Mit Hilfe einer anderen wichtigen Dimension kann man die Optimierungsmodelle wie folgt klassifizieren:

- Statische Modelle, die sich jeweils nur mit einem Zeitpunkt befassen
- Quasi-dynamische Modelle, die eine Reihe statischer Modelle optimieren, wobei der Eingabewert des Zeitraums $t+1$ von den Ergebnissen der Lösung für die Zeit t abhängig ist
- Dynamische Modelle, die eine gleichzeitige Optimierung über mehrere zeitliche Perioden gestatten.

3. Modell für Alternativen des Energieversorgungssystems und ihre allgemeinen Umweltauswirkungen

Es folgt nunmehr eine kurze Beschreibung eines Modells (nachstehend als „MESSAGE“ bezeichnet), an dem wir bei IIASA gearbeitet haben. Dieser Beschreibung folgt eine Auswahl numerischer Ergebnisse aus Rechnerläufen für die USA*.

3.1. Zielsetzungen des Modells

Das allgemeine Ziel des MESSAGE-Modells besteht darin, ein Instrument zur Untersuchung der Folgen eines breiten Bereichs möglicher künftiger Situationen auf dem Energiesektor zu bieten, in anderen Worten: eine Untersuchung der wirtschaftlichen Auswirkungen und Umweltauswirkungen, die eintreten, wenn man eines von mehreren möglichen Energieversorgungssystemen unter verschiedenen Annahmen im Hinblick auf

- die Verfügbarkeit von Rohenergievorräten,
- derzeitige und künftige Energieumwandlungstechnologien,

* Vgl. M. Agnew/L. Schrattenholzer/A. Voss: MESSAGE, A Model for Energy Supply Systems Alternatives and their General Environmental Impact. (MESSAGE, Ein Modell für Alternativen im Energieversorgungssystem und ihre allgemeinen Umweltauswirkungen), wird demnächst veröffentlicht.

- verschiedene Nachfragewerte und Endverbrauchergewohnheiten, sowie
- Umweltschutz

wählt, sowie zu zeigen, welche Entscheidungen wann getroffen werden müssen, um die einzelnen angenommenen Energiestrategien auszuführen.

Die nachstehende Auflistung der vom MESSAGE-Modell erfaßten Bereiche, sowie eine anschließende Aufstellung von Bereichen, die das Modell nicht erfaßt, dürfte dazu beitragen, den Umfang der detaillierteren Zielsetzungen dieses Modells genauer zu definieren.

Fragen, zu deren Beantwortung das MESSAGE-Modell beitragen dürfte

1. Welches künftige Potential hat umweltfreundliche Energie aus Kohle und Sonnenenergie-Technologien im Großmaßstab?
2. Sind umweltfreundliche, im Umfang kleine Technologien wirklich attraktiv?
3. Welches ist der optimale Zeitpunkt für die Einführung neuer Energieversorgungstechnologien?
4. Welche Zwänge gehen von der Umwelt auf die „optimale“ Energiestrategie aus?
5. Wie hoch ist der unmittelbare Kapitalbedarf für verschiedene Energieversorgungsstrategien?
6. Wie sieht die angemessene Rolle der Kernenergie in der künftigen Energieversorgung aus?
7. Wie sieht der Bereich der möglichen Mischverhältnisse der verschiedenen langfristigen Lösungsmöglichkeiten für Energieerzeugung und Energieverteilung aus?
8. Wie groß ist die mögliche Rolle der gemeinsamen Erzeugung von Fernwärme und elektrischem Strom?
9. In welchem Umfange werden oder könnten veränderte Endverbrauchergewohnheiten die Gesamteffizienz des Energiesystems verbessern?
10. Was kostet eine Verringerung der Abhängigkeit von importierter Energie?

Fragen, die das MESSAGE-Modell nicht beantworten kann

1. Welche Auswirkungen haben die verschiedenen Energieversorgungsstrategien auf die Wirtschaft?
2. Ist ein Nullzuwachs der Energienachfrage wünschenswert?

3. Wie werden sich die Ölpreise auf dem Weltmarkt entwickeln?

4. Wie sieht ein elastisches Welt-Energiehandelssystem aus?

Zu einer Detailuntersuchung alternativer Versorgungssysteme und einer ausreichenden Bewertung ihrer Umweltauswirkungen muß das Modell unbedingt eine eindeutige Beschreibung des Energietransports, der Energieverteilung und der Energieverwendung sowie der Sektoren des Primärenergieverbrauchs und der zentralen Energieumwandlung enthalten. Unter Energieverwendungsanlagen verstehen wir Anlagen, die „Endenergie“ in „Gebrauchsenergie“ umwandeln, z.B. Flüssigbrennstoff zu Prozeßwärme. Hierbei gibt es zwei wichtige Aspekte:

- Die Verteilungskosten der Sekundärenergie sind abhängig von der Lastdichte und beeinflussen daher die Kosten der Energieverwendungsanlagen, die Sekundärenergie abnehmen, und
- die „weichen“, dezentralisierten Energiealternativen unterliegen auf die eine oder andere Art Grenzen im Hinblick auf die Energiemengen, die sie pro Flächeneinheit liefern können.

Infolgedessen verwenden wir folgende allgemeine Methode zur Beschreibung des Energietransports, der Energieverteilung und der Energieverwendung, wobei der Sektor Raumheizung als Beispiel dienen soll. Abbildung 1 zeigt seine Grundstruktur.

Der exogene Eingabewert des Modells ist die Grundenergienachfrage, unter der im vorliegenden Beispiel die für Raumheizungszwecke benötigte Wärmeenergie und ihre Energiedichteverteilung zu verstehen sind. Die Linearisierung der nichtlinearen Dichteverteilungskurve wird erreicht, indem man verschiedene Energiedichteklassen mit konstanter Energiedichte festlegt. Durch Berücksichtigung alternativer Raumheizungstechnologien, z.B.

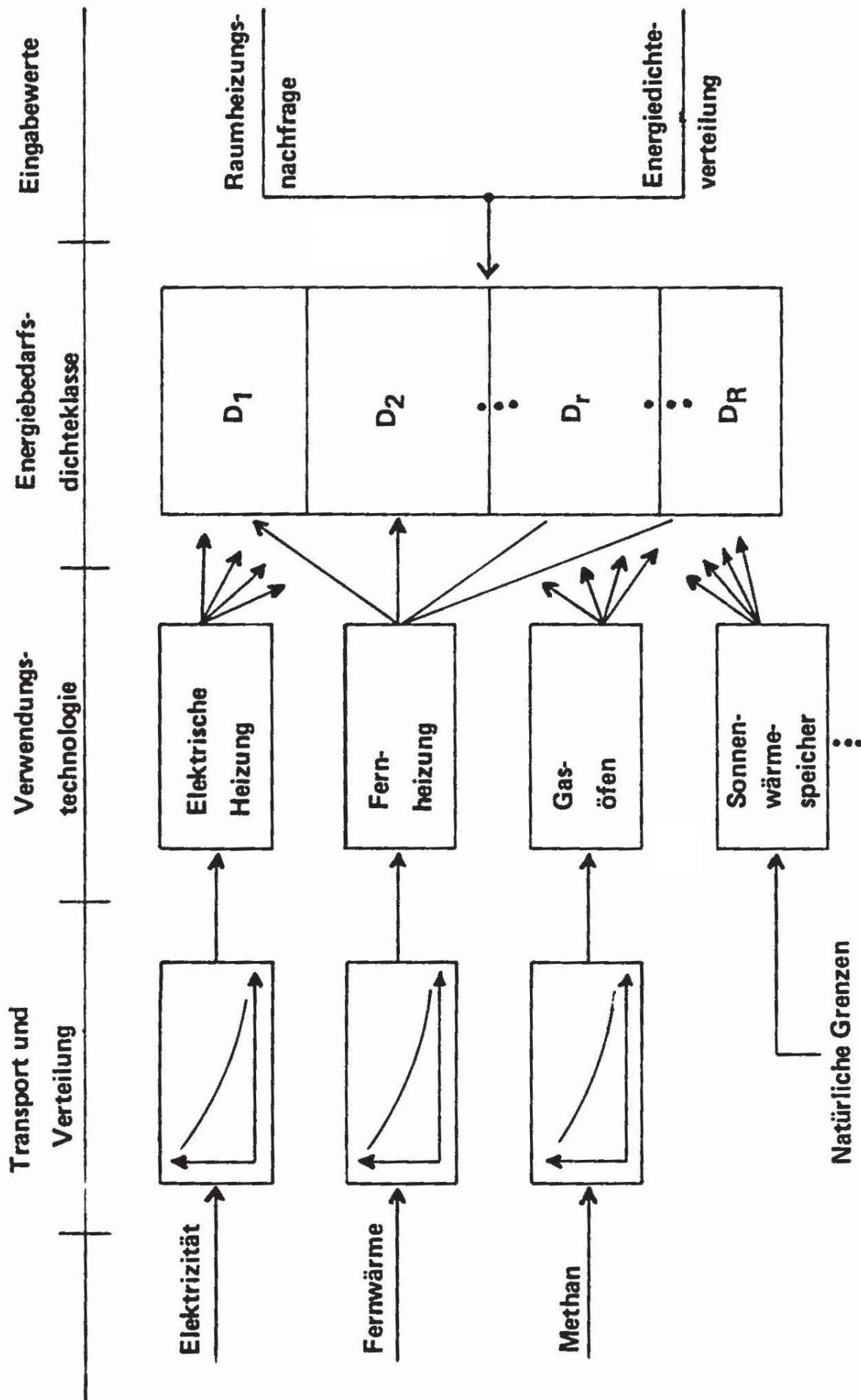
- Elektrische Heizung
- Fernheizung
- Gasöfen
- Sonnenwärmespeicher,

sowie unter Berücksichtigung der Energietransport- und Energieverteilungskosten der verschiedenen betroffenen Energieformen (bzw. im Falle der Sonnenenergie der natürlichen Versorgungsgrenzen) kann man den Anteil der alternativen Verwendungstechnologien an der Befriedigung der Raumheizungsnachfrage bestimmen.

3.2. Allgemeine Modellstruktur

Das MESSAGE-Modell ist ein dynamisches lineares Programm zum Vergleich alternativer vorhandener und neuer Energieversorgungs-

Abbildung 1:
Transport, Verteilung und Endverwendung der Energie



technologien für zentrale Kraftwerke und Brennstoffenergieumwandlung, Energieverteilung und Endverwendung der Energie, mit denen die einzelnen Komponenten der Energienachfrage befriedigt werden können. Zwänge entstehen durch die Verfügbarkeit der vorhandenen Primärenergiequellen bei Zugrundelegung verschiedener Preisebenen und die Belastungsfähigkeit der Umwelt. Aus weiteren Zwängen ergeben sich Grenzen für die Geschwindigkeit der Markteinführung neuer Technologien und der Abnahme vorhandener Technologien, soweit sich hierdurch soziale Probleme ergeben. Das MESSAGE-Modell findet nun eine nach Kosten optimierte Lösung für einen glatten Übergang von einem Energiesystem, das auf knappen fossilen Energiequellen beruht, zu einem Energiesystem, das auf Primärenergiequellen beruht, die in der Lage sind, auf unbegrenzte Zeit große Energiemengen zu liefern. Man kann das Modell jedoch auch verwenden, um z.B. die Folgen schärferer Auflagen im Hinblick auf die Umweltauswirkungen, die durch das Energieversorgungssystem verursacht werden, zu untersuchen, oder um mögliche neue Technologien zu prüfen und festzustellen, bei welcher Kostenstruktur sie wettbewerbsfähig werden.

Ehe wir uns einer detaillierteren Beschreibung der verschiedenen Bestandteile des MESSAGE-Modells zuwenden, wollen wir folgende Schreibweise einführen:*

Zwecks Aufstellung der dynamischen Gleichungen des Modells wird die Zeit bis zum Planungshorizont in n_t Zeitintervalle (1,2, ..., t, ..., n_t) der Länge δ_t aufgeteilt. Das jeweilige Zeitintervall einer Variablen wird durch (t) bezeichnet, das der Variablen nachgestellt ist (z.B. $x(t)$). Wenn sämtliche Variablen einer einengenden Bedingung in die gleiche Zeitperiode fallen, wird das „(t)“ weggelassen, sofern hierdurch keine Verwechslung möglich ist.

Die wichtigsten Aktivitäten des Modells werden wie folgt definiert:

$x(t)$ ist ein $\{n\}$ -Vektor, der die Produktionsmenge, gemessen in Leistungseinheiten der Versorgungstechnologien während des Zeitraums (t), darstellt.

$y(t)$ ist ein $\{n\}$ -Vektor, der die zusätzliche Kapazität von $x(t)$ darstellt, die im Zeitraum (t) geschaffen wird.

$x(t)$ und $y(t)$ können in die Anteile der zentralen Brennstoffverarbeitung und Umwandlung, der Energieumwandlungsprozesse und der Ener-

* Im allgemeinen versuchen wir, die übliche Schreibweise zu verwenden, bei der Matrizen durch lateinische Großbuchstaben und Vektoren durch lateinische Kleinbuchstaben bezeichnet werden. Skalare werden im allgemeinen mit griechischen Buchstaben bezeichnet, mit Ausnahme der hoch- bzw. tiefgesetzten Indizes. i, j werden im allgemeinen als Index für Zeilen und Kolonnen verwendet, während m, n die Dimensionen der Zeilen und Kolonnen angeben. Soweit von dieser Schreibweise abgewichen wird, erfolgt eine Erklärung im Text.

gieverwendungsprozesse aufgeteilt werden, d.h.

$$x(t) = \{ x_p(t) : x_s(t) : x_u(t) \},$$

wobei die Subvektoren die Länge n_p , n_s bzw. n_u haben.

$r(t)$ ist ein $\{m_r \times n_r\}$ -Vektor für Primärenergiequellen, wobei m_r die Anzahl der verschiedenen verfügbaren Energiequellen und n_r die Anzahl der Energiequellenkategorien ist (zur Vereinfachung der Darstellung werden diese als gleich angenommen; das Rechnerprogramm gestattet die Verwendung von verschiedenen Anzahlen von Kategorien für jeden einzelnen Energiequellentyp). ($r(t)$ kann man auch als $\{m_r \times n_r\}$ Matrix $R(t)$ ansehen.)

$z(t)$ ist ein $\{m_u\}$ -Vektor der Grundenergienachfrage.

Schließlich beziehen sich

m_r , m_p , m_s und m_u auf die Anzahl der verschiedenen Energieformen, d.h. Energiequellen, Produkte der zentralen Energieumwandlung und Endenergieverwendungsanlagen.*

3.3. Die Zielfunktion

Als Zielfunktion kann man die Minimierung der Primärbrennstoffkosten zusätzlich Betriebs- und Wartungskosten (ohne Brennstoff) sowie der über einen bestimmten Zeitraum abgeschriebenen Kosten der Schaffung zusätzlicher Kapazitäten ansehen.

$$(1) \quad \sum_{t=1}^{n_t} \beta(t) (b'_r r(t) + c'_p x_p(t) + c'_s x_s(t) + c'_u x_u(t) + d'_p y_p(t) + d'_s y_s(t) + d'_u y_u(t))$$

wobei

b , c und d die Einheitskostenvektoren der Primärenergiequellen, der Betriebs- und Wartungskosten bzw. der Kapitalkosten sind.

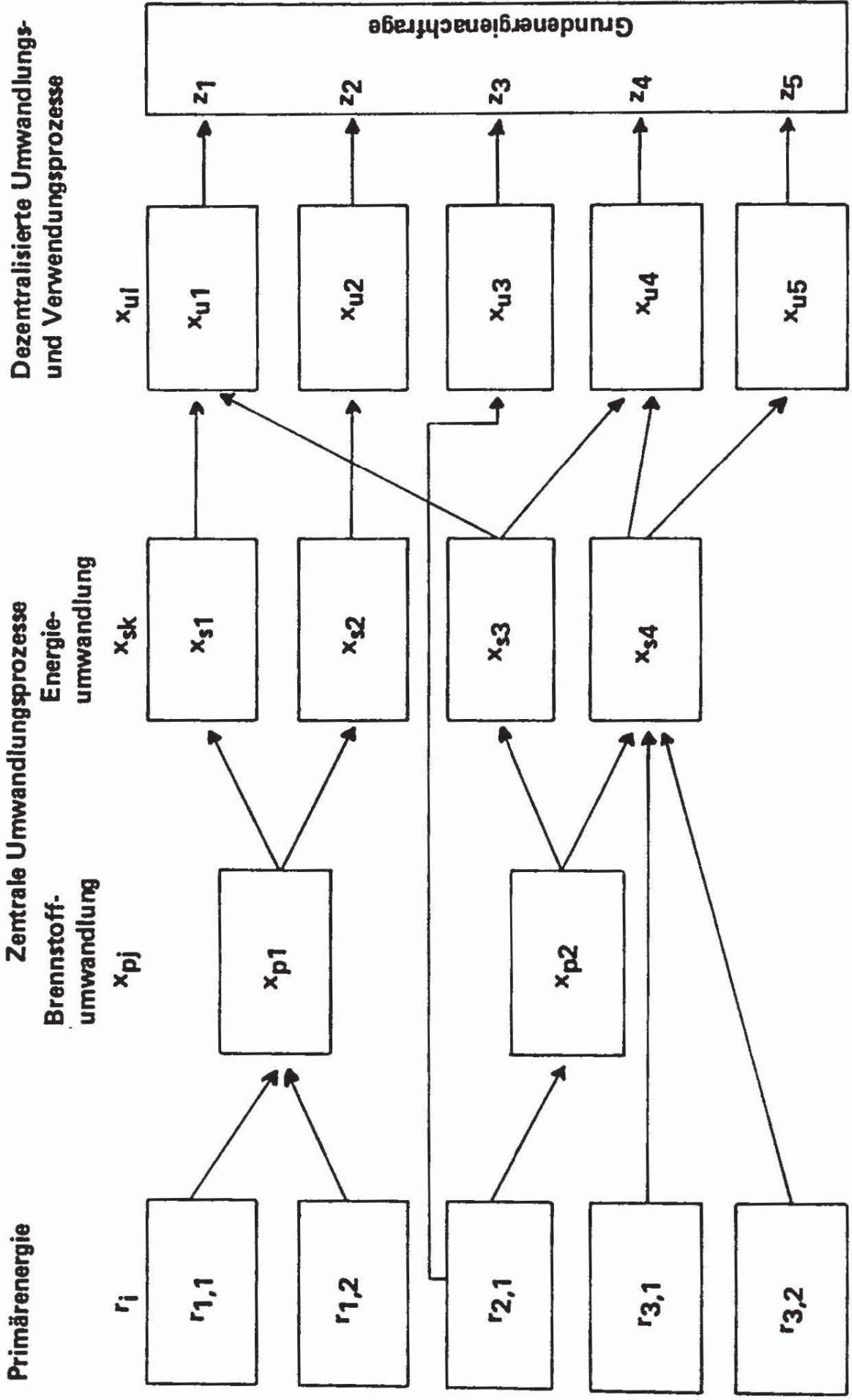
$\beta(t)$ ist der Abschreibungsfaktor.

3.3.1. Die Angebots- und Nachfragegleichungen

Da das MESSAGE-Modell nachfragebestimmt ist, wollen wir die Beschreibung der Modellstruktur mit den Angebots- und Nachfragegleichungen beginnen: Gegeben ist eine Reihe von „Grundenergie-

* Andere Buchstaben, die Koeffizienten oder Variablen bezeichnen, verwenden wir nicht immer einheitlich, sondern erklären die Schreibweise der einzelnen Beziehungen im Text.

Abbildung 2:
Schematische Darstellung des MESSAGE-Modells



nachfragesektoren“ gemäß Abbildung 2. Die Nachfrage auf diesen Sektoren wird durch dezentralisierte Energieumwandlungs- und Energieverwendungsanlagen befriedigt, in denen „Endenergie“ (z. B. Kohle, Flüssigbrennstoff und Elektrizität) zu „Gebrauchsenergie“ umgewandelt wird. Die Endenergie ist wiederum das Produkt von zentralen Umwandlungsstationen bzw. Primärenergiegewinnungsanlagen. Das letzte Glied der Angebots- und Nachfragekette ist die Minderung der natürlichen Hilfsquellen.

Mathematisch kann man dieses Konzept durch folgende Matrix/Vektor-Beziehung darstellen:

$$(2) \quad \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} -V_{ru} & -V_{rs} & -V_{rp} & A_r \\ -V_{pu} & -V_{ps} & A_p & \\ -V_{su} & A_s & & \\ A_u & & & \end{array} \right| \cdot \begin{array}{c} x \\ \\ \\ \end{array} \geq \begin{array}{c} z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \end{array}$$

Da die Variablen in Ausgabeinheiten gemessen werden, bestehen die A-Submatrizen aus Einsern und Nullen, während die V-Submatrizen aus den Umwandlungsverhältnissen (d.h. den Reziprokwerten der Wirkungsgrade) und Nullen bestehen, z.B. ist V_{rp} eine $\{m_r \times m_p\}$ -Matrix, die den Bedarf an Primärenergiequellen angibt, der von den Brennstoffverarbeitungs- und Brennstoffumwandlungsprozessen benötigt wird, um eine Einheit Energie in der Hauptabgabeform des Prozesses zu erzeugen.

Wir können hier keine Auflistung der für das Modell verwendeten Technologien geben, weil die Anzahl der einbezogenen Technologien und der einbezogenen Nachfragesektoren freigestellt ist und im Einzelfall verschieden sein kann. Das Modell hat jedoch einige wichtige Aspekte, die wir hier erwähnen wollen:

- Die Lastcharakteristik der elektrischen Heizung und der Fernheizung ist einbegriffen.
- Zur Behandlung verschiedener Umweltaspekte und Untersuchung des Potentials der Fernwärme in Abhängigkeit von verschiedenen Bevölkerungs- und Energiedichten wird die Endverwendungsnachfrage in eine kleine Anzahl von Bevölkerungsdichteklassen aufgeteilt.
- Eine kombinierte Produktion von Fernwärme und Elektrizität ist einbegriffen.

3.3.2. Verfügbarkeit der natürlichen Energiequellen

Im Hinblick auf die Verfügbarkeit der natürlichen Energiequellen geht das MESSAGE-Modell davon aus, daß die Kosten einer bestimmten

Energiequelle mit zunehmender Ausbeutung der Energiequelle steigen. Dieser Umstand wird durch eine Schrittfunktion mit einer optimalen Anzahl von Schritten, jeweils einem pro Kostenkategorie, dargestellt. Da die Kosten der Energiequelle in unserem Modell als Kosten an der Energieverbrauchsstelle ausgewiesen sind, enthalten die verschiedenen Kostenkategorien nicht nur Unterschiede im Hinblick auf die Ausbeutung einer Energiequelle, sondern auch die Kosten der geografischen Verfügbarkeit, d.h. unterschiedliche Transportkosten können berücksichtigt werden. Darüber hinaus können Kategorien von Energiequellen festgelegt werden, um Unterscheidungen zwischen verschiedenen Brennstoffqualitäten zu treffen, z.B. im Hinblick auf deren SO₂-Gehalt.

Somit nehmen die Gleichungen für den Verbrauch der Energiequellen folgende Form an:

$$(3) \quad \delta_t \sum_{\tau=1}^t r_{ij}(\tau) \leq s_{ij}(t) \quad i \leq m_r, j \leq n_r, t \leq n_t$$

wobei

$r_{ij}(t)$ der Jahresverbrauch der Inlands-Primärenergiequelle i der Energiequellenkategorie j ,

δ_t die Länge des Zeitraums in Jahren und

$s_{ij}(t)$ die Verfügbarkeit der Inlands-Primärenergiequelle i der Energiequellenkategorie j ist.

Die vorstehenden einschränkenden Bedingungen beziehen sich ausschließlich auf Inlandsenergiequellen. Darüber hinaus wird im Modell für jeden Brennstoff i eine Importkategorie festgelegt, jedoch mit Kosten, die sich im Verlauf der Zeit erhöhen (diese Annahme ist pragmatisch, aber es gibt keine technischen Gründe dafür, sie nicht abzuschwächen). Dies wird durch den Ausdruck $r_i^k(t)$ bezeichnet. Die „Gesamtverfügbarkeit“ eines importierten Brennstoffs i pro Zeitperiode wird durch den Ausdruck $s_i^k(t)$ angegeben.

$$(4) \quad \delta_t r_i^k(t) \leq s_i^k(t)$$

Im ersten Annäherungsversuch wird der Wert $s_i^k(t)$ mit einem Szenario-Ablauf geschätzt, aber diese erste Schätzung wird durch die iterative Wechselwirkung zwischen den Modellen der Modellfamilie des IIASA verfeinert.

3.3.3. Umweltgebundene Zwänge

Zwischen der Forderung, die vielen Aspekte des Energieversorgungsproblems, einschließlich der umweltgebundenen Zwänge, denen das Energieversorgungssystem unterliegt, in das Modell einzubeziehen,

und der Notwendigkeit, das Modell auf einen Umfang zu begrenzen, der sich noch handhaben läßt, muß ein Kompromiß geschlossen werden, der einige pragmatische Vereinfachungen erfordert. Wir beginnen damit, daß wir die Restemissionen gemäß ihrer Behandlung durch das Modell klassifizieren:

1. Toxische Emissionen in die Atmosphäre mit örtlichen Auswirkungen, einschließlich kurzlebiger radionuklearer Isotopen:
– SO_x, NO_x, CO-Anteile, Xe-133.
2. Emissionen relativ langlebiger radionuklearer Isotopen in die Atmosphäre und ins Wasser, deren Auswirkungen weltweit eintreten:
– H-3, Kr-85.
3. CO₂-Emissionen.
4. Berufsunfälle.
5. Sämtliche anderen, vorstehend nicht aufgeführten Restschäden.

Im normalen Betrieb der zentralisierten Technologien und Endverwendungstechnologien, die durch die Vektoren x bzw. u ausgedrückt sind, tritt eine Emission auf. Wenn man mit E_x und E_u Matrizen bezeichnet, die die Emissionen ausdrücken, die durch den Betrieb von Einheiten x und u verursacht werden, so kann man E_x und E_u entsprechend den fünf vorstehenden Schadensgruppen weiter unterteilen. Insbesondere im Falle der Gruppe 1, jedoch auch im Falle der Gruppe 5, ist die Emissionsart von beträchtlicher Bedeutung. Wir treffen eine Unterscheidung zwischen zentralisierten, industriellen und Flächenemissionen, so daß wir u in industrielle und andere Anwender unterteilen müssen: $\{u^2 : u^3\}$, wobei der Index 2 die industriellen Emissionsquellen und der Index 3 die Flächenemissionsquellen angibt (der Index 1 steht für die Umwandlung in zentralen Energiestationen).

Somit werden die jährlichen Gesamtemissionsraten durch folgenden Ausdruck gegeben:

$$\begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} e_1^{r1} \\ e_1^{r2} \\ e_1^{r3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{5x} & & \\ & E_{5u^2} & \\ & & E_{5u^3} \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} x^r \\ u^{r2} \\ u^{r3} \end{pmatrix} \\
 \\
 (5) \quad \begin{pmatrix} e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{2x} & E_{2u^2} & E_{2u^3} \\ E_{3x} & E_{3u^2} & E_{3u^3} \\ E_{4x} & E_{4u^2} & E_{4u^3} \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} x \\ u^2 \\ u^3 \end{pmatrix} \\
 \\
 \begin{pmatrix} e_5^1 \\ e_5^2 \\ e_5^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{5x} & & \\ & E_{5u^2} & \\ & & E_{5u^3} \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} x \\ u^2 \\ u^3 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

wobei

- e_1^{rs} Restemissionen der Gruppe 1 bei Bevölkerungsdichtenklasse r und Emissionstyp s ,
- e_2 relativ langlebige Radioisotopen,
- e_3 die CO₂-Emission,
- e_4 die Gesamtzahl der Berufsunfälle und
- e_5^s die Restemissionen der Gruppe 5 bei Emissionstyp s sind.

Auswirkungen der Gruppe 1

Die Emissionen der Gruppe 1 werden mit Hilfe eines einfachen Verdünnungsmodells, das die Konzentrationen in der Umgebungsluft berechnet, in Beziehung zu den einzelnen Bevölkerungsdichteklassen gesetzt. Wenn man zur Verdeutlichung den Index 1 fallen läßt, und wenn c^s der Vektor der städtischen Konzentrationen aufgrund der Emissionsquelle s ist,

d^s der Vektor der städtischen Verdünnungsfaktoren für die Emissionsquelle s ist, und

b ein Vektor ist, der die (ländlichen) Hintergrundkonzentrationen enthält,

dann wird die Gesamtkonzentration durch den Vektor q^r ausgedrückt:

$$(6) \quad q^r = b + \sum_{s=1}^3 c^{rs} = b + c^{r*}$$

und

$$(7) \quad c^{rs} = e^{rs} d^s$$

Wir gehen davon aus, daß man die Verteilung der Städte innerhalb einer Region mit Hilfe der Rang-Größen-Regel und die Bevölkerungsdichte in Städten durch eine negative Exponentialverteilung ausdrücken kann. Hierdurch wird es möglich, eine kleine Anzahl von Bevölkerungsdichteklassen pro Stadt festzulegen. Unter Verwendung der gleichen Schreibweise, jedoch mit Einführung eines tiefgestellten Index i zur Bezeichnung des Rangs der i -ten Stadt, und unter der weiteren Annahme, daß die Emissionen proportional zur Bevölkerungsdichte sind, können wir schreiben:

$$(8) \quad e_i^{rs} = e^{rs} \frac{p_i^r}{p^r} \quad \text{und} \quad c_i^{r*} = \sum_{s=1}^3 e_i^{rs} d^s$$

$$(9) \text{ Auswirkung} \quad r_i = \sum_{i \leq r} c_i^{r*} p_i^r + b^r p^r$$

wobei

b^r eine Funktion der Gesamtemissionen der Klasse r ist.

* gibt die Summe über den Index i an.

Auswirkungen der Gruppen 2 und 3

Der Aufbau an Radioisotopen und CO₂ in der Atmosphäre wird ausgedrückt durch:

$$(10) \quad \begin{pmatrix} m_2(t) \\ m_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_2 & 0 \\ 0 & \delta_t \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sum_{\tau=0}^t e_2(t-\tau) \\ \sum_{\tau=0}^t e_3(t-\tau) \end{pmatrix}$$

wobei

d_2 der Zerfallsfaktor während des Zeitraums δ_t ,

$m_2(t)$, $m_3(t)$ die Mengen der Schadstoffe 2 und 3 zum Zeitpunkt t sind.

Den Vektor $m_2(t)$ kann man nunmehr in Beziehung zu Verdünnungsfaktoren s_a , s_w für die Konzentration in der Atmosphäre in Bodenhöhe und die Konzentration an der Wasseroberfläche setzen.

Die Umweltauswirkungen (physikalisch ausgedrückt) kann man nunmehr wie folgt schreiben:

$$\text{Auswirkungen (Wasser)}_2 = s'_w m_2(t) \quad (\text{Ci/m}^3)$$

$$\text{Auswirkungen (Luft)}_2 = s'_a m_2(t) \quad (\text{Ci/m}^3)$$

$$\text{Auswirkungen}_3 = e_3(t) \quad (\text{Tonnen})$$

Auswirkungen der Gruppe 4

$$\text{Auswirkungen}_4 = e_4(t) \quad \text{Anzahl der Unfälle}$$

Auswirkungen der Gruppe 5

$$\text{Auswirkungen}_5 = e_5^s \quad (\text{Tonnen})$$

3.3.4. Bekämpfungstechnologien und Umweltzwänge

Die Bekämpfungstechnologien werden in das MESSAGE-Modell einbezogen, indem man für jede berücksichtigte Bekämpfungsmethode eine neue Energieumwandlungstechnologie definiert. Zum Beispiel definieren wir neben einem herkömmlichen Kohlekraftwerk auch ein Kohlekraftwerk mit Kalkwäsche. Es wird jeweils nur die aussichtsreichste Methode für die einzelnen herkömmlichen Energieumwandlungstechnologien in das MESSAGE-Modell einbezogen, so wie die neuen Technologien (oft mit niedrigeren Emissionsraten) z.B. Energieerzeugungsanlagen mit geschlossenem Umlauf.

Im allgemeinen kann man die vorstehend skizzierten Auswirkungen in nachstehender Form auf einen gewünschten Maximalwert (Norm) einengen oder sie mit geeigneter Wichtung in die Zielfunktion einbeziehen. Beide Möglichkeiten setzen schwerwiegende Werturteile voraus.

Da sich nicht einmal zwei Menschen über die Bewertung von Dingen wie z.B. den „Wert“ des menschlichen Lebens einigen können, besteht hier lediglich die Möglichkeit, im Umkreis des kostenoptimierten Mindestwerts eine umfangreiche Sensibilitätsanalyse durchzuführen. In dem Maße, wie die Umweltzwänge sich verschärfen (bzw. die Wichtungen in der zusammengesetzten Zielfunktion erhöht werden), werden entweder Bekämpfungstechnologien in die Lösung einbezogen, oder es ergibt sich eine Verschiebung von „schmutzigen“ zu „umweltfreundlichen“ Technologien.

3.3.5. Zusätzliche Zwänge

Die Beschreibung des MESSAGE-Modells wird mit zwei Gruppen von Gleichungen abgeschlossen:

a) Kapazitätswänge

Die Kapazität des einzelnen Energieumwandlungsprozesses wird durch die Summe der Kapazitätserweiterungen $y(t)$ in der Gegenwart und in früheren Perioden, die innerhalb eines Zeitintervalls liegen, das kürzer oder gleich der Lebensdauer m_t einer Energieerzeugungsanlage ist, bestimmt. Die tatsächliche Leistung des betreffenden Prozesses muß somit geringer oder gleich der Kapazität mal dem Lastfaktor sein.

Darüber hinaus muß für jede Nachfragekategorie zutreffen, daß die Gesamtkapazität, die zur Befriedigung der Nachfragekategorie zur Verfügung steht, größer als oder gleich der projektierten Nachfrage zuzüglich einer bestimmten Kapazitätsreserve ist.

b) Markteinführung

Um die Geschwindigkeit zu begrenzen, mit der eine neue Technologie eingeführt werden kann, und um ein allgemein kontinuierliches Bauvolumen sicherzustellen, verwenden wir Gleichungen, mit denen die während des Zeitraums (t) gebaute Kapazität auf einen Bereich beschränkt wird, der ungefähr der Bautätigkeit für die betreffende Technologie im vorangegangenen Zeitraum entspricht:

$$(11) \quad Y_1 y(t-1) \leq y(t) \leq Y_2 y(t-1) + g$$

wobei

g ein konstanter Vektor ist, der einer Einführungsperiode entspricht.

3.4. Erstellung des Modells

Operationell ist das MESSAGE-Modell in zwei Teile, MESSAGE I und MESSAGE II, unterteilt. Jeder Teil entspricht einem anderen Stadium des gesamten Modellsystems.

3.4.1. MESSAGE I

Die wichtigste Eigenschaft des Modells MESSAGE I besteht darin, daß die Endverwendungssektoren weggelassen sind. Ihre entsprechenden Kosten sind in der Zielfunktion nicht enthalten. Die Eingabewerte für Nachfrage beziehen sich auf Sekundärenergie, nämlich Elektrizität, gasförmigen und flüssigen Brennstoff sowie Kohle, anstelle von Grundenergie wie z.B. Raumheizung oder Prozeßwärme.

3.4.2. MESSAGE II

Parallel zu den Prüfläufen für das Modell MESSAGE I sind zur Zeit die Programmierung und die Datensammlung für das Modell MESSAGE II im Gange. Es ist beabsichtigt, das Modell MESSAGE I mit nationalen Daten durchzuprüfen, erstens um das Modell zu validieren und zweitens, um Erfahrungen für die Fertigstellung des endgültigen Modells zu sammeln. Die endgültige Version des MESSAGE-Modells soll Ende des Jahres fertiggestellt werden. Für das kommende Jahr ist die volle Integration in das gesamte Modellerstellungsvorhaben vorgesehen.

3.5. Grundfall-Rechnerläufe für die USA

Eine Auswahl einiger numerischer Ergebnisse des „Grundfalls“ für die USA unter Verwendung des Modells MESSAGE I wird nachstehend aufgeführt. Ein Rechnerlauf beschreibt eine mögliche Übergangsstrategie für den Übergang von unserem derzeitigen, (verhältnismäßig) nichtkapitalintensiven Energieversorgungssystem unter Verwendung billiger fossiler Brennstoffe auf kapitalintensivere Energiesysteme, die auf mehr oder weniger unbegrenzte Zeit große Energiemengen liefern können.

Der „Grundfall“ soll dabei als Bezugspunkt dienen, mit dem man die Ergebnisse alternativer Energiestrategien und Parameteränderungen vergleichen kann. (Diese Ergebnisse können wir in der vorliegenden Arbeit aus Platzmangel nicht aufführen.) Durch die Verwendung des Begriffs „Grundfall“ soll nicht ausgedrückt werden, daß dieses Szenario erwünschter oder wahrscheinlicher als ein anderes Szenario ist.

Tabelle 1:
Szenario-Charakteristik – „Grundfall“

„Grundfall“		
Energieumwandlungsprozeß		Kommerziell verfügbar ab (falls nicht schon im Jahre 1971)
– Elektrizität		
– Kohleverstromung		–
– Weiterentwickelte Kohleverstromung		1990
– Leichtwasserreaktor		–
– Schneller Flüssigmetall-Brutreaktor		1995
– Wasserkraft, Erdwärme, Wind		–
– Sonnenernergie		2000
– Gasturbinenkraftwerk		–
Brennstoffe		
– Rohölraffinerie		–
– Kohleverflüssigung		1995
– Elektrolytischer Wasserstoff		2000
– Kohlevergasung		1990
– Nukleare Kohlevergasung		nicht zutreffend
Energiesparmaßnahmen		
– Energiesparmaßnahmen für Gas		nicht zutreffend
– Energiesparmaßnahmen für Flüssigbrennstoff		nicht zutreffend
Energiequelle		
– Rohöl		
– Einheimische Energiequellenbasis		40 TW-Jahre
– Zunahme der Inlandsolproduktion		2%/Jahr bis maximal 1000 GW
– Verfügbarkeit von importiertem Öl		20 TW-Jahre
– Kosten des importierten Öls		14 US-Dollar/Barrel im Jahre 1975, um 2%/Jahr auf maximal 30 US-Dollar/Barrel steigend
– Kohle		
– Inlands-Energiequellenbasis		350 TW-Jahre
– Maximale Produktionssteigerung		5%/Jahr bis maximal 3000 GW
Erdgas		
– Inlands-Energiequellenbasis		33,3 TW-Jahre
Natürliche Uran- und Thoriumvorkommen		
– Inlands-Energiequellenbasis für Uran		9200-10 ³ Tonnen U ₃ O ₈
– Inlands-Energiequellenbasis für Thorium		nicht zutreffend
Energienachfrage		
– Energienachfrage-Szenario ¹⁾	1975	1985 Gigawatt-Jahre/Jahr
	2000	3082 Gigawatt-Jahre/Jahr
	2025	3777 Gigawatt-Jahre/Jahr
¹⁾ Exogen bestimmter Aktivitätswert		

3.6. Annahmen

Der „Grundfall“ beruht auf Annahmen, die nach unserer Auffassung im mittleren Bereich der Ungewißheit im Hinblick auf technischen Wirkungsgrad, Kosten, Verfügbarkeit von Energiequellen und Energienachfrage liegen. Die wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Als Ausgangspunkt gilt eine (niedrige) Energienachfrageprognose von 1975 bis 2025, die wir als „Nachfrageszenario 2“ bezeichnen. Während dieses Zeitraums erhöht sich der Gesamt-Endenergieverbrauch von 1985 Gigawattjahren/Jahr (593 Quads) auf 3777 Gigawattjahre/Jahr (1113 Quads) – eine Erhöhung von 90% oder 1,3% pro Jahr.

Um die möglichen Umweltfolgen, sozialen Folgen und weltweiten klimatischen Folgen einer zunehmenden Kohleverwendung zu berücksichtigen, wird für die Jahreskohleproduktion eine Obergrenze von 3000 Gigawattjahren/Jahr gesetzt. Dies ist etwa das 5,5-fache der amerikanischen Produktion des Jahres 1975.

Eine weitere wichtige Annahme, die für den „Grundfall“ gemacht wurde, betrifft die Verfügbarkeit des importierten Öls: Eine Obergrenze von 20 TW-Jahre (600 Quads) wird für die Menge des importierten Öls gesetzt, mit dessen Import aus anderen Ländern die USA rechnen dürfen.

Wenn die natürlichen Vorkommen an flüssigen und gasförmigen Brennstoffen erschöpft sind, ist am wahrscheinlichsten, daß die Nachfrage nach diesen Produkten durch synthetische Brennstoffe, die aus Kohle hergestellt werden, befriedigt wird. Die gesetzte Obergrenze für die Jahresproduktion an Kohle bedeutet jedoch, daß ein möglicher Ersatz für Synthesebrennstoffe auf Kohlebasis vorhanden sein sollte. Wasserstoff, der im Wege der Elektrolyse hergestellt wird, gilt als Ersatz für flüssige und gasförmige Brennstoffe.

3.7. Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt, die verschiedene wichtige Variablen zu den Zeitpunkten 1980, 2000 und 2025 zeigt. Eine kurze Besprechung der wichtigsten Feststellungen folgt.

3.7.1. Primärenergieverbrauch

Der Primärenergieverbrauch unter Zugrundelegung der Annahmen des „Grundfalls“ ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Entwicklung des Energieversorgungssystems fällt in zwei getrennte Phasen:

Tabelle 2:
Zusammenstellung der Ergebnisse für den „Grundfall“

„Grundfall“	1980	2000	2025
Primärenergieverbrauch (Gigawatt-Jahre/Jahr)	2817	4335	7513
– Kohle	201	1218	3000
– Rohöl			
– Inlandsöl	751	1000	284
– Importöl	484	596	0
– Erdgas	685	737	389
– Kernenergie			
– Hochtemperaturreaktor (Kohlevergasung)	n.zutr.	n.zutr.	n.zutr.
– Leichtwasserreaktor	143	697	1806
– Schnelle Brüter	n.zutr.	19	1941
– Sonnenenergie	n.zutr.	0	0
– Wasserkraft, Erdwärme usw.	53	67	94
Elektrizitätserzeugung (Gigawatt-Jahre/Jahr)	280	619	1475
– Kohleverstromung	177	283	20
– Verbesserte Kohleverstromung	n.zutr.	16	32
– Leichtwasserreaktoren	53	258	669
– Schnelle Brüter	n.zutr.	7	719
– Wasserkraft, Erdwärme usw.	20	25	35
– Sonnenenergie	n.zutr.	0	0
– Gasturbinen-Kraftwerke	9	28	0
– Andere	22	3	0
Produktion von synthetischen Brennstoffen (Gigawatt-Jahre)	–	48	1624
– Kohlevergasung	n.zutr.	23	281
– Kohleverflüssigung	n.zutr.	26	1118
– Elektrolytisch hergestellter Wasserstoff	n.zutr.	0	225
– Nukleare Kohlevergasung	n.zutr.	n.zutr.	n.zutr.
Kernbrennstoffe			
– Natürliches Uran (Tonnen/Jahr)	13	50	119
– Thorium (Tonnen/Jahr)	n.zutr.	n.zutr.	n.zutr.
– Plutoniumvorräte (Tonnen)	57	840	0
Energiesparmaßnahmen			
– Eingesparte Flüssigbrennstoffe	n.zutr.	n.zutr.	n.zutr.
– Eingesparte gasförmige Brennstoffe	n.zutr.	n.zutr.	n.zutr.

1975–2000: Der Verbrauch von Rohöl und Erdgas steigt weiter an, während die Leichtwasserreaktoren und die Kohleverstromung erweitert werden, um die zunehmende Nachfrage nach Elektrizität zu befriedigen.

2000–2025: Weiter steigende Nachfrage nach Elektrizität wird durch die Leichtwasserreaktoren und durch beschleunigte Einführung der Schnellen Brüter befriedigt. Die Leichtwasserreaktoren und Schnellen Brüter gemeinsam übernehmen den Elektrizitätsmarkt, während die Kohle zur Herstellung synthetischer Brennstoffe als Ersatz für Rohöl und Erdgas verwendet wird, wenn diese Energiequellen erschöpft sind.

Der gesetzte Höchstwert für die Kohleproduktion ist zu niedrig, um die Gesamtnachfrage nach flüssigen und gasförmigen Brennstoffen mit synthetischen Brennstoffen auf Kohlegrundlage zu befriedigen. Die Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse ist erforderlich, um die Bedarfslücke zu füllen.

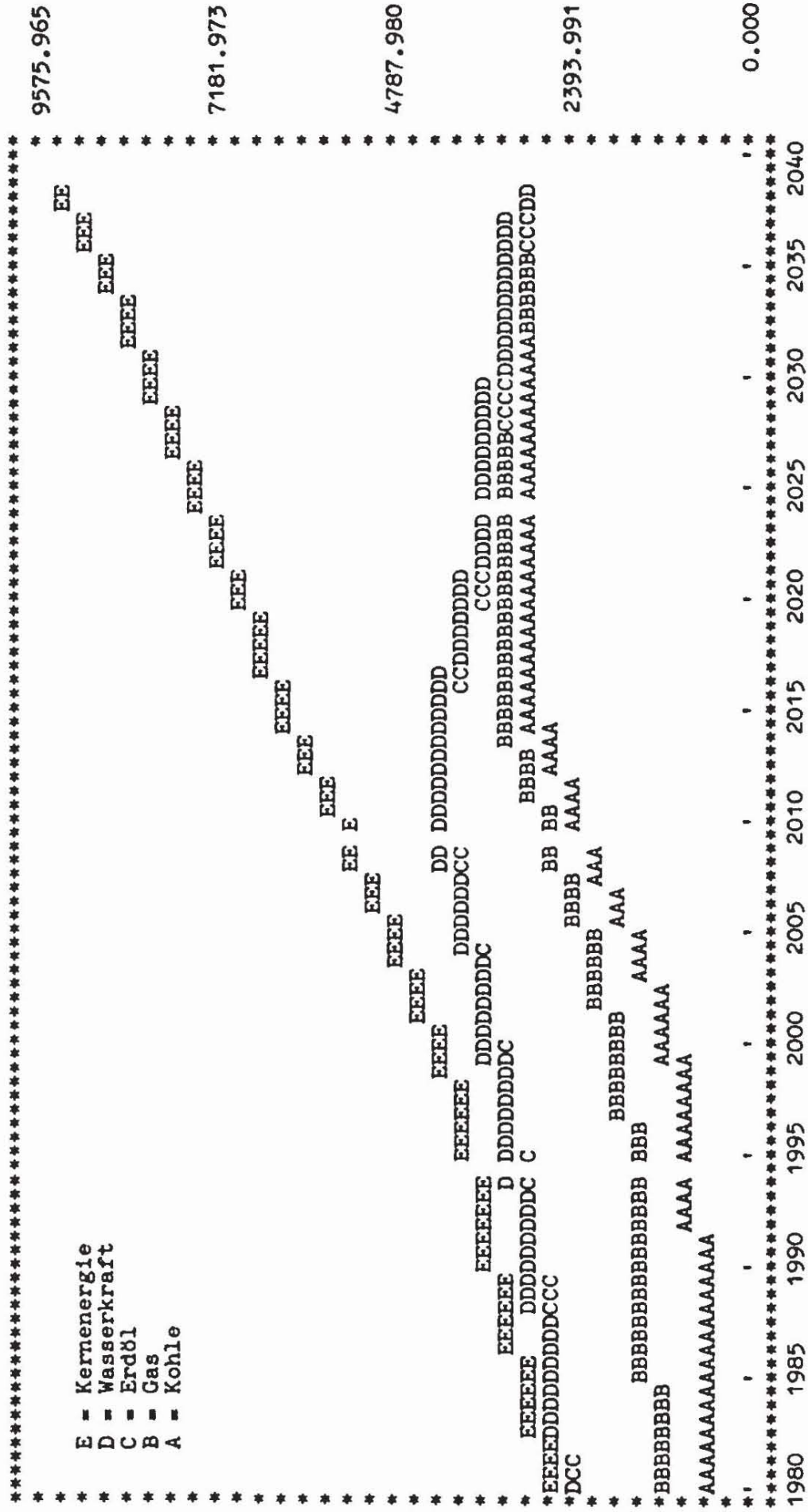
Der Primärenergieverbrauch nimmt auf 7513 Gigawatt-Jahre/Jahr zu – eine durchschnittliche Zuwachsrate von 2,2%, während die durchschnittliche Zuwachsrate der Endenergienachfrage (ein exogener Eingabewert) nur 1,3% beträgt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Nachfrage nach gasförmigen und flüssigen Brennstoffen in zunehmendem Umfang durch synthetische Brennstoffe befriedigt wird, bei denen der Wirkungsgrad der Produktion nur etwas über 50% liegt.

3.7.2. Der Schattenpreis der Endenergienachfrage

Die Abnahme des Gesamtwirkungsgrades des Energiesystems, insbesondere ab dem Jahre 2000, bedeutet, daß der Preis der Endenergie, insbesondere jedoch der flüssigen und gasförmigen Brennstoffe, mit der Zeit zunehmen wird, wenn zunächst die billigeren natürlichen Energiequellen erschöpft sind und sodann eine Verschiebung zugunsten der synthetischen Brennstoffe stattfindet. Dies geht aus Abbildung 4 und Abbildung 5 hervor, in denen die Entwicklung der Schattenpreise der Endenergienachfrage, wertberichtigt auf künftige Preise, aufgetragen ist*. Wie zu erwarten war, steigen die Schattenpreise für flüssige und gasförmige Brennstoffe sehr viel steiler an als die Elektrizitätspreise.

* Da die künftigen Kosten in der Zielfunktion abgeschrieben werden, entsprechen die doppelten Preisangaben für die Zwänge künftiger Zeitperioden dem derzeitigen Wert dieser Zwänge und nehmen im Verlauf der Zeit schnell ab. Um eine Vergleichbarkeit zu erreichen, werden die Schattenpreise mit dem Faktor $\frac{(1+d)^t}{(1+i)^t}$ multipliziert, wobei d der Abschreibungssatz und i die Länge der Zeitperiode t in Jahren ist.

Abbildung 3: Primärenergieverbrauch – „Grundfall“



Grundfall 6

Verwendung der primären Energiequellen (Gigawatt-Jahre/Jahr)

aufaddiert

<u>Jahr</u>	<u>Kohle</u>	<u>Gas</u>	<u>Erdöl</u>	<u>Wasserkraft</u>	<u>Kernenergie</u>
1980	700.715	1385.732	2620.836	2673.797	2816.079
1985	779.258	1491.770	2841.696	2897.164	3181.038
1990	815.095	1529.201	2976.400	3035.128	3548.277
1995	996.431	1736.126	3280.526	3343.247	3925.099
2000	1218.829	1955.652	3551.979	3619.403	4335.328
2005	1648.604	2311.008	3848.409	3921.226	4864.539
2010	2411.205	2696.004	4206.125	4285.875	5617.723
2015	3000.000	3466.983	4302.273	4387.801	6387.863
2020	3000.000	3408.955	3919.544	4009.698	6858.805
2025	3000.000	3388.704	3672.445	3766.066	7513.750
2030	3000.000	3345.421	3537.263	3633.196	8085.430
2035	3000.000	3258.855	3351.256	3448.345	8755.746
2040	3000.000	3055.724	3123.375	3220.464	9575.965

Maximalwert = 9575.96484

Minimalwert = 0.00000

Grundfall 6

Doppel-Preisstellung für Elektrizität - Sämtliche Lastbereiche, US-Dollar/kW-Jahre

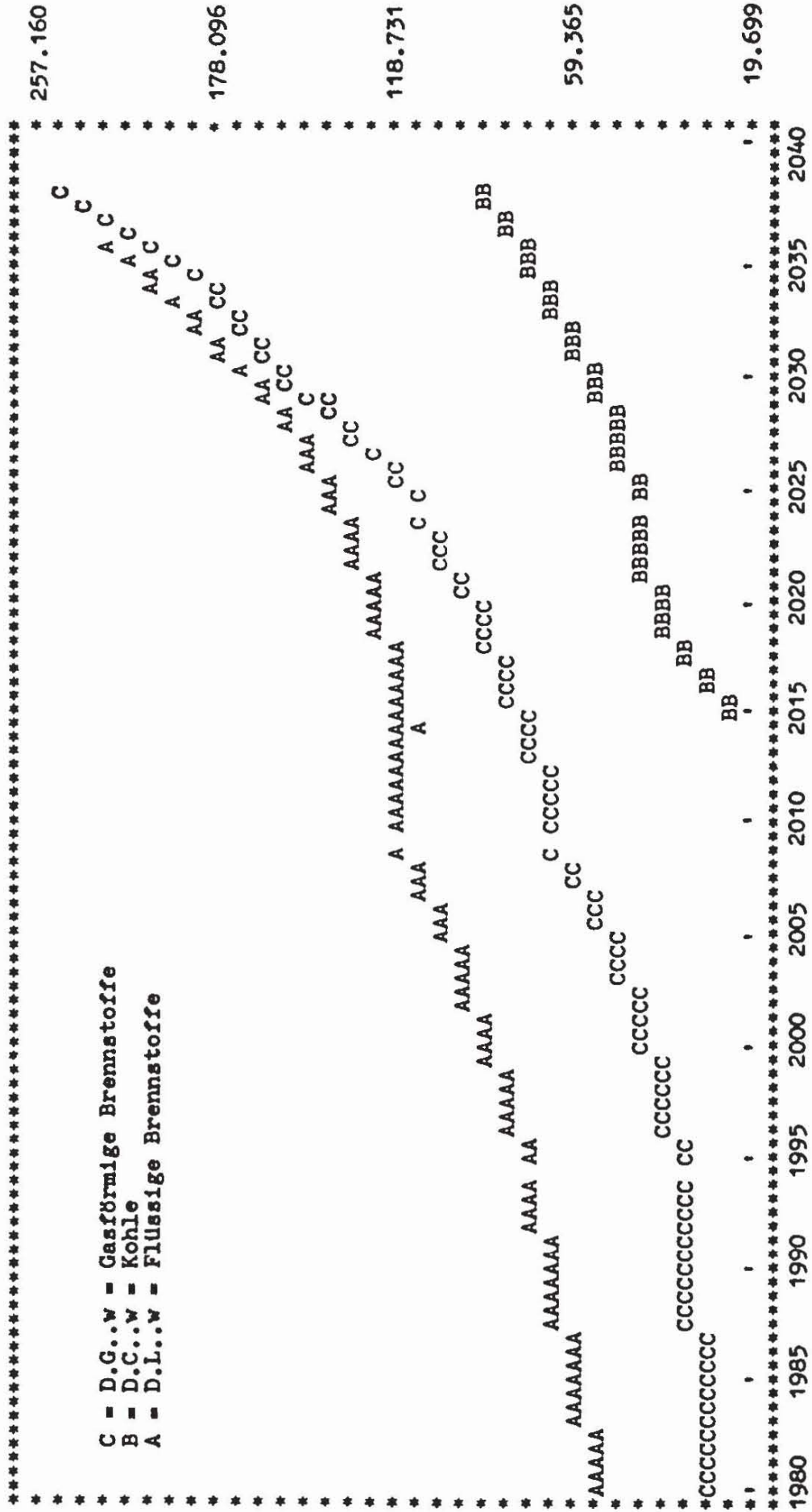
Absolutwerte

<u>Jahr</u>	<u>D.E.1w</u>	<u>D.E.2w</u>	<u>D.E.3w</u>
1980	221.959	136.553	70.170
1985	234.224	133.194	70.170
1990	237.242	125.196	70.169
1995	253.583	111.704	70.169
2000	317.987	80.932	70.169
2005	335.153	72.729	70.168
2010	328.594	116.594	70.168
2015	462.514	113.112	81.569
2020	374.941	159.733	120.530
2025	189.757	132.476	98.191
2030	219.418	149.519	127.210
2035	254.442	179.280	156.972
2040	213.459	213.459	191.151

Maximalwert = 462.51367

Minimalwert = 70.16806

Abbildung 5:
Die Doppel-Preisstellung für Energien außer Elektrizität – „Grundfall“



Grundfall 6

Doppel-Preisstellung für Energien außer Elektrizität, US-Dollar/kW-Jahre Absolutwerte

<u>Jahr</u>	<u>D.L..w</u>	<u>D.C..w</u>	<u>D.G..w</u>
1980	75.349	19.700	38.165
1985	82.138	19.700	40.057
1990	90.362	19.699	43.104
1995	99.643	19.699	48.011
2000	110.213	19.699	55.915
2005	122.761	19.699	68.644
2010	142.412	19.699	89.145
2015	138.302	23.785	98.108
2020	147.055	54.501	112.544
2025	161.152	62.204	135.792
2030	181.262	73.194	171.529
2035	216.381	92.384	204.332
2040	256.711	114.423	257.160

Maximalwert = 257.16040

Minimalwert = 19.69907

Zu Beginn der Planungsperiode liegt der Schattenpreis für Spitzenverbrauchsstrom um einen Faktor 3 höher als der Preis für Schwachlaststrom, aber am Ende der Planungsperiode ist der Preis für Spitzenstrom, Normalstrom und Schwachlaststrom fast identisch. Dies ist darauf zurückzuführen, daß zu Beginn der Planungsperiode keine Nachfrage nach der Überkapazität der Schwachlastregionen besteht, so daß der Schwachlaststrompreis fast konstant ist, und nur durch die variablen Brennstoffkosten und Betriebskosten bestimmt wird. Gegen Ende der Planungsperiode wird zunehmend Überkapazität zur Herstellung von Wasserstoff im Wege der Elektrolyse als Ersatz für flüssige und gasförmige Brennstoffe verwendet. Schließlich kann der Bedarf nach elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff nicht mehr ausschließlich durch Überkapazitäten befriedigt werden, und die doppelten Preise für Spitzenlaststrom und Schwachlaststrom konvergieren.

3.7.3. Die Elektrizitätsproduktion

Abbildung 6 zeigt die Elektrizitätsproduktion aufgegliedert nach Kraftwerkstypen. Die schnelle Einführung der Schnellen Brüter, die nach 1995 beginnt, wird nicht durch günstigere Stromherstellungskosten gegenüber dem Leichtwasserreaktor und der Kohleverstromung verursacht, sondern ergibt sich wegen der Obergrenze der Kohleförderung und der Erschöpfung der Uranvorkommen mit Kosten unter 60 US-Dollar pro engl. Pfund U_3O_8 . Nach dem Jahre 2020 wird die Zunahme der Kapazität an Schnellen Brütern durch die Verfügbarkeit des künstlich hergestellten Plutoniums begrenzt.

Im Jahre 2000 ist eine Leichtwasserreaktor-Kapazität von 345 GW installiert, während für die Schnellen Brüter zu diesem Zeitpunkt ein Höchstwert von 10 GW zugelassen ist. Nach diesem Zeitpunkt ändert sich das Bild sehr schnell: Die Kapazität der Schnellen Brüter nimmt bis zum Jahre 2020 mit der maximalen Zuwachsrate zu, die bei den vorliegenden Zwängen im Hinblick auf Markteinführung möglich ist. Bis zum Jahre 2025 ist die installierte Kapazität an Leichtwasserreaktoren auf 950 GW und an Schnellen Brütern auf 1020 GW gestiegen – d.h. Anteile von 37% bzw. 40% der gesamten Stromerzeugungskapazität.

Nur die Leichtwasserreaktoren, die Schnellen Brüter und die Wasserkraftwerke laufen in sämtlichen drei Lastbereichen mit voller Kapazität, und bis zum Jahre 2000 laufen sämtliche anderen Typen (Kohlekraftwerke und Gasturbinenanlagen) ausschließlich im Bereich des Spitzenlastbedarfs. Die Gesamtkapazität dieser Kraftwerkstypen beträgt 63% im Jahre 2000 und 37% im Jahre 2025, während die Gesamtproduktion sich nur auf 53% bzw. 6% des Gesamtwerts zu diesen Zeitpunkten beläuft.

3.7.4. Flüssigbrennstoffproduktion

Abbildung 7 zeigt, wie das Modell die Nachfrage nach Flüssigbrennstoff befriedigt. Die Erschöpfung der Rohölquellen erfordert eine schnelle Einführung von Kohleverflüssigungsanlagen, sobald diese 1995 kommerziell verfügbar werden. Aufgrund der Markteinführungszwänge kann dieser Übergang jedoch nicht ausschließlich durch Kohleverflüssigung bewerkstelligt werden – ein bestimmter Teil der Nachfrage nach Flüssigbrennstoffen muß durch Wasserstoff befriedigt werden. Nach einer anfänglichen schnellen Zunahme flacht sich die Herstellung von synthetischem Rohöl aus Kohle nach dem Jahre 2020 ab – die begrenzte Jahreskohleförderung muß mit den Anlagen geteilt werden, die synthetisches Gas herstellen – und weitere Zunahmen der Nachfrage nach Flüssigbrennstoff werden durch Wasserstoff befriedigt. Im Jahre 2000 werden 98% der Nachfrage nach Flüssigbrennstoff durch Rohöl befriedigt, aber bis zum Jahre 2025 ist dieser Anteil auf 16% gefallen und der Anteil von Wasserstoff auf 16% gestiegen.

3.7.5. Synthesegas- und Erdgasproduktion

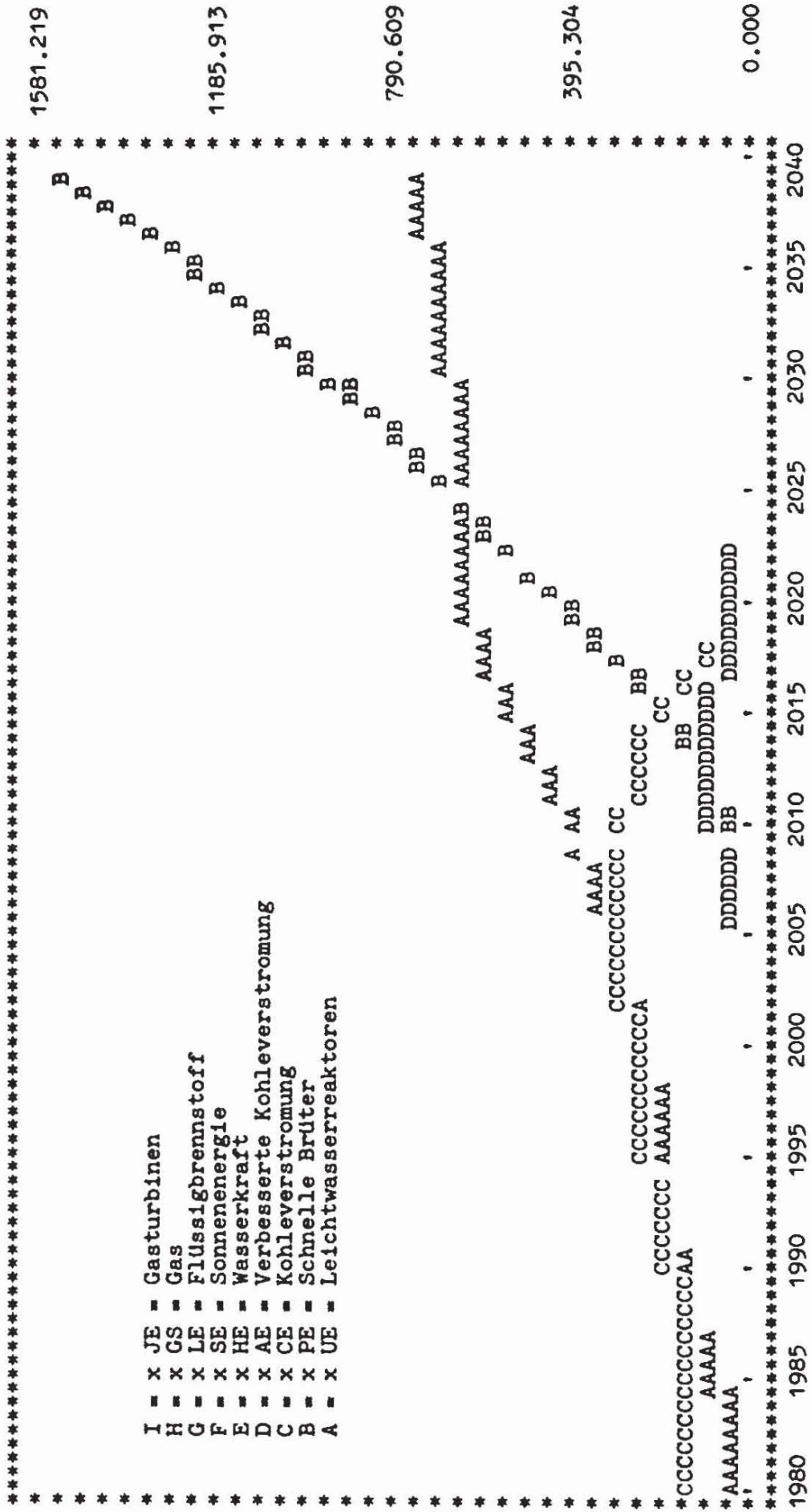
Die Entwicklung der Erdgas- und Synthesegasproduktion ist in Abbildung 8 gezeigt. Selbst im Jahre 2025 werden 58% der Nachfrage nach gasförmigen Brennstoffen mit Erdgas befriedigt, obwohl es zu diesem Zeitpunkt teurer als Synthesegas sein wird. Der Grund hierfür liegt wiederum in der Obergrenze der Kohleförderung.

3.7.6. Kapitalinvestitionen

Die Gesamtinvestitionen für Energieerzeugungs- und Energieumwandlungsanlagen ist in Abbildung 9 gezeigt. Das Investitionsniveau ist etwas uneben, und die durchschnittliche Zuwachsrate beträgt ca. 3,9% pro Jahr. Diese Zahl müßte mit der Zuwachsrate des Primärenergieverbrauchs (2,2%) und der Endenergienachfrage (1,3%) verglichen werden. Hieraus ist ersichtlich, daß sich das Verhältnis von Kapitalkaufwand zu Leistungsabgabe gegen Ende der fünfzigjährigen Planungsperiode um einen Faktor von 2,5 erhöht – dies trägt zu den anderen Faktoren bei, die eine Erhöhung des Schattenpreises der Endenergienachfrage verursachen.

Man darf jedoch nicht übersehen, daß in diesen Investitionen noch nicht die Kosten für Kapazitätserweiterungen bzw. Ersatz im Bereich Energietransport, Energieverteilung und Endverwendung der Energie enthalten sind. Zur Zeit belaufen sich die Kapitalinvestitionen für Transport, Verteilung und Endverwendung der Energie auf ca. 50% der Gesamtinvestitionskosten des Elektrizitätssektors und liegen bei vielen anderen Endverwendungen der Energie sogar noch höher.

Abbildung 6:
 Elektrizitätserzeugung nach Kraftwerkstypen – „Grundfall“



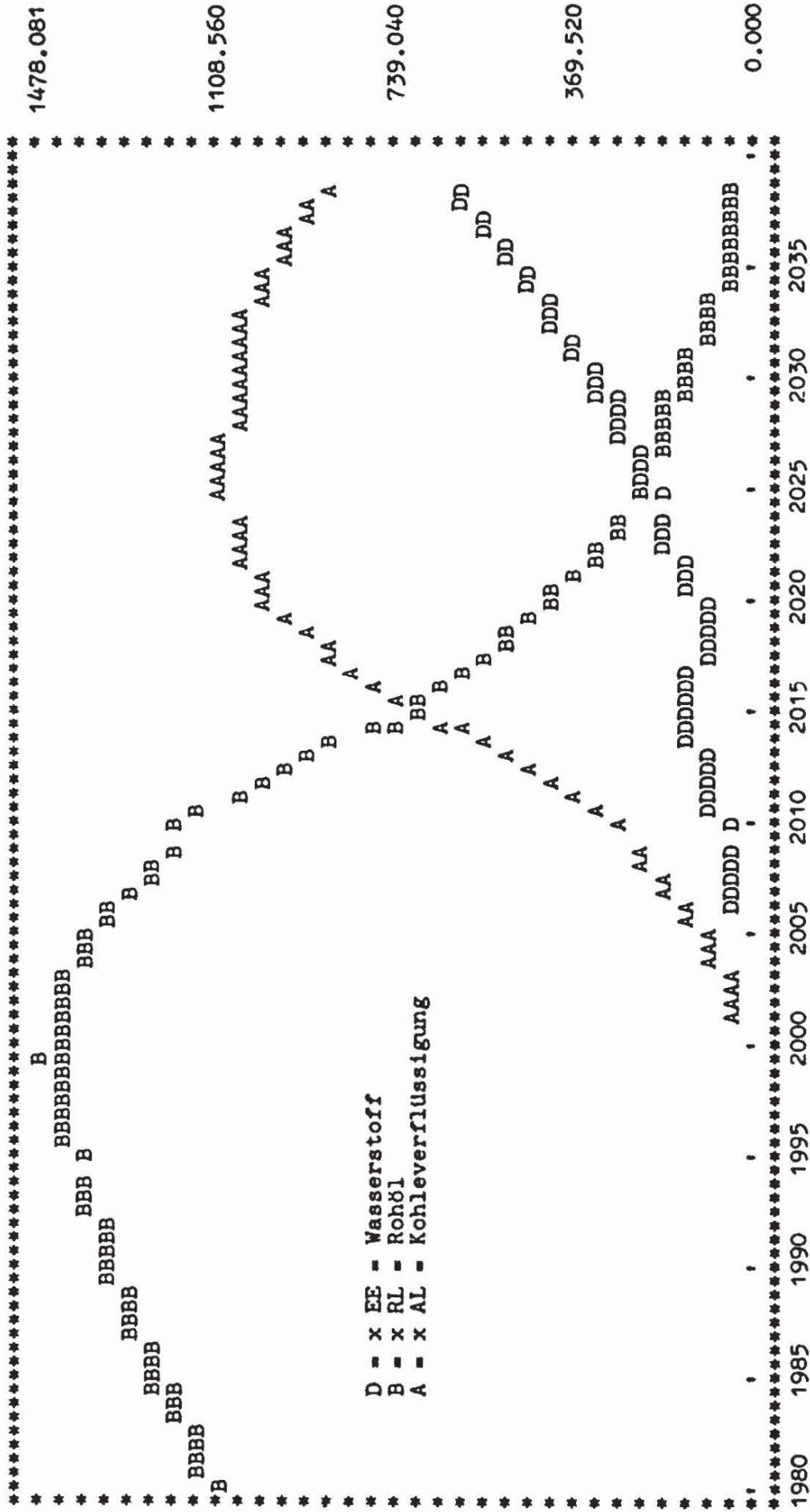
Grundfall 6Elektrizitätserzeugung - Summe sämtlicher Lastbereiche, Gigawatt-Jahre/Jahr (Leistung) Absolutwerte

<u>Jahr</u>	<u>x UE</u>	<u>x PE</u>	<u>x CE</u>	<u>x AE</u>	<u>x HE</u>	<u>x SE</u>	<u>x LE</u>	<u>x GE</u>	<u>x JE</u>
1980	53.030	0.000	176.601	0.000	19.615	0.000	5.043	16.829	8.883
1985	105.139	0.000	193.282	0.000	20.544	0.000	3.679	13.629	13.728
1990	190.055	0.000	196.808	0.000	21.751	0.000	0.000	3.346	18.040
1995	215.501	0.000	251.418	3.990	23.230	0.000	0.000	2.258	23.603
2000	258.129	7.030	283.074	15.960	24.972	0.000	1.326	1.143	28.305
2005	321.257	28.120	318.316	37.477	26.969	0.000	0.000	0.000	26.747
2010	415.948	77.330	302.647	103.740	29.538	0.000	0.000	0.000	22.776
2015	557.986	182.780	263.515	103.740	31.678	0.000	0.000	0.000	17.426
2020	654.516	400.710	49.010	92.857	33.390	0.000	0.000	0.000	0.000
2025	669.058	718.973	20.074	32.250	34.675	0.000	0.000	0.000	0.000
2030	690.872	958.105	6.984	28.380	35.531	0.000	0.000	0.000	0.000
2035	723.592	1242.113	0.000	8.246	35.959	0.000	0.000	0.000	0.000
2040	772.673	1581.219	0.000	0.000	35.959	0.000	0.000	0.000	0.000

Maximalwert = 1581.21851

Minimalwert = 0.00000

Abbildung 7:
Flüssigbrennstoffproduktion – „Grundfall“



Grundfall 6

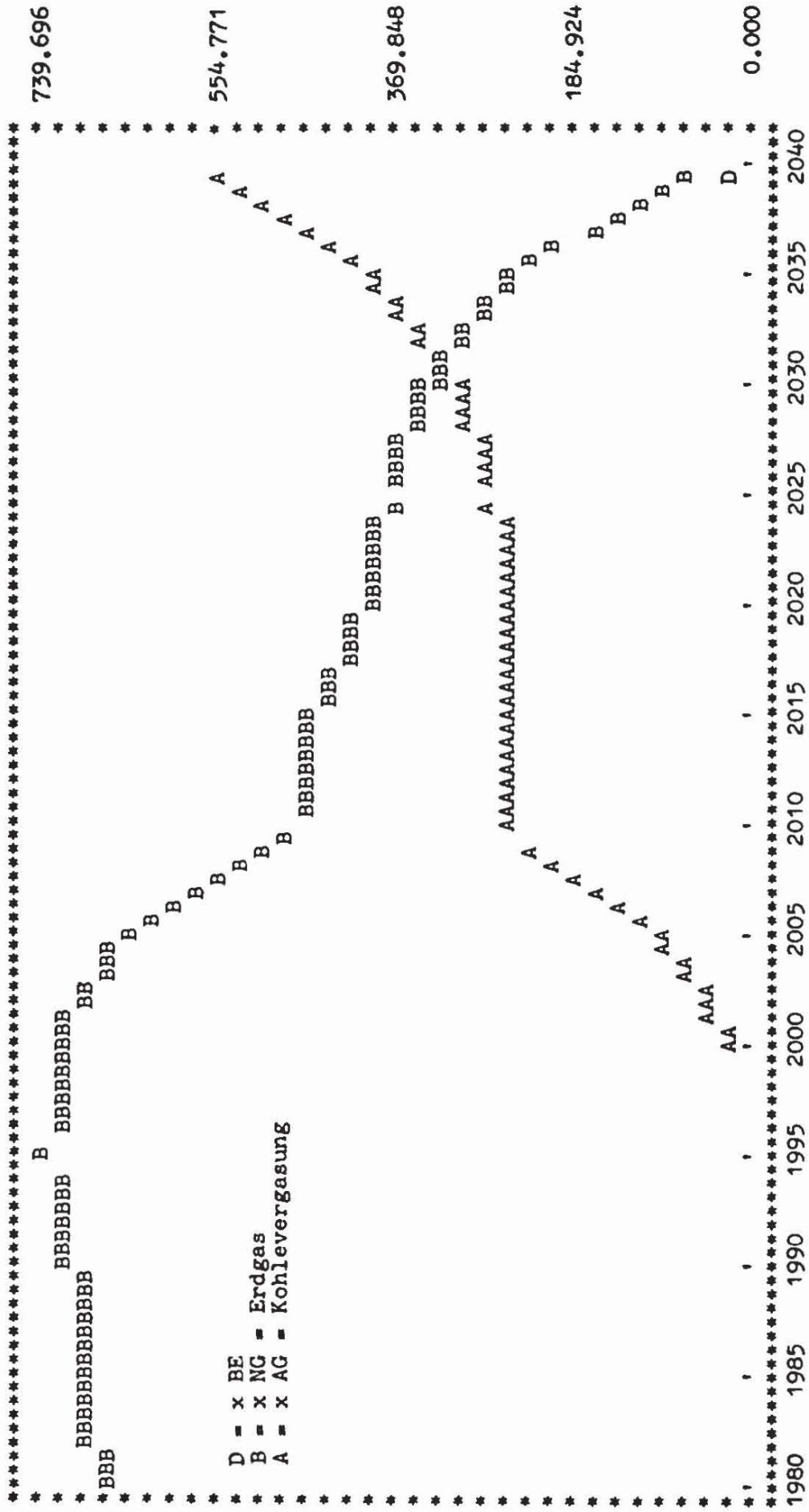
Flüssiggrenzstoffproduktion, Gigawatt-Jahre/Jahr Absolutwerte

<u>Jahr</u>	<u>x AL</u>	<u>x RL</u>	<u>x IL</u>	<u>x EE</u>
1980	0.000	1143.615	0.000	0.000
1985	0.000	1249.932	0.000	0.000
1990	0.000	1340.000	0.000	0.000
1995	0.000	1430.000	0.000	0.000
2000	25.500	1479.081	0.000	0.000
2005	102.000	1423.520	0.000	24.480
2010	280.500	1213.076	0.000	86.424
2015	663.000	773.419	0.000	158.580
2020	1008.179	472.767	0.000	119.054
2025	1117.674	262.723	0.000	224.603
2030	1101.968	177.632	0.000	330.400
2035	1054.942	85.557	0.000	474.501
2040	892.570	62.640	0.000	664.789

Maximalwert = 1478.08057

Minimalwert = 0.00000

Abbildung 8:
Erdgas- und Synthesegasproduktion – „Grundfall“



Grundfall 6

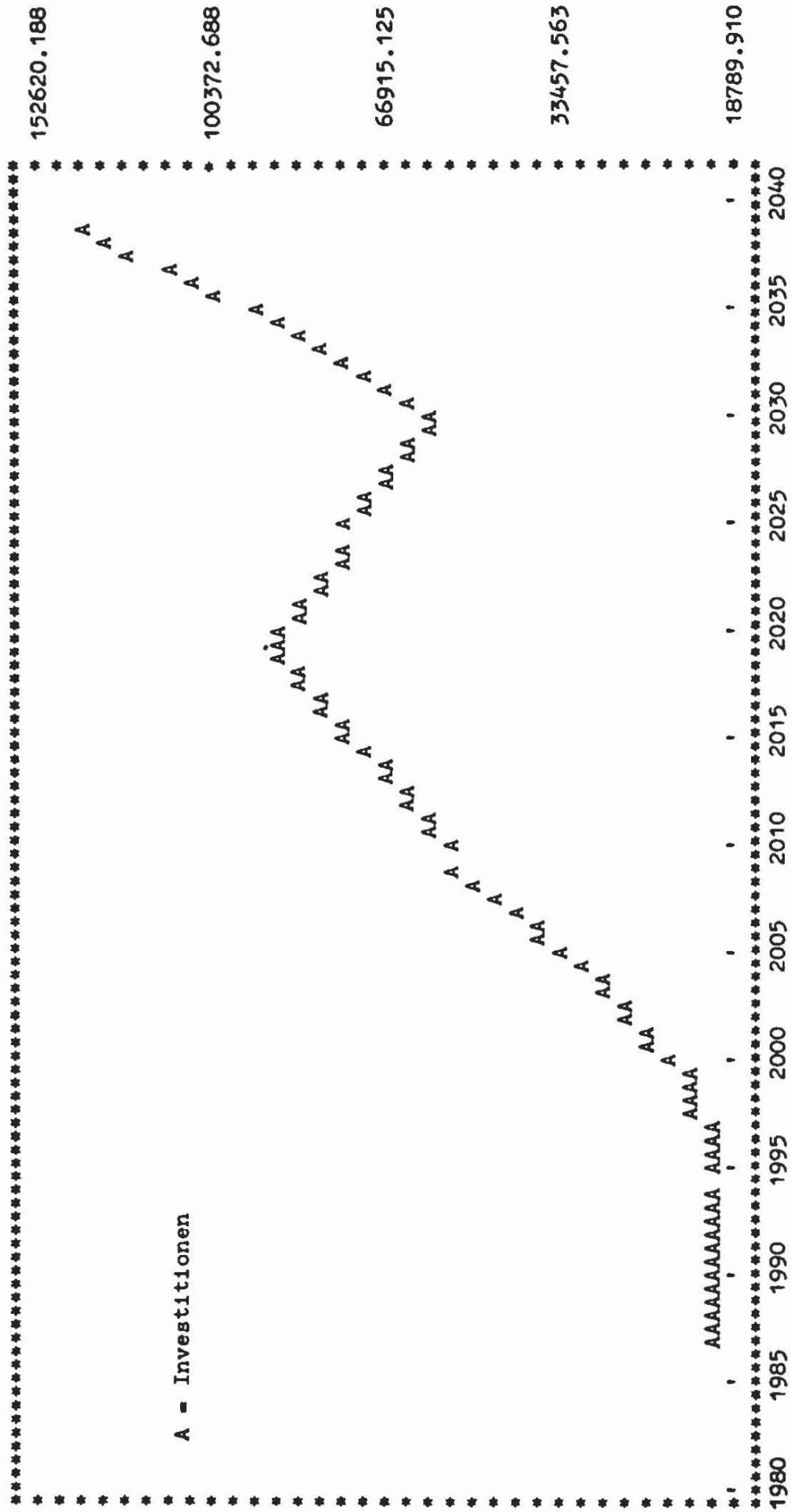
Gasproduktion, Gigawatt-Jahre/Jahr, Leistungsabgabe Absolutwerte

<u>Jahr</u>	<u>x AG</u>	<u>x NG</u>	<u>x IG</u>	<u>x BE</u>
1980	0.000	685.017	0.000	0.000
1985	0.000	712.512	0.000	0.000
1990	0.000	714.105	0.000	0.000
1995	0.000	739.696	0.000	0.000
2000	22.721	736.822	0.000	0.000
2005	93.662	662.405	0.000	0.000
2010	261.044	484.799	0.000	0.000
2015	261.044	460.993	0.000	0.000
2020	261.044	408.955	0.000	0.000
2025	281.296	388.704	0.000	0.000
2030	324.579	345.421	0.000	0.000
2035	411.145	258.855	0.000	0.000
2040	584.276	55.724	0.000	30.000

Maximalwert = 739.69536

Minimalwert = 0.00000

Abbildung 9:
Gesamtinvestitionen – „Grundfall“



Grundfall 6

Kapitalinvestitionen, Mio. US-Dollar pro Jahr Absolutwerte

Jahr Investitionen

1980	18789.010
1985	20153.352
1990	25873.637
1995	23483.750
2000	30911.332
2005	50073.605
2010	76645.125
2015	91927.938
2020	110039.938
2025	94089.813
2030	77481.813
2035	108725.625
2040	152620.188

Maximalwert = 152620.18750

Minimalwert = 18789.91016