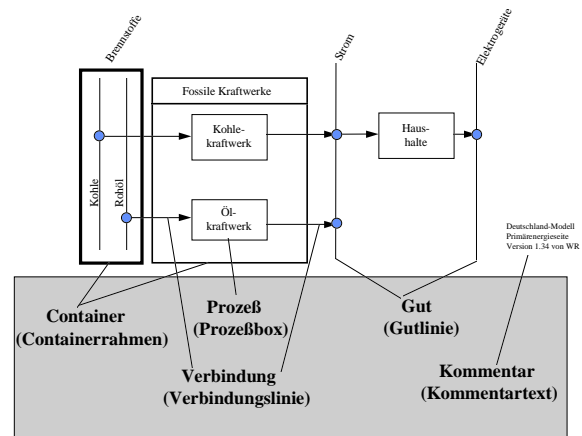


Forschungsbericht

Einbindung des  
ECOLOG-Modells  
'E<sup>3</sup>Net' und  
Integration neuer  
methodischer Ansätze  
in das *IKARUS*-  
Instrumentarium  
(*ECOLOG II*)



P. Schaumann, M. Blesl,  
C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner,  
E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig,  
A. Stuible, A. Voß



**Einbindung des ECOLOG-Modells '*E<sup>3</sup>Net*' und Integration  
neuer methodischer Ansätze in das *IKARUS*-Instrumentarium  
(*ECOLOG II*)**

Projekt gefördert vom  
Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner,  
E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuible, A. Voß

Juli 1998

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. A. Voß

**ISSN 0938-1228**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0329632A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

---

## Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Das <i>MESAP</i> -Konzept	3
1.3 Das Referenzenergiesystem als Modellbildungsschema	5
1.4 Das <i>MESAP</i> -Datenbanksystem <i>NetWork</i>	6
1.5 Schnittstelle zwischen <i>NetWork</i> und Rechenmodulen	8
1.6 Ziele des Forschungsvorhabens	9
2 Integration von $E^3Net$ in das <i>IKARUS</i> -Instrumentarium	11
2.1 Problemstellung und Zielsetzung	11
2.2 Kopplung der FIZ-Technik-DB an <i>NetWork</i>	12
2.2.1 Spezifikation eines Konvertierungs-Algorithmus	13
2.2.2 Softwaretechnische Umsetzung: <i>SQL-Link</i>	15
2.3 Verbindung der FIZ-LP-DB mit <i>NetWork</i>	17
2.4 Von der FIZ-LP-DB nach <i>NetWork</i> : Case Study „ <i>IKARUS-LP</i> “	19
2.5 Verbindung des <i>IKARUS-LP</i> -Modells mit $E^3Net$	22
2.5.1 Verbindung von $E^3Net$ zu <i>NetWork</i> : $E^3X/RImp$	23
2.5.2 Abstimmungsnotwendigkeiten zwischen den <i>IKARUS-LP</i> -Datenbanken	25
2.6 Fazit	25
3 Nichtlineare und makroökonomische Erweiterungen von $E^3Net$	27
3.1 Problemstellung und Zielsetzung	27
3.2 Methodische Grundlagen nichtlinearer Modellansätze	28
3.2.1 Linearer prozeßtechnischer Ansatz der Energiesystemmodelle	28
3.2.2 Partialanalytischer Gleichgewichtsansatz	31
3.2.3 Intertemporaler Gleichgewichtsansatz in der Energiewirtschaft	33

3.2.4 Lösungsverfahren nichtlinearer Optimierungsprobleme	37
3.3 Rahmendaten und Definition der Szenarien	38
3.4 Ergebnisse der Fallstudie für Deutschland	40
3.4.1 Treibhausgasminderungsstrategien in Energiesystemmodellen	40
3.4.2 Auswirkungen preiselastischer Nachfrageänderungen	42
3.4.3 Gesamtwirtschaftliche Rückwirkungen	45
3.5 Fazit	47
4 Entwicklung und Anwendung eines multisektoralen Energiewirtschaftsmodells	50
4.1 Problemstellung und Zielsetzung	50
4.2 Wirtschaftstheoretische Grundlage der Modellformulierung	50
4.3 Wahl des mathematischen Formats zur Modellimplementierung	53
4.4 Allgemeine Modellcharakteristika	53
4.5 Modellparametrisierung durch Kalibrierung	55
4.6 Erstellung einer Datengrundlage	55
4.7 Fazit	61
5 Entwicklung eines Simulationsansatzes für Energiesystemmodelle	64
5.1 Problemstellung und Zielsetzung	64
5.2 Konzeption von <i>PlaNet</i>	64
5.3 Das Modul <i>PlaNet-Flow</i> zur Simulation der Flüsse des Energiesystems	68
5.4 Das Modul <i>PlaNet-Cost</i> zur Berechnung der Kosten des Energiesystems	69
5.5 Der <i>Case-Manager</i> als Werkzeug für das Szenariomanagement	70
5.6 Modellierung des Verkehrssektors in Deutschland	72
5.7 Fazit	75
6 Erweiterungen der Analysemöglichkeiten von <i>NetWork</i>	78

---

6.1 Problemstellung und Zielsetzung	78
6.2 Die methodische Konzeption graphischer Modellbildung	79
6.3 Graphentheorie und Referenzenergiesystem	79
6.4 Softwaretechnische Umsetzung	84
6.5 Analysemöglichkeiten mit Hilfe des Netzwerkeditors	87
6.5.1 Überprüfung der Konsistenz einer RES-Definition	87
6.5.2 Auswertung der Ergebnisse von Optimierungs- und Simulationsläufen	87
6.6 Fazit	88
7 Schlußbetrachtung	90
Literaturverzeichnis	91





## Kurzfassung

Ziel des Forschungsvorhabens „Einbindung des *ECOLOG*-Modells ‘*E<sup>3</sup>Net*’ und Integration neuer methodischer Ansätze in das *IKARUS*-Instrumentarium (*ECOLOG II*)“ war es, verschiedene Modellbildungsansätze und Werkzeuge für die energiewirtschaftliche Analyse zu einem Instrumentarium zusammenzufügen. Dazu wurde auf die Projekte *IKARUS* „Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien“ und *ECOLOG* „Entwicklung eines Computermodells mit linearer Optimierung zur Abbildung eines regionalisierten Energiesystems am Beispiel Gesamtdeutschlands“ aufgebaut.

Das Projekt *ECOLOG II* umfaßt Weiterentwicklungen in den folgenden sechs Aufgabenbereichen: (1) Integration von *E<sup>3</sup>Net* in das *IKARUS*-Instrumentarium; (2) Nichtlineare Modellansätze für *E<sup>3</sup>Net*; (3) Makroökonomische Erweiterung von *E<sup>3</sup>Net*; (4) Entwicklung und Anwendung eines multisektoralen Energiewirtschaftsmodells *NEWAGE*; (5) Entwicklung eines Simulationsansatzes für Energiesystemmodelle *PlaNet*; (6) Erweiterung der Analysemöglichkeiten von *NetWork*.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden eine Kopplung der FIZ-Technik-Datenbank an die Datenbank *NetWork*, eine Verbindung der FIZ-LP-Datenbank mit *NetWork*, eine Überführung des *IKARUS-LP*-Datensatzes in eine Fallstudie für das optimierende Energiesystemmodell *E<sup>3</sup>Net*, ein optimierendes Energiesystemmodell mit preiselastischer Nachfrage *E<sup>3</sup>Micro*, ein Gleichgewichtsmodell *NEWAGE*, das prototypisch ein prozeßtechnisches Energieversorgungsmodell in ein übergeordnetes gesamtwirtschaftliches Modell integriert, ein Simulationsmodell *PlaNet* sowie ein *Netzwerkdesigner und -analyst* (NDA) realisiert und durch exemplarische Fallstudien, die im Kontext des *IKARUS*-Instrumentariums stehen, getestet.

**Abstract**

Aim of the research project „The linking of the *ECOLOG*-model ‘*E<sup>3</sup>Net*’ to the *IKARUS* instrument and the integration of new methodological approaches (*ECOLOG II*)“ was the integration of different modeling approaches and tools for energy-economic analysis in one instrument. The results of this research project are based on the *IKARUS* and *ECOLOG* projects. *IKARUS* stands for „Instruments for climate gas reduction strategies“ and *ECOLOG* means „Development of a linear optimization model to model regional energy systems applied to the example of Germany“.

In *ECOLOG II* enhancements in the following areas were introduced: (1) Integration of *E<sup>3</sup>Net* in the *IKARUS* instrument; (2) Introducing nonlinear modeling approaches in *E<sup>3</sup>Net*; (3) Macro-economic extension of *E<sup>3</sup>Net*; (4) Development and application of the multi sector energy economy model *NEWAGE*; (5) Development of a simulation model for energy systems analysis *PlaNet*; (6) Extension of the analytical features of *NetWork*.

In the framework of the *ECOLOG II* research project, the following goals were achieved: linking the FIZ-Technology database to *NetWork*, connecting the FIZ-LP database with *NetWork*, transforming the *IKARUS* LP data into a case study for the energy systems optimization model *E<sup>3</sup>Net*, developing an energy systems model with price-elastic demand (*E<sup>3</sup>Micro*), developing an equilibrium model *E<sup>3</sup>Macro* which combines a detailed technology description and a macro economic part, realizing a prototype of the general equilibrium model *NEWAGE*, in which a technology-oriented energy supply model was integrated into a general equilibrium model, realizing the simulation model *PlaNet*, developing the network designer and analyst (*NDA*), and testing these modules with case studies of the *IKARUS* project.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Energiepolitisches Handeln ist, ebenso wie jede unternehmerische Entscheidung in der Energiewirtschaft, eingebettet in ein komplexes Spannungsfeld von wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Interessen sowie technischen und ökologischen Randbedingungen. Neben der Notwendigkeit der Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflußfaktoren und von konfliktären Zielen werden die Entscheidungen in der Energiewirtschaft und Energiepolitik zusätzlich dadurch erschwert, daß die Zeiträume betreffen, die eher in Jahrzehnten als in Jahren zu messen sind. Handlungsmöglichkeiten im Bereich des aktiven Klimaschutzes, wie sie in der Vergangenheit vermehrt diskutiert werden, sind hiervon insbesondere betroffen. Änderungen von komplexen Energieversorgungsstrukturen bedürfen im allgemeinen Jahrzehnte, bevor sie wirksam werden - der Bau von Großkraftwerken dauert etwa 5 bis 10 Jahre. Hinzu kommt, daß diese Anlagen dann in der Regel mehrere Jahrzehnte in Betrieb sind und so die Strukturen in der Energiewirtschaft weit in die Zukunft mitbestimmen.

Komplexität und Langfristigkeit, und damit natürlich auch Unsicherheit, sind also wesentliche Charakteristika energiewirtschaftlicher und energiepolitischer Entscheidungen. Ziel der systematischen Zukunftsanalyse ist es, weit in die Zukunft reichende Entwicklungen hinsichtlich ihrer Gestaltungs- und Beeinflussungsmöglichkeiten zu analysieren, um Rückschlüsse auf die heute zu treffenden Entscheidungen zu ziehen. Dabei wird weder die Vergangenheit fort-, noch die Zukunft normativ festgeschrieben, sondern unter Berücksichtigung der vielfältigen Unsicherheiten werden mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiesystems analysiert, um Handlungsnotwendigkeiten abzuleiten und Handlungsspielräume aufzuzeigen.

Ein wesentlicher Teil einer derartigen systematischen Zukunftsanalyse ist dabei die Identifizierung sogenannter „robuster nächster Schritte“, worunter diejenigen Entscheidungen zu verstehen sind, die sich über einen weiten Unsicherheitsbereich der Einflußfaktoren, z. B. der Energiepreisentwicklung, heute als notwendig und richtig erweisen. Robuste Entscheidungen zeichnen sich damit gerade dadurch aus, daß sie einer genauen Kenntnis der Zukunft nicht bedürfen, sondern für ein Spektrum der Entwicklung unsicherer Bestimmungsfaktoren immer richtig sind. Die Identifizierung robuster Schritte erfolgt dabei naturgemäß nur im Hinblick auf die explizit behandelten Ziele und erfaßten Unsicherheiten. Ob anderen außerhalb der Analyse liegenden Kriterien genüge getan wird, ist dabei nicht zu beantworten.

Eine weitere wichtige Aufgabe der systematischen Zukunftsanalyse ist es, die Konsequenzen sowie die Vor- und Nachteile von Entscheidungs- und

Handlungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Erreichung sowohl energiepolitischer und als auch umweltpolitischer Ziele aufzuzeigen. Hierzu gehört z. B. die Analyse effizienter Wege und Strategien zur Minderung der energiebedingten Umweltbelastung. Dabei wird in der Regel die Szenariotechnik verwendet.

Im Rahmen einer systematischen Zukunftsanalyse kommt der Anwendung von komplexen, problemadäquaten Instrumenten eine besondere Bedeutung zu, da mit dem realen System Experimente nicht durchgeführt werden können oder sollten. Modelle, die das komplexe Energiesystem, seine Struktur und sein Verhalten, im Sinne der Fragestellung als vereinfachtes Abbild der Realität darstellen, sind bei einer sachgerechten Nutzung besonders geeignet, entscheidungsrelevante Informationen über die Konsequenzen von Entscheidungen, über die Erreichung energiepolitischer Ziele und die Auswirkungen von unsicheren Einflußfaktoren und Randbedingungen zu generieren.

Modelle, die das komplexe Energiesystem und seine Wechselwirkungen mit der Umwelt vereinfachend darstellen, sind bei einer sachgerechten Nutzung besonders geeignet, Informationen über die Erreichung energiepolitischer Ziele und über Auswirkungen unsicherer Einflüsse bereitzustellen. Das *IKARUS*-Instrumentarium, das im Rahmen des Projektes *IKARUS* „Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien“ /FIZ 1997/ entwickelt wurde, dient dazu, in einer bisher noch nicht erreichten Informationstiefe Strategien zur Reduktion von Klimagasemissionen - insbesondere CO<sub>2</sub> - in Hinblick auf ökologische, ökonomische und energietechnische Konsequenzen zu analysieren und vergleichend zu bewerten. Das Instrumentarium besteht im wesentlichen aus mehreren Computermodellen und einer Technologie-Datenbank. Zur Analyse nationaler Klimagasreduktionsstrategien wurde ein Optimierungsmodell entwickelt (*IKARUS-LP*), mit dem in der Vergangenheit Auswirkungen einer zielorientierten CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie untersucht wurden. Das Optimierungsmodell bildet das Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland in Form vernetzter Prozesse ab. Dabei werden die Vielzahl der Optionen für verschiedene Techniken, die zugehörigen bezogenen Emissionen, die individuellen Kosten sowie mögliche Vernetzungen der Energieflüsse erfaßt. Neben ökonomischen und technischen Daten werden relevante energiepolitische Rahmenbedingungen berücksichtigt. Basisjahr des Referenzdatensatzes des Optimierungsmodelles ist das Jahr 1989, Analysen können für die Jahre 2005 (getrennt nach Ost- und Westdeutschland) und 2020 (ohne regionale Auflösung) durchgeführt werden.

*E<sup>3</sup>Net*, das im Rahmen des Projektes *ECOLOG* „Entwicklung eines Computermodells mit linearer Optimierung zur Abbildung eines regionalisierten Energiesystems am Beispiel Gesamtdeutschlands“ /Schaumann, Schweicke 1995/ entwickelt wurde, stellt eine Weiterentwicklung des Energiemodells EFOM-ENV dar. Das Energiesystemmodell *E<sup>3</sup>Net* bildet das gesamte Energiesystem in Abhängigkeit von der vorzugebenden Nachfrage nach Nutzenergie bzw. Energiedienstleistungen bis zur Primärenergie ab und dient zur Analyse der

Entwicklung des Energiesystems unter vorzugebenden Rahmenbedingungen. Es eignet sich aufgrund seiner flexiblen Struktur zur Untersuchung kommunaler, regionaler, nationaler und multinationaler Energiesysteme. Diese Flexibilität wird durch die Konzeption der Datenbank *NetWork* erreicht, in der alle für prozeßtechnische Modelle erforderlichen Daten abgespeichert werden können. *E<sup>3</sup>Net* ist in das *MESAP*-Instrumentarium eingebunden.

## 1.2 Das *MESAP*-Konzept

Während Planungsinstrumente zur Simulation großer Energiesysteme bis heute eine große Vielfalt und einen hohen Qualitätsstandard hinsichtlich der *wissenschaftlichen* Methoden erreicht haben, sind im Bereich der Datenverwaltung noch Defizite zu verzeichnen. Obwohl neue Instrumente inzwischen relationale Datenbanken statt Textdateien zur Datenverwaltung einsetzen, erschweren unterschiedliche Datenstrukturen die Integration verschiedener Instrumente erheblich. Da die Instrumente nur auf ihre eigenen Datenbanken zugreifen können, sind die Daten abgeschirmt und eine Koppelung verschiedener Instrumente wird unnötig erschwert. Der Benutzer legt sich mit der Auswahl eines Instruments automatisch auf ein Datenformat fest - und damit auf eine einzige Analysemethode. Auch die Transparenz der Analyse leidet, denn es erfordert viel Erfahrung, die verschiedenen, oft sehr komplexen Datenformate kennenzulernen und mit ihnen zu arbeiten. Jedes Instrument erfordert von neuem diese Einarbeitung. Der Zugriff auf gespeicherte Informationen und damit eine Überprüfung der Daten ist für ungeübte Benutzer nahezu unmöglich, denn es gibt keine Retrieval-funktionen, wie sie z. B. Informationssysteme bieten.

Der Umfang der Datenbanken ist in der Regel auf die für das Modell notwendigen Daten und Berechnungsergebnisse beschränkt. Andere Daten, wie Planungsziele, historische oder allgemeine statistische Daten können nicht gespeichert werden. Eine Fallstudie kann daher nicht vollständig dokumentiert werden. Um die Planung zu vervollständigen oder um die Datenbasis systematisch weiterzuführen, muß neben der Datenbank des Instruments ein zusätzliches Informationssystem eingeführt und gepflegt werden.

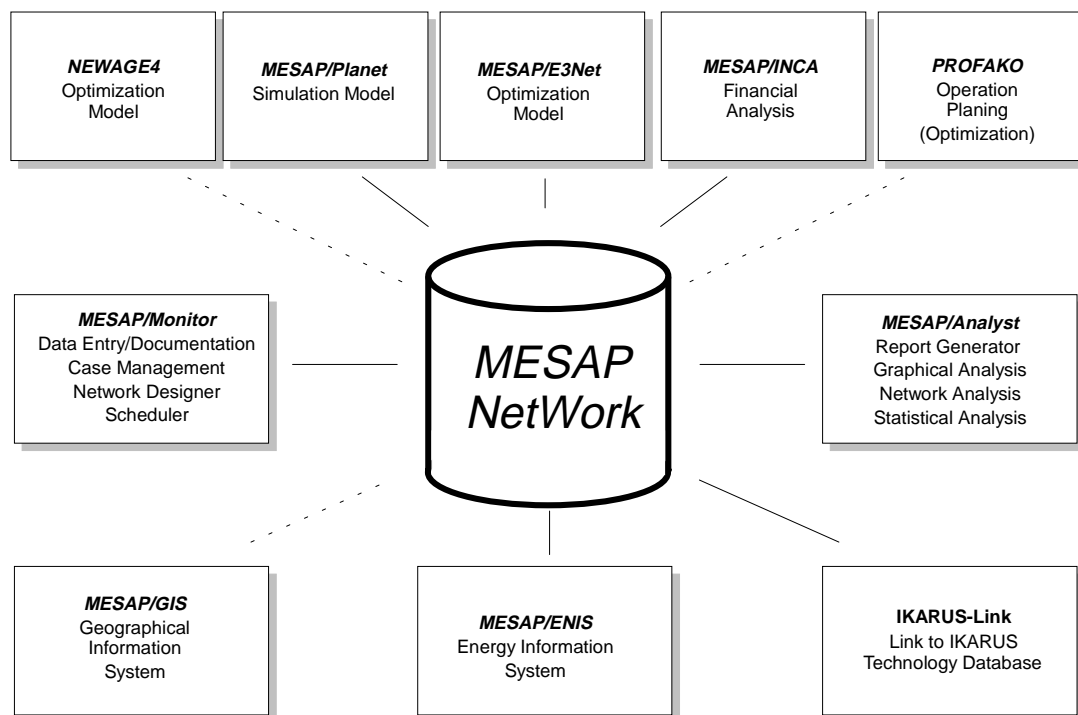
Ziel der Entwicklungen am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) war die Schaffung eines flexiblen und leistungsfähigen Datenverwaltungssystems, daß gleichzeitig bewährte wissenschaftliche Methoden zur Simulation und Optimierung von Energiesystemen integriert. Das am IER entwickelte *MESAP*<sup>1</sup>-System /Voß et al. 1995/; /Schlenzig, Reuter 1996/; /Schaumann, Schlenzig 1997/ ist ein PC-basiertes entscheidungsunterstützendes System zur Evaluierung energie- und umweltpolitischer Strategien auf kommunaler, regionaler, nationaler und multinationaler Ebene. *MESAP* unterstützt alle

---

<sup>1</sup> *MESAP* = **M**odulare **E**nergie- **S**ystem**A**nalyse und **-P**lanung

Phasen des strukturierten Planungsprozesses, alle wesentlichen Informationen zu einer Fallstudie werden in einer einzigen Datenbank gespeichert und dokumentiert. Dies umfaßt Probleme, Ziele, Systembeschreibung, untersuchte Maßnahmen, Szenarien, Daten, mathematische Modellbeschreibung, Gestaltung der Fallstudien, Modellergebnisse, Analyse-reports und Bewertungsschema. Die übersichtliche Strukturierung und vollständige Unterstützung des Planungsprozesses, sowie die ausführlichen Dokumentationsmöglichkeiten, gepaart mit benutzerfreundlichen Retrievalfunktionen, schaffen die Grundlage für die notwendige Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Planung. Die Dialogkomponente von *MESAP* ist benutzerfreundlich und setzt keine speziellen EDV-Kenntnisse voraus.

Das *MESAP*-System stellt somit ein modernes Planungsinstrument dar, mit dem die zuvor beschriebenen Mängel bisher existierender Instrumente behoben und deren Leistungsumfang wesentlich erweitert wird. In *MESAP* lassen sich verschiedene Ebenen unterscheiden (vgl. Abbildung 1-1): Die mittlere Ebene im Zentrum umfaßt die allgemeinen Werkzeuge. Dies sind die Fallstudien-orientierte Datenbank *NetWork*, der *MESAP-Monitor*, der *NetWork Designer* und der *MESAP-Analyst*. Der *MESAP-Monitor* übernimmt Dateneingabe, Zeitreihenverwaltung, Retrieval, Szenarioverwaltung und die Organisation mehrerer Modellläufe. Der *NetWork Designer* ermöglicht die Eingabe des Referenzenergiesystems (vgl. Kapitel 6) als Grafik am Bildschirm. Der *MESAP-Analyst* erlaubt die Zusammenstellung von Daten und Ergebnissen als Tabelle, Grafik oder Standardbericht sowie einfache statistische Analysen.



**Abbildung 1-1:** Das *MESAP*-III Planungssystem

Die Modellebene bietet die *MESAP*-Module *E<sup>3</sup>Net* zur Optimierung von Energiesystemen (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3), *PlaNet* zur Bedarfsanalyse und Simulation der Energieversorgung (vgl. Kapitel 5), *INCA* zur dynamischen Investitionsrechnung, *PROFAKO* zur Einsatz- und Ausbauplanung von Strom- und Fernwärmesystemen (Ankopplung an die *MESAP*-Datenbank *NetWork* geplant) sowie *NEWAGE* zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Energiesystem und Volkswirtschaft (vgl. Kapitel 4) (Ankopplung an die *MESAP*-Datenbank *NetWork* geplant).

Die Ebene der Informationssysteme integriert zentrale Datenbanken wie die *IKARUS*-Technik-Datenbank (vgl. Kapitel 2), das Energieinformationssystem *ENIS* und geographische Informationssysteme (in der Konzeptionsphase). Durch die Verbindung zur *IKARUS*-Technik-Datenbank stehen dem Anwender auch die vielfältigen Informationen zu Techniken der Energieumwandlung und Energieanwendung aus dieser Datenbank zur Verfügung. Das Energieinformationssystem *ENIS*, das allgemeine statistische Daten verwaltet, ist vollständig integriert und kann daher innerhalb einer Fallstudie mit *NetWork* koexistieren. Die für die Modellierung erfaßten Daten können als Grundstock für das allgemeine Informationssystem übernommen werden.

### 1.3 Das Referenzenergiesystem als Modellbildungsschema

Alle *MESAP*-Module verwenden das "Referenzenergiesystem" (RES) zur Beschreibung der Topologie des Energiesystems als Netzwerkdarstellung. Für die verschiedenen volkswirtschaftlichen Sektoren werden alle Güterströme und ihre Umwandlungen von der Ressource bis zur Dienstleistung abgebildet. Das Konzept des RES wurde in den siebziger Jahren vom Entwicklungsteam des MARKAL-Planungsinstruments entworfen /Beller 1975/; /Marcuse et al. 1975/; /NCAES 1978/. Das Referenzenergiesystem enthält zwei Arten von Objekten: Güter und Prozesse. In Abbildung 1-2 ist ein RES dargestellt, in dem der Prozeß "Kohlekraftwerk" das Gut "Steinkohle" verbraucht und die Güter "Strom" und "CO<sub>2</sub>" erzeugt.

Unter dem Begriff *Güter (Commodities)* werden alle mengenmäßig erfaßbaren Materialströme und Größen zusammengefaßt, wie z. B. Energieträger, Minerale, Gase und andere Ressourcen aber auch Industriegüter, Schadstoffe, Dienstleistungen. *Prozesse* können eine oder mehrere Güter in andere Güter transformieren. Prozesse müssen nicht ausschließlich Energiekonversionstechnologien sein, sie können z. B. auch ein Stahlwerk, ein Fahrzeug oder etwas ähnliches darstellen. Prozesse und Güter sind durch Verbindungen verknüpft. Eine *Verbindung (Link)* stellt den Fluß eines Gutes in oder aus einem Prozeß dar, also die erzeugten oder die verbrauchten Materialströme. Da das RES ein bipartiter Graph ist, dürfen zwei Prozesse oder zwei Güter nicht direkt miteinander verbunden werden, sondern müssen sich im Netzwerk immer abwechseln. Quellen und Senken werden durch Güter dargestellt.

Das RES enthält die wesentlichen, problemrelevanten Systemkomponenten des realen Energiesystems, d. h. auch diejenigen Energieträger und Umwandlungstechnologien, die erst als zukünftige Option verfügbar sein werden. Alle Informationen bezüglich des Energiesystems lassen sich Objekten des RES zuordnen. Durch die Definition des RES werden Untersuchungsgegenstand und Systemgrenzen eindeutig und nachvollziehbar festgelegt. Da sich unterschiedlichste Prozesse und Güter definieren lassen, können beliebige Energiesysteme aufgebaut werden. Der Detaillierungsgrad der Abbildung bleibt vollständig dem Modellierer überlassen, da die Anzahl der Prozesse, Güter und Verbindungen in seinem RES nicht begrenzt ist.

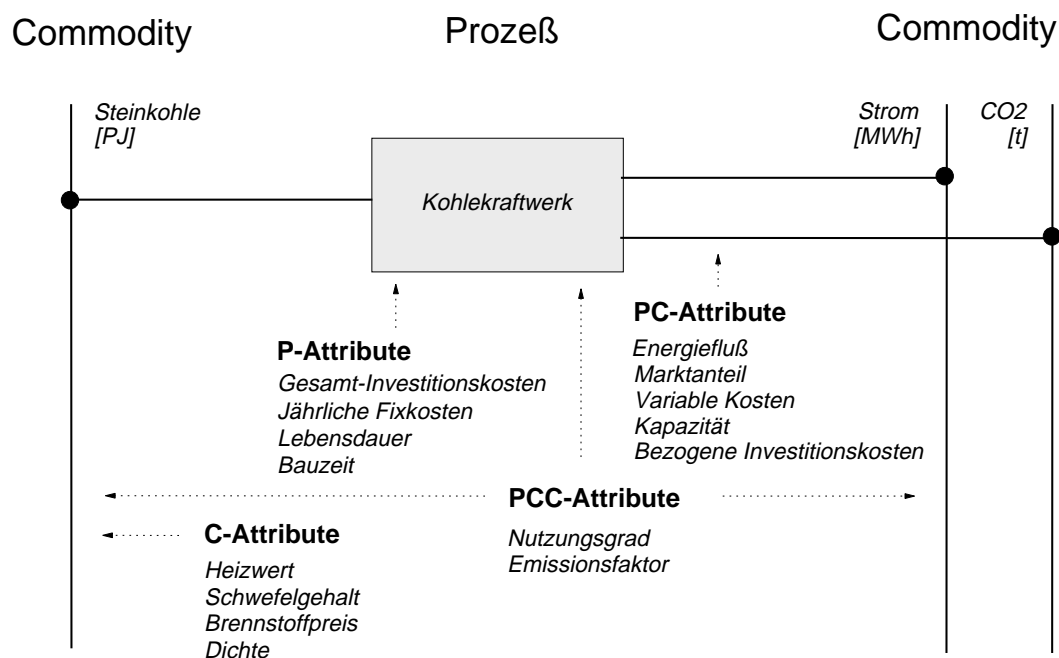


Abbildung 1-2: Definition des Referenzenergiesystems

#### 1.4 Das MESAP-Datenbanksystem *NetWork*

*NetWork* ist ein relationales Datenbanksystem zur Verwaltung von Energiesystemdaten, die sich auf ein RES beziehen /Schlenzig 1996/. Die wesentlichen Merkmale von *NetWork* sind

- Unabhängigkeit des Datenformats von formalen Modellen
- Nutzungsmöglichkeit als Modellierungsdatenbank und Informationssystem
- Vollständigkeit der speicherbaren Informationen



- Flexible zeitliche, räumliche und strukturelle Auflösung
- Zeitreihenorientierte Verwaltung aller Informationen
- Verwaltung alternativer Hypothesen für Zeitreihen
- Integrierte Szenarioanalyse
- Vererbungsalgorithmus zur Minimierung der Datenredundanz
- Interpolationsalgorithmus für Unabhängigkeit von der Modellierungsperiode
- Konsistente Maßeinheitenkonvertierung
- Vollständige Dokumentation jeder einzelnen Information
- Flexible, einfache und einheitliche Retrievalmöglichkeiten
- Multiuserfähigkeit für den Einsatz in EDV-Netzwerken

*NetWork* kann gleichzeitig als Datenbank für Modellrechnungen und als Informationssystem für Fallstudien genutzt werden. Als **Modellierungsdatenbank** repräsentiert *NetWork* eine standardisierte Plattform für Energiesystemmodelle, um Systemdaten, Modellannahmen und Berechnungsergebnisse für beliebig gestaltete Referenzenergiesysteme zu speichern, wobei die zeitliche und räumliche Auflösung flexibel ist. Das Datenformat ist auf die Topologie des Referenzenergiesystems abgestimmt und daher unabhängig von der Struktur der Rechenmodule, mit der eine Modellierung durchgeführt wird. Da alle Parameter und Variablen einen zeitlichen Verlauf besitzen, werden Informationen generell als Zeitreihen verwaltet. Es ist möglich, verschiedene Hypothesen für die zeitliche Entwicklung einer Größe zu definieren. Regionale Abweichungen in den Zeitreihen können ebenfalls gespeichert werden. Algorithmen zur "Vererbung" minimieren die Datenredundanz zwischen Hypothesen und regionalen Datensätzen. Die Datenbank ist unabhängig von der Modellierungsperiode eines Planungsinstruments. Mit Hilfe eines speziellen Algorithmus ist es möglich, den Berechnungsdatensatz aus der Datenbank abzuleiten und fehlende Werte in einer Zeitreihe automatisch zu ergänzen. Eine konsistente Umrechnung der eingegebenen Daten in die für die Berechnung notwendigen Maßeinheiten vermeidet Umrechnungsfehler und erlaubt es, Originaldaten in der Datenbank einzutragen und zu dokumentieren.

**Informationssysteme** erfassen, verwalten und präsentieren Informationen. Sie sind gekennzeichnet durch Vollständigkeit der gespeicherten Informationen, durch Schnelligkeit und Flexibilität beim Wiederfinden der gespeicherten Daten, sowie durch die Dokumentation der Herkunft aller Informationen. *NetWork* erlaubt es daher auch, Informationen zu speichern und zu dokumentieren, die nicht zur Modellierung verwendet werden, wie z. B. historische Daten. Neben der damit erreichten Vollständigkeit der Datenbasis zeichnet sich *NetWork* durch einen einfachen, standardisierten Zugriff auf die Daten aus. Der Datenzugriff umfaßt das Wiederauffinden (Retrieval), Modifizieren (Modify), Einfügen (Insert) und Löschen (Delete) von Datensätzen. Flexible Retrievalfunktionen erlauben es, jede gespeicherte Information einfach und schnell nach einheitlichen Regeln wiederzufinden; z. B. mit Hilfe von

Filtern. Für jede einzelne gespeicherte Zahl können Herkunft und Qualität dokumentiert werden. Der Name des Bearbeiters sowie Datum und Uhrzeit der Bearbeitung werden automatisch vom System notiert.

Die doppelte Nutzungsmöglichkeit von *NetWork* als Datenbank für Planungsinstrumente und als Informationssystem für Fallstudien hat einen für die Planung entscheidenden Vorteil. Da *NetWork* beide Aufgaben erfüllt, müssen für die Pflege und Aktualisierung der Datenbasis nicht zwei verschiedene Systeme aufgebaut werden. Die Daten aus den Modellrechnungen bilden automatisch den Grundstock für ein allgemeines Informationssystem und die im Informationssystem aktualisierte Datenbasis steht ohne zusätzlichen Aufwand für eine spätere Wiederholung der Modellläufe zur Überprüfung der Planungsergebnisse zur Verfügung.

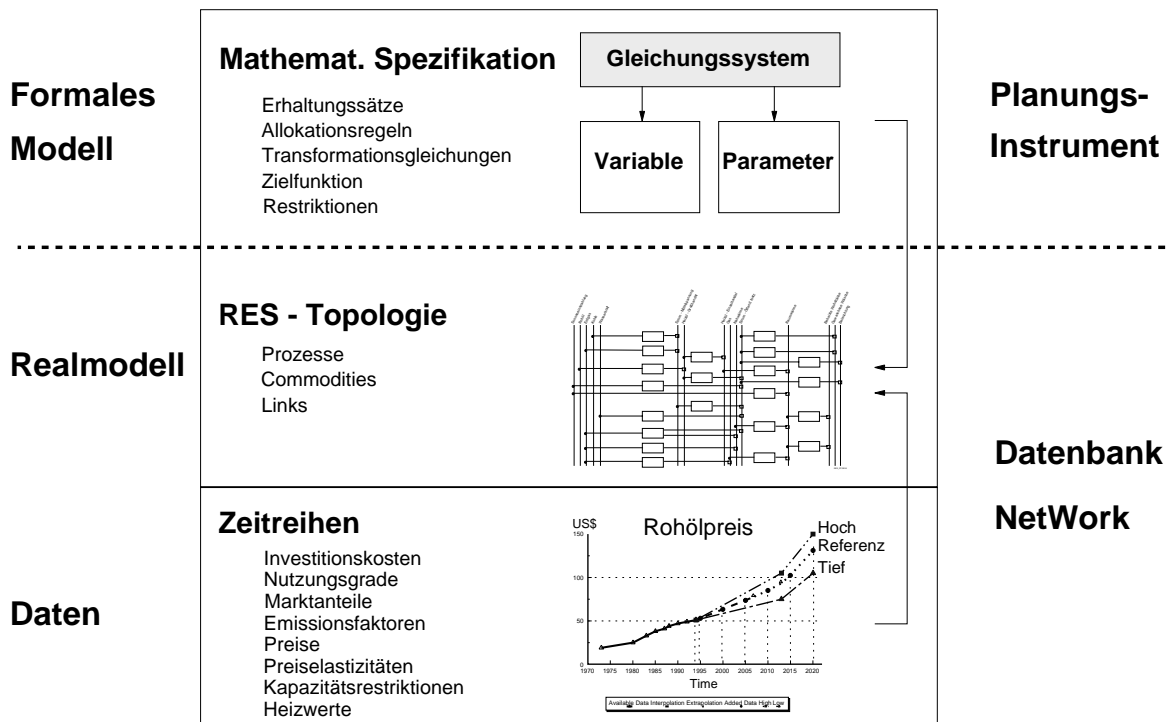
Die Vereinheitlichung des Datenbanksystems für RES-basierte Planungsinstrumente ermöglicht

- die gleichzeitige Nutzung eines Datenbestandes durch mehrere Planungsinstrumente,
- eine bessere Kopplung von Planungsinstrumenten durch institutionalisierten Datenaustausch,
- eine höhere Wiederverwertbarkeit von Fallstudien Daten durch einfache Retrievalfunktionen,
- die Harmonisierung der Entwicklung von Planungsinstrumenten,
- reduzierten Aufwand für die Softwareentwicklung durch Mehrfachnutzung von Modulen.

Die Standardisierung ermöglicht es auch, *NetWork*-kompatible Module sofort zu koppeln. Dies trifft insbesondere für die geforderte Kopplung von Simulations- und Optimierungsansatz zu.

## 1.5 Schnittstelle zwischen *NetWork* und Rechenmodulen

Damit *NetWork* als Modellierungsdatenbank für unterschiedliche Energiesystemmodelle genutzt werden kann, enthält es nur die Topologie des Energiesystems in Form des RES. Jedes Planungsinstrument benötigt zusätzlich eine Gleichungsspezifikation, mit der die im RES existierenden Freiheitsgrade zur Erstellung eines mathematischen Gleichungssystems eingeschränkt werden. Hierbei werden Regeln zur Erstellung der Gleichungen für Gruppen von RES-Objekten (Sets) festgelegt. Bei der Simulation eines Energiesystems umfaßt die Gleichungsspezifikation beispielsweise Erhaltungsgleichungen für alle Commodities, Transformationsgleichungen für alle Prozesse, Allokationsgleichungen für konkurrierende Prozesse und exogene Vorgabegleichungen für die Nachfrage. In einem Optimierungsmodell kämen noch Zielfunktion und Restriktionen hinzu, wogegen die Allokationsgleichungen nicht berücksichtigt würden. Die drei Ebenen der *MESAP*-Architektur - Topologie, mathematische Spezifikation und Daten - werden in Abbildung 1-3 gezeigt. Das RES ist dabei das wesentliche Strukturierungselement für Daten und Gleichungen.



**Abbildung 1-3:** Trennung von Daten und Gleichungen in *MESAP*

## 1.6 Ziele des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Projektes „Einbindung des *ECOLOG*-Modells ‘*E<sup>3</sup>Net*’ und Integration neuer methodischer Ansätze in das *IKARUS*-Instrumentarium“ (*ECOLOG II*) ist es, verschiedene Modellbildungsansätze und Werkzeuge für die energiewirtschaftliche Analyse aus dem *IKARUS*-Instrumentarium und dem *MESAP*-Instrumentarium zu einem umfassenden Instrumentarium zusammenzufügen. Im einzelnen geht es um Weiterentwicklungen in den folgenden sechs Forschungsbereichen:

- (1) **Integration von *E<sup>3</sup>Net* in das *IKARUS*-Instrumentarium (vgl. Kapitel 2):**  
Die Instrumentarien, die im Rahmen der Projekte *IKARUS* und *ECOLOG* entwickelt wurden, sollen miteinander gekoppelt werden.
- (2) **Nichtlineare Modellansätze für *E<sup>3</sup>Net* (vgl. Kapitel 3):**  
Das in linearen Zusammenhängen formulierte Energiesystemmodell *E<sup>3</sup>Net* soll um Nichtlinearitäten erweitert werden, so daß auch nichtlineare Optimierungsmodelle gebildet und berechnet werden können.
- (3) **Makroökonomische Erweiterung von *E<sup>3</sup>Net* (vgl. Kapitel 3):**  
Das Energiesystemmodell *E<sup>3</sup>Net* soll um eine makroökonomische Komponente erweitert werden, um die Wechselbeziehungen zwischen der Energiewirtschaft und der übr-

gen Volkswirtschaft analysieren zu können.

(4) **Entwicklung und Anwendung eines multisektoralen Energiewirtschaftsmodells *NEWAGE* (vgl. Kapitel 4)<sup>2</sup>:**

Komplementär zur makroökonomischen Erweiterung von *E<sup>3</sup>Net* soll ein multisektorales Energiewirtschaftsmodell *NEWAGE* im allgemeinen Gleichgewichtsansatz entwickelt werden, das eine umfassende volkswirtschaftliche Bewertung (sektorale Produktions- und Beschäftigungseffekte, Entwicklung des Bruttosozialprodukts, Außenhandel etc.) von energiepolitischen Maßnahmen ermöglicht.

(5) **Entwicklung eines Simulationsansatzes für Energiesystemmodelle (vgl. Kapitel 5):**

Es soll ein Instrument zur Simulation von Energiesystemen *PlaNet* entwickelt werden, das alternativ oder gemeinsam mit *E<sup>3</sup>Net* in der Energiesystemanalyse eingesetzt werden kann.

(6) **Erweiterung der Analysemöglichkeiten von *NetWork* (vgl. Kapitel 6):**

Mit Hilfe eines Graphikeditors sollen Modelle von Energiesystemen graphisch entworfen und dargestellt werden können.

Die beiden Teilziele „Nichtlineare Modellansätze für *E<sup>3</sup>Net*“ sowie „Makroökonomische Erweiterung von *E<sup>3</sup>Net*“ werden im folgenden aus inhaltlichen Überlegungen heraus in einem gemeinsamen Abschnitt behandelt.

---

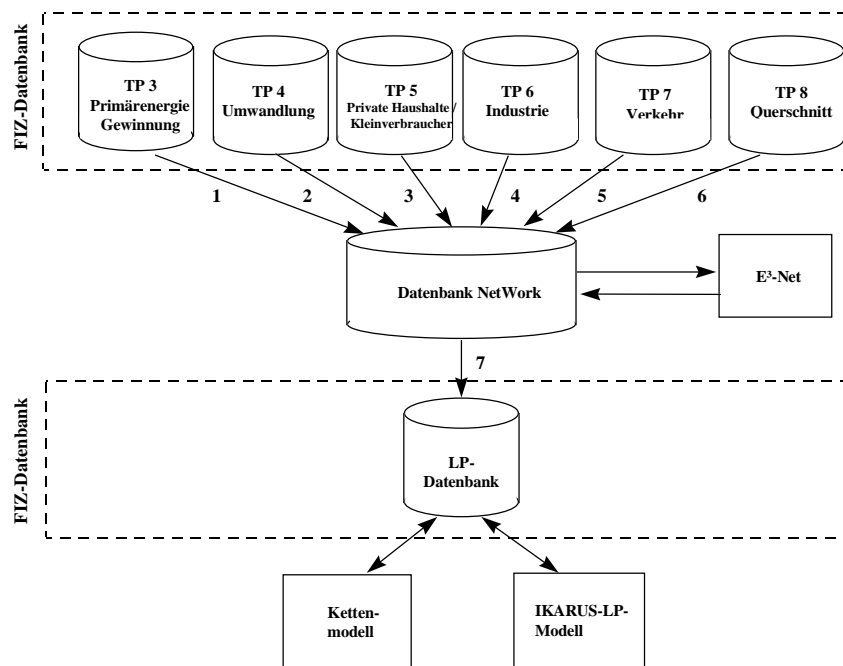
<sup>2</sup> Wegen möglichen Verwechslungen mit dem EU-Modell GEM-E3 wurde das IER-Energiewirtschaftsmodell von *E<sup>3</sup>GEM* in *NEWAGE* umbenannt.

## 2 Integration von $E^3Net$ in das *IKARUS*-Instrumentarium

### 2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der Nutzung einer gemeinsamen Datenschnittstelle kommt bei der Erstellung verschiedener Modellansätze besondere Bedeutung zu, da dadurch der Austausch strukturell gleicher Daten zwischen zwei verschiedenen Modellen erleichtert wird und damit auch zur Standardisierung von Systemdaten beitragen kann.

Ziel der Integration des Energiesystemmodells  $E^3Net$  ist es einerseits, das *IKARUS*-Instrumentarium um ein dynamisches Optimierungsmodell zu erweitern, und andererseits, die in der *IKARUS*-Technik-Datenbank enthaltenen Daten dem  $E^3Net$ -Modell zur Verfügung zu stellen. Somit müssen die einzelnen Teilprojekt-Datenbanken der *IKARUS*-Technik-Datenbank an *NetWork* angekoppelt werden (vgl. Abbildung 2-1), um daraus die Modellparameter der an *NetWork* angekoppelten Modelle ( $E^3Net$ , *PlaNet*, u. a.) erzeugen zu können. Hierfür müssen insgesamt sieben Transfermodule (TM) entwickelt werden (vgl. Abbildung 2-1). Jedes Transfermodul besteht jeweils aus einem Datentransfer- und aus einem Konvertierungsmodul. Dabei wird für die Transfermodule 1 bis 6 jeweils zuerst das Datentransfermodul und danach das Konvertierungsmodul genutzt, während sich für das Transfermodul 7 die Reihenfolge umdreht, so daß zuerst der Konvertierungsmodul und danach ein Datentransfermodul Verwendung findet.



**Abbildung 2-1:** Schnittstellen zwischen den Komponenten des *IKARUS*-Instrumentariums und der Datenbank *NetWork*

Die Anbindung des Energiesystemmodells  $E^3Net$  an das *IKARUS*-Instrumentarium erfolgt dann durch die Ankopplung von  $E^3Net$  an die als Schnittstelle vorgesehene Datenbank *NetWork*. Mit der im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgten Weiterentwicklung von *NetWork* war auch eine vollständige Überarbeitung der im Projekt „*Entwicklung eines Computermodells mit linearer Optimierung für Gesamtdeutschland*“ (siehe /Schaumann, Schweicke 1995/) beschriebenen Ankopplung des  $E^3Net$ -Modells notwendig. In den folgenden Abschnitten wird daher auch dargestellt, wie die Transformation der in *NetWork* gespeicherten Daten in ein für das Optimierungsmodell  $E^3Net$  lesbares Format erfolgt, und wie die Ergebnisse eines Modell-Laufes wieder in *NetWork* eingelesen werden können.

## 2.2 Kopplung der FIZ-Technik-DB an *NetWork*

In der *IKARUS*-Technik-Datenbank sind aus den Bereichen Gewinnung, Umwandlung, Haushalte, Verkehr und Industrie Energietechniken beschrieben und abgelegt. Beim Vergleich der Datenstrukturen der FIZ-Technik-DB mit *NetWork* können prinzipielle Unterschiede festgestellt werden. Da unterschiedliche Datenablagestrategien in der FIZ-Technik-DB und in *NetWork* sowie unterschiedliche Strukturen der beiden Datenbanken vorliegen, ergeben sich Inkonsistenzen, die eine 1:1-Übertragung der Daten zwischen der FIZ-Technik-DB und *NetWork* nicht zulassen.

In der FIZ-Technik\_DB werden zu einem Prozeß (z. B. Spitzenkessel 120 MW) sowohl die direkten Prozeßmerkmale (z. B. Brutto-Nennleistung) auf der Prozeßebene als auch die möglichen Eigenschaften (z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen) unterschiedlicher Aktivitäten auf der Prozeßvariantenebene abgelegt. Die möglichen Eigenschaften unterschiedlicher Aktivitäten sind durch einen Feldtyp - z. B. Emission (EM) oder Input (IN) - in unterschiedliche Gruppen unterteilt. Des weiteren werden mehrere Prozesse auf der Prozeßgruppenebene, wie z. B. "fossile Heizwerke", zusammengefaßt.

Demgegenüber werden die Daten in der Datenbank *NetWork* in Anlehnung an ein Referenzenergiesystem (RES) (vgl. Abschnitt 1.3) bzw. an ein Netzwerk abgelegt. Die Werte eines Prozesses (z. B. Spitzenkessel) können entweder direkt über sogenannte p-Parameter (z. B. Investitionen) oder durch den Einsatz eines Gutes (z. B. Steinkohle) über sogenannte pc-Parameter (z. B. Steinkohleneinsatz eines Prozesses) oder durch den Einsatz eines Gutes (z. B. Steinkohle) sowie den Ausstoß eines Gutes (z. B. Fernwärme) über sogenannte pcc-Parameter (z. B. Nutzungsgrad eines Prozesses) definiert werden. Darüber hinaus ist es in *NetWork* möglich, sogenannte c-Parameter festzulegen, die sich lediglich auf ein Gut (Commodity) beziehen (z. B. Schwefelgehalt von Steinkohle). Jede Kombination zwischen Prozeß und Gut entspricht dabei einer Verbindung im RES. Diese Verbindungen werden in einer weiteren Tabelle in *NetWork* abgelegt. Daher ist bei der Konvertierung die Umwandlung der prozeß-

orientierten Sichtweise der FIZ-Technik-DB in eine netzwerk-orientierte Sichtweise von *NetWork* notwendig.

### 2.2.1 Spezifikation eines Konvertierungs-Algorithmus

Da sich die Tabellenformate der unterschiedlichen FIZ-Teilprojekte-Datenbanken unterscheiden, sind unterschiedliche Konvertierungsalgorithmen notwendig. Für alle Konvertierungsalgorithmen sind jedoch Transfertabellen für die Prozesse, Güter, Parameter, Einheiten, für den Verbindungstyp und für die Regionen vorzusehen. Diese Transfertabellen dienen einerseits zur Festlegung bzw. Steuerung der Art der Übertragung (inkremental oder überschreibend), andererseits zum selektiven Wiederholen von bereits erfolgreich durchgeführten Transfers. Bei den Transfertabellen kann zwischen

- Mappingtabellen, bei denen eine von der Fallstudie abhängige Zuordnung der Prozeß- und Güternamen zwischen der FIZ-Technik-DB und *NetWork* erfolgt,
- Konvertierungstabellen, bei denen eine von der Fallstudie unabhängige Zuordnung der Parameter, der Einheiten, der Verbindungstypen und der Regionen stattfindet,
- Rangfolgentabellen, bei denen eine von der Fallstudie unabhängige Interpretation und Auswahl der Prozeßmerkmale aus der FIZ-Technik-DB für den Datentransfer vorgenommen wird,

unterschieden werden. Bei der Konvertierung einer Teildatenbank ist zwischen der Konvertierung eines einzelnen Prozesses oder aller Prozesse zu unterscheiden, da für die Konvertierung eines einzelnen Prozesses der Prozeß aus der FIZ-Technik-Datenbank ausgewählt werden muß. Hierfür sind in Abhängigkeit der Gruppierung der Technologien unterschiedliche Browser notwendig. Der Konvertierungsalgorithmus unterscheidet nicht zwischen der Konvertierung eines oder aller Prozesse. Er muß Einträge in *NetWork* für die Beschreibung des RES und die Wertinformationen vornehmen. Für die Beschreibung des RES ist es notwendig, daß Einträge der FIZ-Technik-DB,

- die Prozessen oder Gütern entsprechen, in *NetWork* neu angelegt oder bestehenden Objekten zugeordnet werden,
- die Verbindungen des RES entsprechen, in *NetWork* als Verbindungen angelegt werden für bestehende bzw. neu angelegte Güter oder Prozesse.

Für die Konvertierung von Wertinformationen ist es notwendig, das entsprechende *NetWork* Attribut, den Zugriffsschlüssel, das Gebiet und das Referenzjahr für die Wertinformation gilt und optional die Quelle zu bestimmen.

Der Schwerpunkt der Konvertierung liegt für die FIZ-Technik-DB TP3, TP4, TP5, TP6 und TP8 in der Interpretation der allgemeinen Tabellen TIOFEB und TIOFAT. Für

die FIZ-Technik-DB TP7 ist ein anderes Vorgehen notwendig, da diese die Tabellen TIOFEB und TIOFAT nicht integriert hat.

Die Tabelle TIOFEB enthält für die Beschreibung der Prozeßattribute viele Doppeldeutigkeiten. Für das Prozeßattribut (TIOFEB.Feldlangbez) „Steinkohle“ z. B. existieren identische Einträge mit der Feld\_ID 219, 4091, 4650 6023 und 9023 bzw. redundante Informationen (z. B. „spezifischer Wert für Steinkohle“). Um eine konsistente *NetWork*-Datenbank zu erhalten, ist es notwendig, alle doppeldeutigen Informationen gleich zu behandeln und alle redundanten Informationen nur einmal zu konvertieren.

Zeitbezüge werden in der FIZ-Technik-DB wie Prozeßattribute behandelt. Die abgespeicherten Prozeßinformationen gelten für einen bestimmten Zeitpunkt, für den es mehrere mögliche Einträge in der Tabelle TIOFEB gibt. Da Informationen ohne Zeitbezug in *NetWork* nicht abgespeichert werden, sind Zeitbezüge gesondert zu behandeln.

In *NetWork* wird für jedes Prozeßattribut eine Zeitreihe angelegt. Der Zeitreihen-Zugriffsschlüssel in *NetWork* ist abhängig von der Zuordnung der Information zu Objekten im RES. Daher ist für die Konvertierung in Abhängigkeit des TIOFEB-Prozeßattributes eine Aufspaltung auf mehrere *NetWork*-Informationen notwendig. Diese Aufspaltung erfolgt, indem eine Beziehung zwischen *NetWork*-Typ und den Einträgen in der Tabelle TIOFAT hergestellt wird, und zusätzlich der Eintrag des Feldes [Feld\_Bez] interpretiert wird. Durch die Tabelle TIOFAT kann der *NetWork*-Parametertyp und die Zuordnung im RES bestimmt werden (vgl. Tabelle 2-1).

**Tabelle 2-1:** Zuordnung der Feldart der Tabelle TIOFAT und dem entsprechenden Parametertypen in *NetWork*

Feldart	Feldart_Name	Parametertyp in <i>NetWork</i>	Linktyp
EM	Emissionen	pc	o
IV	Investitionen	p	-
IN	Input	pc	i
TE	Technische Daten	p/pcc	-
OU	Output	pc	o
NP	Nebenprodukte	pc	o
HS	Hilfs- und Betriebsstoffe	pc	i
FK	Fixe Kosten	p	o
VK	Variable Kosten	p	o
...	...	...	...

Die einzige Feldart, für die keine eindeutige Zuordnung vorgenommen werden kann, ist die Feldart „TE“. Dieser wurden in der FIZ-Technik-DB Prozeßattribute wie „Personal“ (*NetWork*-Parametertyp „p“), aber auch Prozeßattribute wie „thermischer Wirkungsgrad“ (*NetWork*-Parametertyp „pcc“) zugeordnet.



Um die Zuordnung von Informationen zu Objekten des RES vornehmen zu können müssen diese Informationen auch einem *NetWork*-Attribut zugeordnet werden. Hierfür ist eine Mappingtabelle zwischen FIZ-Technik-DB und *NetWork*-Parameter notwendig, durch die die doppeldeutige Prozeßattribute der FIZ-Technik-DB herausgefiltert werden, indem unterschiedlichen Prozeßattributen der gleiche *NetWork*-Parameter zugeordnet wird (vgl. Tabelle 2-2). Auf Grund dieser Zuordnungen kann der Zeitreihen-Zugriffsschlüssel erstellt werden. Dieser setzt sich aus dem *NetWork*-Parameter, der dem Prozeßattribut der FIZ-Technik-Datenbank zugeordnet ist, und der verknüpften Feldart zusammen. Parallel zur Erstellung des Zeitreihenschlüssels kann das für *NetWork* wichtige RES aufgebaut werden entsprechend der Zuordnung zwischen dem Feld [Feldart] und dem *NetWork*-Parametertyp. Alle nach *NetWork* konvertierten Prozesse und Güter der FIZ-Technik-DB sind innerhalb der Objekt-, Prozeß- und Guttabeln von *NetWork* zu verwalten.

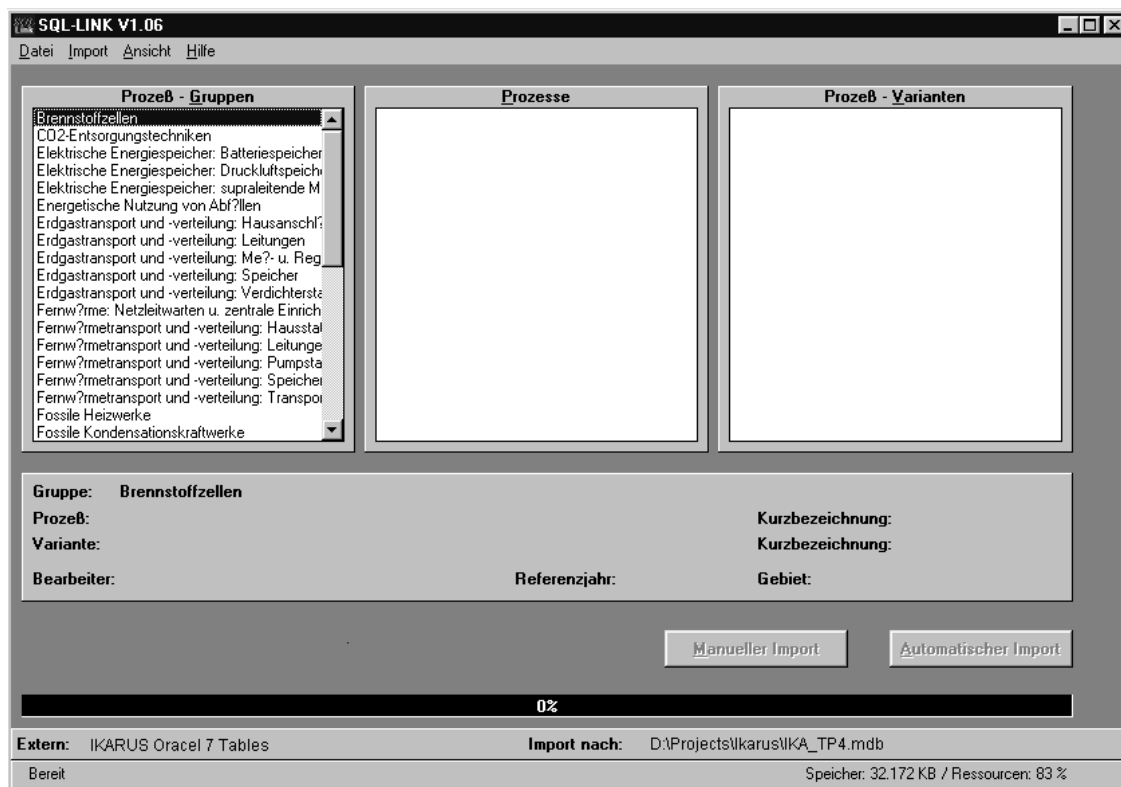
**Tabelle 2-2:** Mappingtabelle zwischen den Prozeßattributen und Parametern

FELD_ID	PAR_NR	FELDBEZEICHNUNG	PAR_ID	PAR_NAME
1	163	Leistung (netto)	NETCAP	Nettokapazität
2	162	Leistung (brutto)	BRUTCAP	Bruttokapazität
4	153	Frühestmögliche Inbetriebnahme	T1	Inbetriebnahme
5	8	Gesamtwirkungsgrad	RATIO	Ratio between flows C2/C1
6		Bauzeit		
7	103	Ökonomische Lebensdauer	LIFETIME	Lifetime
9	104	Herstell- + Bauherrenkosten	INVC	Investitionskosten
10	137	Sonstige Kosten der Bauzeit	ATOPC	An. Betriebskosten
11	114	Summe der fixen Kosten	TFXI	Fixe Betriebserlöse
12	3	Summe der variablen Kosten	VAR_COST	Variable operating cost
13		Außerbetriebnahmekosten		
14	106	BESEIT_KOST	DSMC	Abrißkosten
15	18	CO2-Emissionen	Q_COM	Quantity of a commodity
16	18	CO-Emissionen	Q_COM	Quantity of a commodity
...	...	...	...	...

### 2.2.2 Softwaretechnische Umsetzung: *SQL-Link*

Der Prototyp des Moduls *SQL-Link* wurde unter Windows V3.11 entwickelt und ist ohne Probleme unter Windows 95 einsetzbar. Der Import-Datentransfer aus der FIZ-Technik-DB in

*NetWork* wurde mit Hilfe der ODBC<sup>3</sup>-Schnittstelle realisiert. Für den Datentransfer und die Konvertierung unterstützt *SQL-Link* einerseits die komplette Konvertierung einer *IKARUS*-Technik-Datenbanken in eine zentrale Teildatenbank „IKARUS“ in *NetWork*, andererseits die Konvertierung einzelner ausgesuchter Prozesse der *IKARUS*-Technik-Datenbanken in Modellstudien, die mit *NetWork* erstellt werden. Für die an *NetWork* angekoppelten Modelle (*E<sup>3</sup>Net*, *PlaNet*, u. a.) können durch eine bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens in *NetWork* realisierte Kopierfunktion einzelne Mini-RES aus der zentralen Teildatenbank „IKARUS“ in *NetWork* oder aus anderen *NetWork*-Teildatenbanken in die Modellstudien kopiert werden. Nach dem Programmstart von *SQL-Link* erscheint das in Abbildung 2-2 dargestellte Hauptfenster. In Abhängigkeit von der für den Import ausgewählten *IKARUS*-Teilprojekt(TP)-Datenbank (TP3-Primärenergie, TP4-Umwandlung, TP7-Verkehr) erscheint im Hauptfenster eine mehrstufige Auswahl entsprechend dem Aufbau des *IKARUS*-Retrievalsystem /FIZ 1998/. In Abbildung 2-2 ist das Hauptfenster von *SQL-Link* mit ausgewählter Teilprojekt-Datenbank TP4 dargestellt.



**Abbildung 2-2:** *SQL-Link* Hauptfenster

Im Hauptfenster kann der Benutzer für die TP4-Datenbank aus Prozeß-Gruppen, Prozessen und Prozeß-Varianten einen Prozeß oder eine Prozeß-Variante auswählen. Für

<sup>3</sup> Open Database Connectivity

jeden Prozeß oder jede Prozeß-Variante wird in *NetWork* ein Prozeß abgelegt. *SQL-Link* orientiert sich nur an den Tabellenformaten und den Relationen zwischen den Tabellen der FIZ-Technik-DB und ist offen für zukünftige Aktualisierungen des Datenbestandes. In der Datenbank TP3 sind z. B. bisher keine Prozeß-Varianten abgelegt, entsprechende Tabellen sind hierfür aber vorgesehen, daher enthält das Auswahlménü von *SQL-Link* bereits die Auswahloption Prozeß-Variante. Der Datentransfer und die Konvertierung nach *NetWork* läuft für eine komplette FIZ-Technik-DB automatisch, für einzelne Prozesse wahlweise automatisch oder benutzergesteuert ab. Die Regeln für die Konvertierung werden mit Hilfe der *System-Administrator* Funktionen festgelegt. Hierfür stehen folgende Funktionen zur Verfügung:

- der *Gruppeneditor* zur Verwaltung der Rangfolgentabellen und der Doppeldeutigkeiten,
- die *Topologiezuordnung* für die Verwaltung der Relation zwischen Verbindungstyp und Feldart der FIZ-Technik-DB Tabelle TI0FAT,
- das *Parameter-Mapping* um die Konvertierungstabellen der Parameter zu verwalten,
- das *Einheiten-Mapping* um die Konvertierungstabellen für die Einheitenumwandlung zu verwalten.

Das Ergebnis der Konvertierung kann mit Hilfe eines Reports innerhalb *SQL-Link* oder in ENIS /Blesl et al. 1996/ bzw. mit dem *MESAP*-Navigator angezeigt werden.

### 2.3 Verbindung der FIZ-LP-DB mit *NetWork*

Eines der im Rahmen des *IKARUS*-Projektes entwickelte Modelle ist ein einperiodisches lineares Optimierungsmodell (LP-Modell). Das Optimierungsmodell bildet die Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland von der Primärenergie bis zu den Energiedienstleistungen als ein vernetztes System von Energieumwandlungsanlagen ab. Es besteht eine eindeutige Zuordnung zwischen der energiewirtschaftlichen Struktur und dem Gleichungssystem, womit eine Übersetzung in beiden Richtungen möglich ist. Die einzelnen Sektoren von der Primärenergie via Umwandlungsbereich bis zu den Endverbrauchern sind im Modell als einzelne Module abgebildet. Miteinander verbunden sind diese Module über das Modul *Oberstruktur*, wodurch ein Austausch von Energieträgern zwischen den Sektoren stattfinden kann. Dieser modulare Aufbau erlaubt es, ohne Auswirkung auf die anderen Sektoren Änderungen in der Struktur eines Sektors durchzuführen. In dem Modul *Oberstruktur* können die energiewirtschaftlichen und emissionsrelevanten Größen erfaßt und wenn erwünscht restriktiv behandelt werden.

Innerhalb der Module sind die jeweils repräsentativen Techniken abgelegt. Bei diesem sog. Platzhalterkonzept wird eine Technik nur durch ihre Eigenschaften charakterisiert, also z. B. daß die mit einem Steinkohlekraftwerk verbundenen Energieträger Steinkohle und Strom

sind. Es werden aber keine quantitativen Angaben gemacht. Diese erfolgen erst, wenn der jeweilige Platzhalter mit einem bezüglich der Eigenschaften passenden Datensatz belegt wird. So können sehr viele Datensätze vorgehalten werden, ohne die Modellstruktur unnötig zu vergrößern.

Das Platzhalterkonzept bringt es jedoch auch mit sich, daß das dem *IKARUS-LP*-Modell zugrunde liegende Referenzenergiesystem (vgl. Abschnitt 1.3) nicht variabel, sondern in der Struktur fest ist. Zur Zeit befinden sich in der zu dem *IKARUS-LP*-Modell gehörenden Modelldatenbank Datensätze für 1989, 2005 und 2020. Für 1989 und 2005 wird nach alten und neuen Bundesländern unterschieden; für 2020 erfolgt keine Differenzierung. Datenursprung ist die vom Fachinformationszentrum Karlsruhe entwickelte Technologiedatenbank (vgl. Abschnitt 2.2). Die exogen vorgegebenen Nachfragewerte basieren auf dem Prognos-Gutachten /Prognos 1991/ sowie Rechnungen, die mit dem Makroökonomischen Informationssystem *IKARUS* (MIS), einem Input/Output-Modell, durchgeführt wurden.

### **Aufbau der FIZ-LP-DB**

Innerhalb der vom Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe im Rahmen des *IKARUS*-Projektes erstellten und mit der Datenbanksprache ORACLE implementierten Datenbank gibt es neben den Bereichen zu Technikdaten (FIZ-Technik-DB, vgl. Abschnitt 2.2) und Rahmendaten auch einen Bereich für die LP-Modelldaten (FIZ-LP-DB) des *IKARUS-LP*-Modells. Die Modelldaten sind in der FIZ-DB in eigenen Tabellen zusammengefaßt. Die eigentlichen LP-Technikdaten beschränken sich für alle sog. Platzhalter auf lediglich 22 identische Merkmale, zuzüglich vorgegebener In- und Outputs, deren Zusammensetzung technikabhängig ist.

Für die gesamte Beschreibung der Techniken (Platzhalter) des *IKARUS-LP*-Modells und ihrer Verknüpfungen sind insgesamt elf Tabellen aus der FIZ-LP-DB relevant (vgl. Abbildung 2-3). Diese Tabellen beinhalten zum einen die von KFA-STE im *IKARUS-LP*-Modell vorgesehenen, nach Sektoren (TI1SEK in Abbildung 2-3) und Untersektoren (TI1USK in Abbildung 2-3) aufgeteilten Platzhalter mit ihren Codierungen (TI1PLA in Abbildung 2-3) sowie die erlaubten, ebenfalls codierten In- und Outputs (TI1ROW in Abbildung 2-3). Weitere Referenztabellen, die von den Daten-Teilprojekten des *IKARUS*-Projektes mit Daten gefüllt werden, sind:

TI1STD	enthält die Technikdaten der Platzhalter,
TI1SIO	enthält zum Platzhalter gehörende In- und Outputwerte,
TI1ZLS	gibt an, welche Technik in welchem Jahr und Gebiet einsetzbar ist,
TI1DEF	gibt an, welche Technik im Standardfall, d. h. ohne Nutzereingriff für einen Platzhalter eingesetzt wird. Diese Defaultbelegung kann u. U. von einem unterstellten volkswirtschaftlichen Szenario abhängig sein.

Zusätzlich werden die Informationen aus den Tabellen TI1GBT und TI1FLL benötigt, die die Informationen zu den betrachteten Regionen und Szenarien beinhalten.

Die LP-Modelldaten weisen in der FIZ-LP-DB aufgrund der Vorgabe der Modellentwickler über alle Techniken hinweg in den meisten Feldern einheitliche Dimensionen auf, die energetischen In- und Outputs sind z. B. durchweg in GJ/a angegeben, d. h., es ist eine bestimmte Auslastung für die Technik unterstellt. Diese Auslastung findet sich beim Merkmal *AUSLASTUNG* in der Tabelle TI1STD (vgl. Abbildung 2-3). Lediglich bei den Leistungsangaben sind Ausnahmen zugelassen, so daß mit dem Merkmal *P\_DIM* in der Tabelle TI1STD (vgl. Abbildung 2-3) die zugehörige Dimension angegeben wird. Die technischen Daten sind dann auch auf einen bestimmten Energieträger zu beziehen. Dieser Energieträger wird mit dem Merkmal *P\_BEZUG* in der Tabelle TI1STD (vgl. Abbildung 2-3) spezifiziert. Letztendlich sollten die Werte dann auf den Wert 1 des Bezugs-Energieträgers normiert sein.

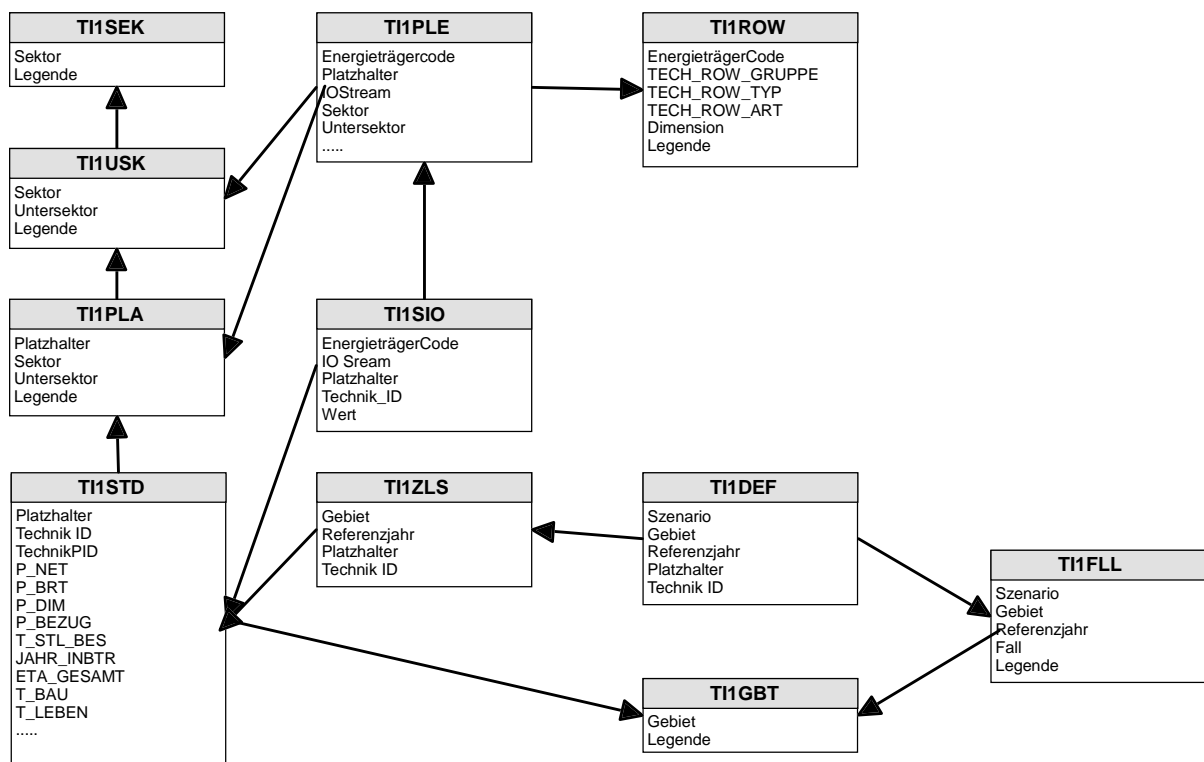


Abbildung 2-3: ER-Diagramm (verkürzt) der FIZ-LP-Datenbank

## 2.4 Von der FIZ-LP-DB nach *NetWork*: Case Study „*IKARUS-LP*“

Bei der Transformation der Informationen aus der FIZ-LP-DB in die *MESAP*-Datenbank *NetWork* (vgl. Abschnitt 1.4) treten ähnliche Probleme auf, wie sie bereits beim Vergleich der

FIZ-Technik-DB mit *NetWork* (vgl. Abschnitt 2.2) angesprochen wurden. Der in *NetWork* realisierte RES-Ansatz macht es erforderlich, die technik-/platzhalterorientierten Informationen aus den Tabellen der FIZ-LP-DB (vgl. Abbildung 2-3) unterschiedlichen Tabellen in *NetWork* zuzuordnen.

Relativ einfach ist dies für die Informationen zu dem Betrachtungsgebiet (Tabelle TI1GBT in Abbildung 2-3 aus der FIZ-LP-DB), die sich in *NetWork* in der Tabelle REG (Region List) wiederfinden. Hierbei wird jedoch die Hierarchie beachtet, so daß Deutschland (DE) die Master-Region darstellt und die Alten Bundesländer (AL) sowie die Neuen Bundesländer (NL) der Master-Region untergeordnet sind. Des weiteren werden die Informationen zu den verwendeten Energieträgern (Tabelle TI1ROW in Abbildung 2-3 aus der FIZ-LP-DB) in *NetWork* in der Tabelle R\_COM (Commodity List) abgespeichert und entsprechend die Platzhalter (Tabelle TI1PLA in Abbildung 2-3 aus der FIZ-LP-DB) in *NetWork* in der Tabelle R\_PRO (Process List). Die hierarchische Zuordnung der Platzhalter des *IKARUS-LP*-Modells zu Sektoren und Untersektoren (Tabellen TI1USK und TI1SEK in Abbildung 2-3) und der Energieträger zu Gruppen, Typen und Arten (Tabelle TI1ROW in Abbildung 2-3) wird in *NetWork* durch die Zuordnung zu Bäumen realisiert. Ebenso einfach ist auch die Zuordnung der Vernetzung des festen RES aus dem *IKARUS-LP*-Modell, die aus der Tabelle TI1SIO der FIZ-LP-DB (vgl. Abbildung 2-3) in die Tabelle R\_NET in *NetWork* übertragen wird. Zu beachten ist, daß die Datenbank *NetWork* zeitreihenorientiert angelegt ist, die Informationen in der FIZ-LP-DB jedoch technik-/platzhalter-orientiert abgelegt sind.

Probleme treten bei der Transformation aus der FIZ-LP-DB nach *NetWork* bzw.  $E^3Net$  an drei Stellen auf. Das kleinste Problem ist dabei die Einbeziehung der Informationen zu den Außerbetriebnahme- und den Beseitigungskosten über die Information zu dem Außerbetriebnahmezeitraum sowie zu den sonstigen Kosten der Bauzeit zusammen mit den Herstell- und Baukosten in die Gesamtinvestitionen für  $E^3Net$ . Etwas aufwendiger ist die Behandlung der Informationen zu den Emissionen (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FCKW, NMKW), die in der FIZ-LP-DB dem Platzhalter zugeordnet sind (Tabelle TI1STD in Abbildung 2-3), in *NetWork*/ $E^3Net$  jedoch als Commodities behandelt werden.

Das größte Problem bereitet jedoch die für die FIZ-LP-DB vorgenommene Normierung auf eine gewisse Auslastung und der Bezug auf einen Energieträger. In  $E^3Net$  werden die Informationen in Abhängigkeit vom Merkmal in unterschiedlichen Spezifikationen benötigt (die Auslastung einer Technik in  $E^3Net$  ist variabel und daher nicht als Bezugskriterium geeignet), so daß hierfür ein entsprechender Konvertierungsalgorithmus entwickelt werden muß, der die Informationen aus den Wertetabellen TI1STD und TI1SIO der FIZ-LP-DB (vgl. Abbildung 2-3) entsprechend umsetzt.

Das Transfermodul 7 (vgl. Abbildung 2-1), das alle Routinen als Prototyp beinhaltet, um auf dem oben beschriebenen Weg zu einer Case Study „*IKARUS-LP*“ in *NetWork* zu

gelangen, besteht dabei aus zwei Teilen. Der erste Teil beinhaltet die beschriebenen einfacheren Umsetzungen mittels SQL-Befehlen, der zweite Teil mit dem Konvertierungsalgorithmus wurde mit VisualBasic und ACCESS umgesetzt. Das Ergebnis des Transfermoduls 7 in *NetWork* ist beispielhaft für einen Ausschnitt aus dem Verkehrssektor in Abbildung 2-4 dargestellt.

### Zusätzlich benötigte Informationen

Das Optimierungsmodell *IKARUS-LP* selbst arbeitet mit einer separaten, von der zuvor beschriebenen FIZ-LP-Datenbank unabhängigen Modelldatenbank. Diese Datenbank enthält Informationen zur Struktur (Oberstruktur und Sektorstruktur), Technik (Attribute und Begrenzungen (vgl. Abbildung 2-5) und Energiewirtschaft (Nachfrage, Preise der Importenergieträger, vorgelagerte Emissionen der Importenergieträger und Begrenzungen), die teilweise nicht der FIZ-LP-Datenbank entstammen. Beispiele hierfür sind die Oberstruktur, die exogene Nachfrage oder die Begrenzungen.

Attribute	Process	Com.-1	Com.-2	Unit	1989	2005	2020	
1	Availability Factor	Diesel-LKW Normal		a	0.00	0.00	0.13	
2	Availability Factor	Diesel-LKW Spar		a	1.00	0.00	0.00	
3	Building Time for a	Diesel-LKW Normal		a	0.00	0.00	0.00	
4	Building Time for a	Diesel-LKW Spar		a	0.00	0.00	0.00	
5	Gross-Efficiency related	Diesel-LKW Normal		[T]	0.91	0.81	0.85	
6	Gross-Efficiency related	Diesel-LKW Spar		[T]	1.00	0.91	0.96	
7	Investment Costs	Diesel-LKW Normal		MC(99) / P.kg	570.50	386.30	384.70	
8	Investment Costs	Diesel-LKW Spar		MC(99) / P.kg	0.00	450.90	386.20	
9	Lower Bound on Flow	Diesel-LKW Normal	LKW-km	PJ	994.55	1,862.00	1,810.84	
10	Market Share	Diesel-LKW Normal	Diesel	[T]	1.00	1.00	1.00	
11	Market Share	Diesel-LKW Spar	Diesel	[T]	0.00	1.00	1.00	
12	Product Share	Diesel-LKW Normal	LKW-km	[T]	1.00	1.00	1.00	
13	Product Share	Diesel-LKW Spar	LKW-km	[T]	1.00	1.00	1.00	
15	Ratio between flows	Diesel-LKW Normal	LKW-km	CH4-Emissionen	kg / GJ	11.55	7.38	5.06
17	Ratio between flows	Diesel-LKW Normal	LKW-km	CO-Emissionen	kg / GJ	0.38	0.31	0.26
19	Ratio between flows	Diesel-LKW Normal	LKW-km	CO2-Emissionen	kg / GJ	80.16	80.43	86.04
21	Ratio between flows	Diesel-LKW Normal	LKW-km	NBOW-Emissionen	kg / GJ	231.00	147.10	101.20
30	Ratio between flows	Diesel-LKW Normal	LKW-km	SO2-Emissionen	kg / GJ	51.31	57.67	54.07
33	Ratio between flows	Diesel-LKW Spar	LKW-km	CH4-Emissionen	kg / GJ	0.00	6.85	4.49
35	Ratio between flows	Diesel-LKW Spar	LKW-km	CO-Emissionen	kg / GJ	0.00	0.28	0.24
37	Ratio between flows	Diesel-LKW Spar	LKW-km	CO2-Emissionen	kg / GJ	0.00	80.01	76.19
39	Ratio between flows	Diesel-LKW Spar	LKW-km	NBOW-Emissionen	kg / GJ	0.00	132.90	88.77
41	Ratio between flows	Diesel-LKW Spar	LKW-km	NOx-Emissionen	kg / GJ	0.00	672.70	714.70
48	Ratio between flows	Diesel-LKW Spar	LKW-km	SO2-Emissionen	kg / GJ	0.00	51.04	48.62
50	Technical Lifetime	Diesel-LKW Normal		a	15.00	15.00	15.00	
51	Technical Lifetime	Diesel-LKW Spar		a	1.00	15.00	15.00	
52	Upper bound on Flow	Diesel-LKW Normal	LKW-km	PJ	1,024.73	-1.00	-1.00	

Abbildung 2-4: Datensicht des Sektors Güterfernverkehr in *NetWork*

Die nicht in der FIZ-LP-Datenbank und nur in der *IKARUS-LP*-Modelldatenbank enthaltenen Daten können zum Teil unter Nutzung des sog. *Cut-and-Paste* unter Windows in *NetWork* übertragen werden. Dies trifft insbesondere für die Übertragung der Informationen zu Begrenzungen (vgl. Abbildung 2-5) zu.

	Fall	Sektor	Intersekt	Platzhalter/Variable	Kürzel Variable	Dim.	Wert	Typ der Begrenzung
298	BASIS12	V	VD	Diesel-Bahn(Tag) (Platzhalter)	VDAXDA	miokm	98.24	untere
299	BASIS12	V	VD	Diesel-Bahn(Tag) (Platzhalter)	VDAXDA	miokm	102.24	obere
300	BASIS12	V	VD	Diesel-Bahn(Nacht) (Platzhalter)	VDAXDB	miokm	225.92	untere
301	BASIS12	V	VD	Diesel-Bahn(Nacht) (Platzhalter)	VDAXDB	miokm	235.15	obere
302	BASIS12	V	VD	El.-Bahn(Tag) (Platzhalter)	VDAXEA	miokm	51.12	obere
303	BASIS12	V	VD	El.-Bahn(Tag) (Platzhalter)	VDAXEA	miokm	49.12	untere
304	BASIS12	V	VD	El.-Bahn(Nacht) (Platzhalter)	VDAXEB	miokm	122.69	obere
305	BASIS12	V	VD	El.-Bahn(Nacht) (Platzhalter)	VDAXEB	miokm	117.87	untere
306	BASIS12	V	VD	Flugzeug (Platzhalter)	VDFXKA	miokm	0	obere
307	BASIS12	V	VD	Diesel-LKW Normal (Platzhalter)	VDKXDA	miokm	1024.73	obere
308	BASIS12	V	VD	Diesel-LKW Normal (Platzhalter)	VDKXDA	miokm	984.55	untere
309	BASIS12	V	VD	Binnenschiff (Platzhalter)	VDSXSB	mrdtkm	5.61	obere
310	BASIS12	V	VD	Binnenschiff (Platzhalter)	VDSXSB	mrdtkm	5.39	untere
311	BASIS12	V	VD	Sonstiges Fahrzeug (Platzhalter)	VDSXZA	mrdtkm	0	obere

Abbildung 2-5: Informationen zu Begrenzungen aus dem *IKARUS-LP*-Modell

Die Informationen zur Oberstruktur können nicht auf diese Weise behandelt werden. Sie müssen vielmehr vor der Übertragung von Daten zur Verfügung stehen. Dazu werden sie in ASCII-Dateien übertragen, die dann in gleicher Weise wie die Sektorstrukturdaten durch das Transfermodul 7 in *NetWork* übertragen werden können.

## 2.5 Verbindung des *IKARUS-LP*-Modells mit $E^3Net$

Die Anbindung des Energiesystemmodells  $E^3Net$  an das *IKARUS*-Instrumentarium erfolgt durch die Ankopplung von  $E^3Net$  an die als Schnittstelle vorgesehene Datenbank *NetWork* (vgl. Abschnitt 1.4). Im folgenden wird daher dargestellt, wie die Transformation der in *NetWork* gespeicherten Daten in ein für das Optimierungsmodell  $E^3Net$  lesbares Format erfolgt, und wie die Ergebnisse eines Modell-Laufes wieder in *NetWork* eingelesen werden können. Bevor auf die Vorgehensweise bei der Datentransformation eingegangen wird, soll zuerst eine kurze Beschreibung des Modells  $E^3Net$  und der Einbindung in das *MESAP*-Instrumentarium (vgl. Abschnitt 2) erfolgen. Für eine genaue Beschreibung von  $E^3Net$  sei auf /Schaumann, Schweicke 1995/ verwiesen.

$E^3Net$  (**E**nergy, **E**conomy, **E**nvironment System Optimization based on **N**etworks) ist ein flexibles mathematisches Modellschema, mit dem jedes lokale, regionale, nationale oder multinationale Energiesystem in Form eines Systems von linearen Gleichungen und Ungleichungen abgebildet werden kann. Es ist ein mehrperiodisches, lineares Optimierungsmodell, das auf einem prozeßtechnischen Ansatz basiert, bei dem einzelne Anlagen im Energiesystem aggregiert abgebildet werden. Ziel ist die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Energieversorgungsstruktur bei einem vorzugebenden Nutzenergie-/Energiedienstleistungsbedarf und gegebenenfalls energie- und umweltpolitischen Vorgaben. Hierzu erfolgt eine Minimierung der diskontierten Aufwendungen des Energiesystems. Vorrangige Zielsetzung der



Modellentwicklung von  $E^3Net$  ist die flexible Struktur, um eine einfache Anpassung der mathematischen Modellformulierung an die jeweilige Problemstellung zu gewährleisten.

Im  $E^3Net$  Modellgenerator werden Energiesysteme in Form von orientierten Netzwerken abgebildet. Die Zweige des Netzwerkes stehen für Energie- oder Massenflüsse, die Knoten für bestimmte Energieträger, Energieformen oder im allgemeinen Fall für Güter. Knoten ohne Zuflüsse stehen für Ressourcengüter oder für Importgüter des Energiesystems und Knoten ohne Abflüsse für Güter, die in einem festgelegten Umfang von außerhalb des Energiesystems nachgefragt werden (Endnachfragen und Exporte). Die Zweige der orientierten Netzwerke werden als Links bezeichnet, die Knoten als Nodes. Im Unterschied zur *MESAP*-Datenbank *NetWork*, die aus Gründen der Benutzerfreundlichkeit eine prozeßorientierte Sichtweise auf die Daten verfolgt, weist der Modellgenerator aus Gründen der Flexibilität eine flußorientierte Struktur auf (vgl. hierzu auch /Schaumann, Schweicke 1995/). Das sogenannte Mapping dieser beiden Sichtweisen übernimmt das Kommunikationsmodul *E3X/Rimp*.

### 2.5.1 Verbindung von $E^3Net$ zu *NetWork*: *E^3X/Rimp*

Das Energiesystemmodell  $E^3Net$  ist ein in GAMS geschriebenes Modell. Aus diesem Grund ist es notwendig, die zum Ablauf des Modells notwendigen Eingabewerte aus dem ACCESS-Datenbank-Format von *NetWork* (vgl. Abschnitt 1.4) in eine ASCII-Form<sup>4</sup> zu überführen. Zur Kommunikation mit der Datenbank *NetWork* wurden die Transformationsprogramme *E3X* und *Rimp* in der Programmiersprache Visual Basic entwickelt. Aufgabe des Transformationsprogrammes (das im folgenden mit  $E^3X$  bezeichnet wird<sup>5</sup>) ist es daher, die Daten aus der Datenbank *NetWork* in ein für das Modell lesbares Format zu exportieren sowie nach der Berechnung die Ergebnisse wieder in die entsprechenden *NetWork*-Tabellen zu importieren (im folgenden mit *Rimp* bezeichnet<sup>6</sup>). Um dem flußorientierten Charakter des  $E^3Net$ -Modells gerecht zu werden, wurde ein Verfahren eingeführt, mit der die prozeßorientierte Struktur von *NetWork* in die flußorientierte Link-Struktur von  $E^3Net$  überführt werden kann.

Die Spezifikation der Module *E^3X/Rimp* ist in eine lauffähige  $\beta$ -Version umgesetzt. Bei der Umsetzung wurde das Modul in Form eines Assistenten entwickelt, der es dem Anwender ermöglicht, sich - unter Anleitung - schrittweise durch die notwendigen Eingabemasken durchzuarbeiten. Dabei sind folgende Schritte notwendig:

---

<sup>4</sup> ASCII-American Standard Code for Information Interchange; Dateien in diesem Format werden oft zum Austausch verwendet, da sie ein allgemeines Format darstellen.

<sup>5</sup>  $E^3X$  -  $E^3Net$  - Extractor

<sup>6</sup> RImp - **R**esults **I**mporter

- **Angabe allgemeiner Informationen**

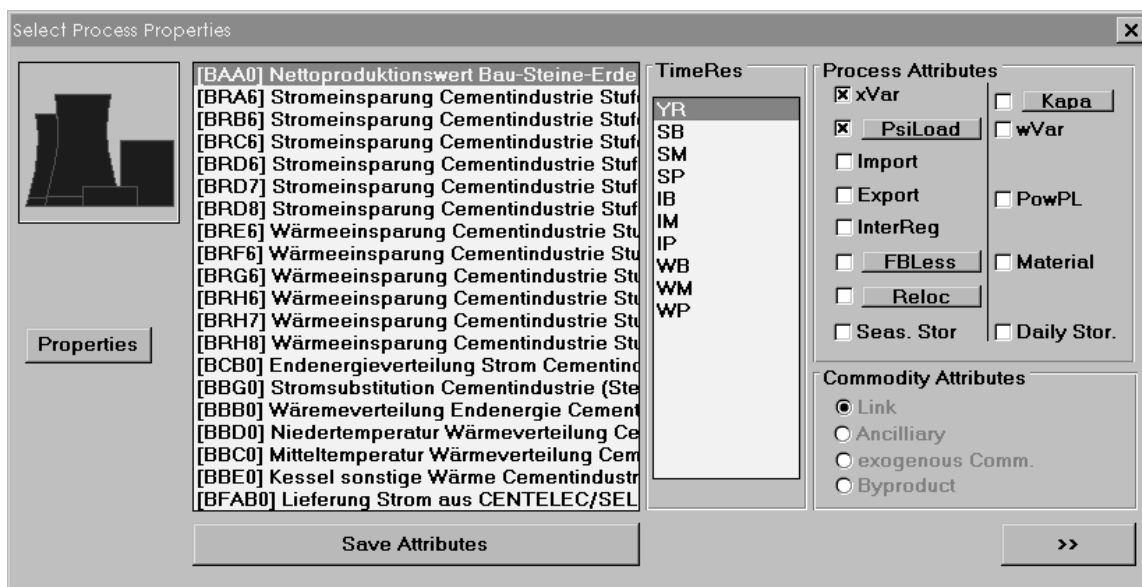
Auswahl der Region und der Hypothese; Auswahl der Modellform, die gerechnet werden soll (Makrokopplung, Dauer-/Ganglinien); Auswahl der Basiseinheiten, in der die Berechnung erfolgen soll.

- **Definition der Objekteigenschaften** (siehe Abbildung 2-6)

Angabe der Eigenschaften der Prozesse und Güter; neben der Angabe der zeitlichen Auflösung der Objekte können den Objekten weitere Eigenschaften zugeordnet werden. Bei Prozessen kann bspw. angegeben werden, ob es sich um einen Import- oder Exportprozeß handelt - diese werden in  $E^3Net$  besonders behandelt. Die Eigenschaften der Güter umfassen - neben der zeitlichen Auflösung - Angaben, ob dem Güterlink eine Variable zugeordnet werden soll, oder ob er lediglich als Vielfaches des Prozeßlinks bestimmt wird, und somit nicht der Optimierung unterliegt.

- **Definition der Lastkurve/Dauerlinie**

Neben der Angabe der zeitlichen Auflösung der RES-Objekte muß definiert werden, wie sich die Dauer- oder Ganglinie zusammensetzt. Dies umfaßt zum einen die Definition der zu betrachtenden zeitlichen Auflösung (Anzahl der Zeitsegmente - dies geschieht in *NetWork*). Zum anderen wird die Zeitsegment-Reihenfolge beschrieben und deren Anteile am Jahr definiert.



**Abbildung 2-6:** Eingabemaske des Programms  $E^3X/Rimp$  zur Definition von Prozeß-Eigenschaften

### 2.5.2 Abstimmungsnotwendigkeiten zwischen den *IKARUS-LP*-Datenbanken

Die zuvor beschriebenen Schritte zur Berechnung einer *IKARUS/NetWork*-Fallstudie mit  $E^3Net$  haben sich im Verlauf der Projektbearbeitung als sehr problematisch herausgestellt. Dies liegt unter anderem an unterschiedlichen Update-Intervallen der beiden Datenquellen (die *IKARUS-LP*-Datenbank weist zum Teil einen neueren Datenstand auf als die *FIZ-LP*-Datenbank) sowie der nicht konsequenten Doppelung der notwendigen Daten in beiden Datenquellen. Dies hat dazu geführt, daß im Rahmen der Projektlaufzeit kein lauffähiges  $E^3Net$ -Modell für die Bundesrepublik Deutschland, das sowohl der Topologie als auch den dazugehörigen Daten des *IKARUS-LP*-Modells entspricht, aufgebaut werden konnte (das z. Zt. existierende Modell ist nicht lösbar).

Allerdings existieren in *MESAP/E<sup>3</sup>Net* weitere Datensätze für die Bundesrepublik Deutschland bzw. für einige Bundesländer, die auf der *IKARUS*-Datenbasis aufsetzen. Diese Ansätze konnten jedoch nicht mit der einfachen softwareseitigen Umsetzung der Informationsübertragung realisiert werden, sondern hierfür mußten viele manuelle Eingriffe erfolgen. Mit diesen Ansätzen konnte jedoch die Funktionsweise und insbesondere die Flexibilität von  $E^3Net$  demonstriert werden.

## 2.6 Fazit

Im Teilprojekt 1 (Integration von  $E^3Net$  in das *IKARUS*-Instrumentarium) wurden neben dem sog. *SQL-Link* zur Anbindung der *IKARUS*-Technik-Datenbank an die *MESAP*-Datenbank *NetWork* Softwaretools entwickelt, die basierend auf der *FIZ-LP*-Datenbank sowie Datenbanken des *IKARUS-LP*-Modells die Erstellung von *MESAP/E<sup>3</sup>Net* kompatiblen Modellen des Energiesystems der Bundesrepublik Deutschland erlauben.  $E^3Net$ -Modelle weisen im Unterschied zum *IKARUS-LP*-Modell folgende Eigenschaften aus:

- Dynamische, zeitintegrale Modellrechnungen,
- regionale Auflösung im gesamten Modellhorizont,
- Modellergebnisse für beliebige Stützjahre bis zum Jahr 2050,
- Flexibilität bei der Erweiterung des *IKARUS*-Standard-RES,
- integrierte makroökonomische Erweiterung (vgl. Kapitel 3),
- Abbildung nichtlinearer Zusammenhänge (vgl. Kapitel 3),
- kumulierte Nebenbedingungen (Ressourcen, kumulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen)

und bereichern somit das Analysespektrum des *IKARUS*-Instrumentariums wesentlich.



## 3 Nichtlineare und makroökonomische Erweiterungen von $E^3Net$

### 3.1 Problemstellung und Zielsetzung

Vorgänge in Realsystemen sind vielfach durch nichtlineare Wirkungsmechanismen gekennzeichnet. In der Abbildung des Verhaltens von Realsystemen in Modellen können eine Mehrzahl dieser Zusammenhänge über eine lineare Darstellung hinreichend genau angenähert werden. Im Rahmen von Systemanalysen tauchen jedoch häufig Fragestellungen auf, in denen die lineare Approximation das Systemverhalten nicht mehr zufriedenstellend abbildet, so daß eine funktionale Beschreibung über nichtlineare Formulierungen der Wirkungsmechanismen erforderlich wird.

Es sollen Fragestellungen aus der Energiewirtschaft analysiert werden, in denen nichtlineare Funktionen für eine sachgerechte Abbildung notwendig sind. Verschiedene Anwendungsgebiete werden identifiziert, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an das Modellsystem stellen. Für ausgewählte Problemstellungen werden die methodischen Erweiterungen diskutiert und die entsprechenden mathematischen Grundlagen zur Lösung der Gleichungssysteme dargestellt.

Die Validierung der Modellsysteme erfolgt im Rahmen einer Fallstudie, in der die zukünftige Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland unter Klimaschutzaspekten analysiert wird. Ausgehend von einer Trendentwicklung werden Szenarien definiert, die einen weiten Bogen möglicher alternativer Zukunftspfade aufspannen. Im Rahmen einer vergleichenden Szenarioanalyse werden die alternativen nichtlinearen Modellansätze mit den linearen Grundversionen hinsichtlich ihres Modellverhaltens gegenübergestellt. Abschließend wird der zusätzliche Erkenntnisgewinn bzw. die höhere Abbildungsgenauigkeit der nichtlinearen Modellansätze mit dem höheren Modellierungsaufwand und den möglichen numerischen Problemen abgewogen.

Nichtlinearitäten treten bei der Beschreibung der Energiewirtschaft sowohl in der Abbildung von physikalisch-technischen Eigenschaften von Prozessen der Energieumwandlung oder Energieanwendung als auch in der Darstellung der ökonomischen Zusammenhänge wie der Nachfrageentwicklung oder der endogenisierten Wirtschaftsentwicklung auf. Prinzipiell sind damit eine Vielzahl möglicher Anwendungen von nichtlinearen Abbildungen in den Modellen der Energiewirtschaft denkbar. Von besonderer Bedeutung sind jedoch Fragestellungen, die sich auf die Entwicklung der Nachfrage bei veränderten energiepolitischen Rahmenbedingungen beziehen, da die Variation des Niveaus der nachgefragten Energiedienstleistungen einerseits einen entscheidenden Einfluß für die letztendliche Nachfrage nach Energieträgern haben und zum anderen in den

bestehenden Ansätzen der prozeßtechnischen Energiemodelle nur unzureichend abgebildet sind.

Ausgehend von einem prozeßtechnischen, linearen Ansatz zur Abbildung von Energiesystemen soll daher die Abhängigkeit der Nachfrage nach Energiedienstleistungen in den bestehenden Ansatz des Modellgenerator  $E^3Net$  (vgl. dazu /Schaumann, Schweike, 1995/) integriert werden. Die verbesserte Darstellung des Nachfrageverhaltens der Konsumenten in prozeßtechnischen Modellansätzen wird auf zwei Ebenen umgesetzt. In einem ersten Schritt werden lediglich preiselastische Nachfragerreaktionen berücksichtigt, im zweiten Schritt wird die Nachfrage in einem totalanalytischen Modellansatz dann vollständig endogenisiert.

Dieses Vorgehen legt nahe, die beiden Teilprojekte *Nichtlineare Modellansätze* und *Makroökonomische Erweiterung* in einem Bericht zusammenzuführen, da beide als Gemeinsamkeit die nichtlineare Formulierung des Optimierungsproblems aufweisen und für die ausgewählte Themenstellung der Fallstudie inhaltlich aufeinander aufbauen.

### **3.2 Methodische Grundlagen nichtlinearer Modellansätze**

Für die in den Zielsetzungen beschriebene Fragestellung der energiewirtschaftlichen Systemanalyse werden im folgenden die notwendigen methodischen Erweiterungen der prozeßtechnischen, linearen Energiesystemmodelle diskutiert und die zugehörigen Lösungsalgorithmen aufgezeigt. Die programmtechnische Integration erfolgt für den Modellgenerator  $E^3Net$  in Form von Gleichungssystemen mit nichtlinearer Zielfunktion sowie der Kombination aus nichtlinearen Restriktionen und nichtlinearer Zielfunktion. Die aufgezeigte thematische Ausrichtung auf die Modellierung des Nachfrageverhaltens steht nur beispielhaft für die allgemeine Formulierung von Nichtlinearitäten in. Sie läßt sich in ihren mathematischen Eigenschaften und Anforderungen auf beliebig andere nichtlineare modelltechnische Abbildung übertragen.

#### **3.2.1 Linearer prozeßtechnischer Ansatz der Energiesystemmodelle**

Energiesystemmodelle sind prozeßanalytische Modelle, die die physikalisch-technischen Prozesse innerhalb der Energiewirtschaft abbilden. Sie dienen als Planungsmodelle für den Energiesektor. Nach dem Konzept des *Referenzenergiesystems* (RES) wird das reale Energiesystem in Form einer Netzwerkabbildung von der Gewinnung der Primärenergie über die Umwandlung, Verteilung und dem Einsatz der Endenergieträger in den Endverbrauchssektoren bis zu deren letztendlicher Transformation zu den

Güternachfragekategorien der Nutzenergie oder Energiedienstleistungen dargestellt. Der Modellansatz entspricht einer speziellen Form des partiellen Gleichgewichtsmodells, in dem das preisabhängige Angebot der Güter auf den jeweiligen Endverbrauchermärkten mit einer fixen Nachfrage zur Deckung gebracht wird und die Preiselastizitäten der Nachfrage zu Null gesetzt werden.

Die linearisierte Beschreibung der Energiewirtschaft über die Technologien der Energiegewinnung, -umwandlung und -bereitstellung, die in ihren Prozesseigenschaften, Investitionen und zugehörigen Kosten abgebildet werden, erlaubt die Formulierung der Versorgungsaufgabe als lineares Optimierungsproblem. Das Zielkriterium der prozeßtechnischen Modellansätze ist das Minimum der Gesamtkosten der Erzeugung für die als Restriktion fest vorgegebenen nachgefragten Mengen an Energiedienstleistungen bzw. Nutzenergieformen. Die intertemporale Formulierung der Zielfunktion hat dann folgende Gestalt:

$$\text{Min. } Z(x,t) = \sum_t \delta \cdot \sum_i c_i(t) \cdot x_i(t) \quad (3-1)$$

unter der Nebenbedingung

$$A \cdot X \leq r$$

$$x_i \geq 0 ; \quad x_i \text{ reell}$$

mit

Z Zielfunktion

x Aktivität der Erzeugungstechnologien

X Vektor der Aktivität der Erzeugungstechnologien

A Koeffizientenmatrix

r Vektor der rechten Seiten

c Grenzkosten der Erzeugung

$\delta$  Diskontfaktor

*Index*

i Laufindex für die Technologien

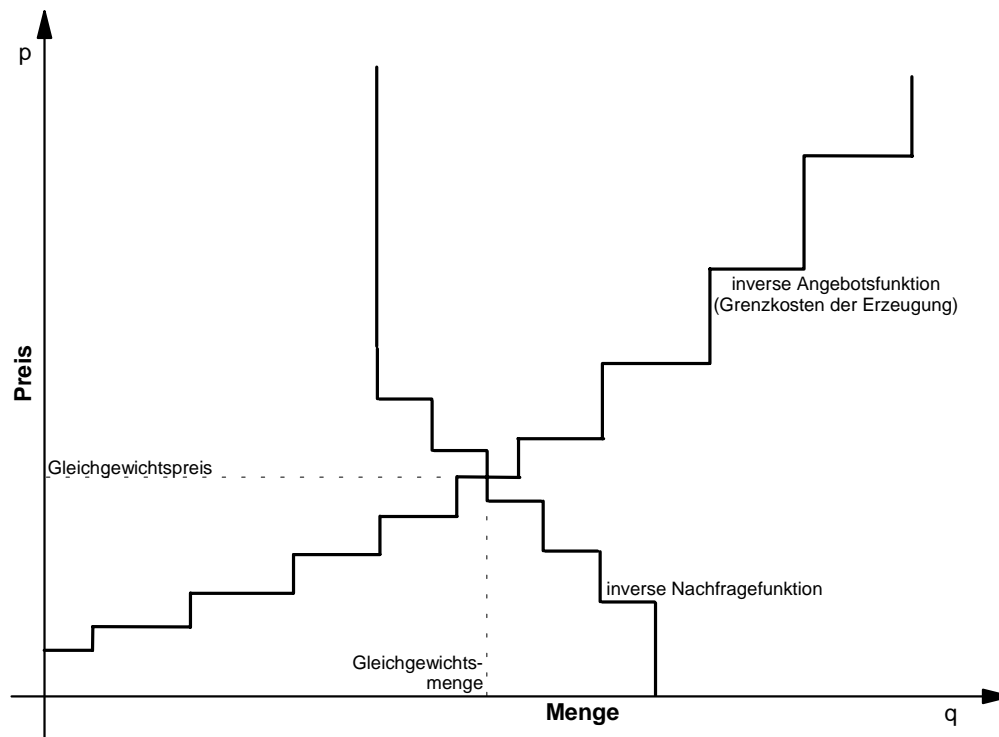
t Laufindex für die Zeit

Die duale Interpretation des Optimierungsproblems führt zu der Grenzkostenkurve der Erzeugung. Sie stellt die inverse Angebotsfunktion dar (vgl. Abbildung 3-1). Der Verlauf der inversen Angebotsfunktion ergibt sich als Stufenfunktion aus der linearen Beschreibung des Energiesystems, wobei das Niveau der einzelnen Stufen von den jeweiligen marginalen Kosten der Bereitstellung für die entsprechenden Nachfragekategorien bestimmt wird.

Der prozeßtechnische *Bottom up*-Ansatz der Energiesystemmodelle erlaubt auf der Angebotsseite einen hohen Detaillierungsgrad, der auf der Nachfrageseite eine fest vorgege-

bene Menge der Güternachfrage entgegensteht. Während die letztendliche Nachfrage nach Energiedienstleistungen (bzw. Nutzenergie) unelastisch bleibt, können auf den vorgelagerten Stufen der Nachfragesektoren explizite technologische Maßnahmen in das Referenzenergiesystem aufgenommen werden, so daß es in den Energiesystemmodellen auf der Ebene der Endenergie zu preisinduzierten Anpassungsreaktionen kommen kann. Mögliche Optionen der preisinduzierten Änderungen der Endenergienachfrage sind u. a.:

- Energieträger-Substitution,
- Prozeß-Substitution,
- Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz (Substitution von Prozessen) oder
- technischen Maßnahmen zur Verminderung des Nutzenergiebedarfes (u. a. Maßnahmen an der Gebäudehülle im Raumwärmesektor)



**Abbildung 3-1:** Gleichgewichtszustände in einem linearen Energiesystemmodell mit preisinduzierter Energienachfrage

Die Modellierung dieser preisinduzierten, technischen Optionen ermöglicht die Darstellung der Nachfragefunktion auf der Ebene der Nutzenergie in einem bestimmten Intervall als eine lineare Stufenfunktion anstelle einer vertikalen Gerade, die eine Situation ohne jegliche preisinduzierte Nachfrageänderungen beschreibt. Das Niveau der nachgefragten Energiedienstleistung bleibt unverändert, lediglich die Aufwendungen auf der Ebene der



Nutzenergie, die für die Deckung dieser Energiedienstleistung notwendig sind, können reduziert werden.

### 3.2.2 Partialanalytischer Gleichgewichtsansatz

Aus wirtschaftstheoretischen Überlegungen folgt, daß mit einem Anstieg der Preise für die Bereitstellung von Energiegütern das Bestreben der Verbraucher größer wird, die Nachfrage einzuschränken. Eigenpreiselastische Nachfragefunktionen beschreiben die Güternachfrage in Abhängigkeit ihres Preises unter *ceteris paribus* Bedingungen. Die Integration von Preiselastizitäten der Nachfrage in Energiesystemmodellen erlaubt damit die Formulierung der Nachfrage als abhängige Variable des Preises. Der methodische Ansatz erfüllt dann vollständig die Kriterien eines partiellen Gleichgewichtsansatzes für den Energiesektor.

Partialanalytische Gleichgewichtsansätze untersuchen Marktformen, die sich auf Gleichgewichtszustände von Einzelmärkten beschränken und dabei die Wechselwirkungen des untersuchten Teilssektors zu der übrigen Volkswirtschaft unberücksichtigt lassen. Das Verhalten der Wirtschaftssubjekte wird durch die idealtypischen Annahmen des vollkommenen Marktes bestimmt.

Die mathematische Formulierung ist von der Beschreibung der zugehörigen Angebots- und Nachfragefunktionen abhängig, wobei insbesondere die Form der Nachfragefunktion als Abbildung des angenommenen Konsumentenverhalten von Bedeutung ist. Unter der Prämisse, daß die Veränderung der Nachfrage im wesentlichen durch eine Preisänderung des betreffenden Gutes bestimmt wird, sind die partialanalytischen Gleichgewichtsprobleme integrierbar<sup>7</sup> und können über Optimierungsansätze gelöst werden.

Die Güternachfrage des repräsentativen Verbrauchers befindet sich im Gleichgewicht zum Güterangebot des Produzenten. Der Gleichgewichtspreis entspricht den marginalen Produktionskosten des Angebots bzw. der Zahlungsbereitschaft der Konsumenten (*willingness-to pay*). Abbildung 3-2 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang von Angebot und Nachfrage eines Gutes für einen betrachteten Zeitpunkt.

Die inverse Angebotsfunktion spiegelt die marginalen Produktionskosten wider, die aus einem prozeßtechnischen Modell mit einer detaillierten Abbildung der Erzeugungstechnologien ermittelt werden kann. Sie kann weiterhin über einer lineare Stufenfunktion angenähert werden, sofern die prozeßtechnische Beschreibung des Energiesystems als lineares Optimierungsproblem einer Kostenminimierung formuliert ist. Das Niveau der jeweiligen Stufen entspricht dann genau den marginalen Kosten der Erzeugung.

---

<sup>7</sup> Die Integrierbarkeit der inversen Nachfragefunktion ist nur dann gegeben, wenn die Kreuzpreiselastizitäten symmetrisch sind (vgl. hierzu /Takayama, Judge, 1971/).

Die Ermittlung des Marktgleichgewichts erfolgt gleichzeitig für alle nachgefragten Güter durch einen Optimierungsansatz. Das Zielkriterium des nichtlinearen Optimierungsproblems stellt das *Economic Surplus* dar, das sich aus der Differenz der Integrale der inversen Angebots- und Nachfragefunktion ergibt. Es erreicht ein Maximum, wenn Güterangebot und -nachfrage im Gleichgewicht stehen. Durch das Einsetzen der Grenzkostenfunktion der Erzeugung in die inverse Angebotsfunktion und einer eigenpreiselastischen Formulierung für die inverse Nachfragefunktion kann die Zielfunktion des partiellen Gleichgewichts gemäß Gleichung 3-2 aufgestellt werden.

$$\text{Max. } W(q) = \int \left[ q_0 \cdot \left( \frac{p(q)}{p_0} \right)^\varepsilon \right] \cdot dq - \sum_i c_i \cdot x_i(q) \quad (3-2)$$

mit

W *Economic Surplus*, Zielfunktion des partiellen Gleichgewichts

c Grenzkosten der Erzeugung der Technologie i

x Aktivität der Technologie i

p Preisfunktion

q Gütermenge

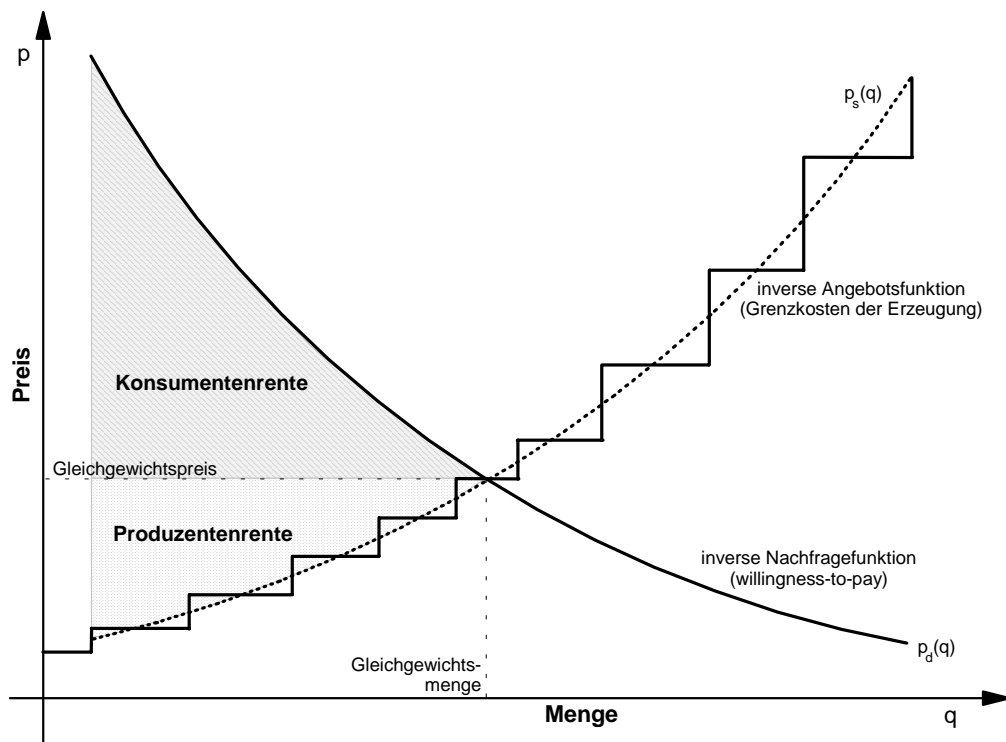
$q_0$  Referenzmenge

$p_0$  Referenzpreis

$\varepsilon$  Eigenpreiselastizität

*Index*

i Laufindex für die i-te Technologie



**Abbildung 3-2:** Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage in einem prozeßtechnischen partiellen Gleichgewichtsansatz

Die nachgefragte Menge  $q$ , die in den prozeßtechnischen Ansätzen exogen vorgegeben wird, ist damit in dem partialanalytischen Ansatz zu einer Entscheidungsvariablen geworden. Für negative Zahlenwerte der Eigenpreiselastizität  $\varepsilon$  sind die inversen Nachfragefunktionen streng monoton fallend und es kann gezeigt werden, daß die resultierende nichtlineare Zielfunktion konvex ist. Dies ist für die Auswahl des Lösungsverfahrens von entscheidender Bedeutung. Sämtliche Randbedingungen können weiterhin linear formuliert werden.

Die preiselastische Abbildung der Nachfrage stellt mögliche Nachfrageänderungen für Kurzzeit-Elastizitäten dar, die jeweils nur in der betrachteten Zeitperiode gelten. In einem intertemporalen partiellen Gleichgewichtsansatz summiert die Gesamtzielfunktion des Optimierungsproblems alle betrachteten Zeitschritte auf. Die Referenzpreise und -mengen sind daher ebenso wie die Preiselastizität der Nachfrage zeitabhängig und müssen für jeden Zeitschritt gesondert spezifiziert werden.

### 3.2.3 Intertemporaler Gleichgewichtsansatz in der Energiewirtschaft

Neben dem Preis haben weitere Faktoren entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung der nachgefragten Gütermenge. Hierzu gehören insbesondere die volkswirtschaftliche Entwicklung

und verfügbare Einkommen der Haushalte. Die vollständige Endogenisierung der Nachfrageentwicklung ist lediglich in einem totalanalytischen Ansatz garantiert, der die gesamte Volkswirtschaft als Gleichgewichtssystem beschreibt. Ein solcher allgemeiner Gleichgewichtsansatz ist in Form eines Optimierungsansatzes auf Basis des prozeßtechnischen Modellgenerators  $E^3Net$  entwickelt worden und wird im weiteren als  $E^3Macro$  bezeichnet.

$E^3Macro$  ist ein gekoppeltes Energie-Wirtschaftsmodell, das ein intertemporales Gleichgewicht zwischen der Energienachfrage und dem Energieangebot herstellt. Als langfristiges Planungsmodell dient es der Bestimmung der Energienachfrage sowie der zugehörigen Struktur der Energieversorgung. Die Substitutionsprozesse der volkswirtschaftlichen Inputfaktoren sowie die Investitionsentscheidungen innerhalb des Energiesektors erfolgen unter der Annahme einer vollkommenen Voraussicht der Marktteilnehmer.  $E^3Macro$  besteht aus einer prozeßtechnischen Komponente, die die technologische Struktur des Energiesektors abbildet, und einer makroökonomischen Komponente, die die Entwicklung der übrigen Volkswirtschaft beschreibt.

Die makroökonomische Komponente ist wirtschaftstheoretisch als ein neoklassisches Wachstumsmodell zu klassifizieren, in dem sich zu jedem Betrachtungszeitraum das Angebot und die Nachfrage im Gleichgewicht befinden. Die Volkswirtschaft wird als ein geschlossenes Einsektorenmodell mit einem repräsentativen Konsumenten/Produzenten-Paar dargestellt. Das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage wird durch den Marktpreis hergestellt. Es werden perfekte Marktbedingungen unterstellt, wobei die Grenzkosten der Produktion genau der Zahlungsbereitschaft der Verbraucher für die produzierten Güter entsprechen.

Die Entwicklung des intertemporalen volkswirtschaftlichen Wachstums wird über eine Produktionsfunktion beschrieben, die den Zuwachs an wirtschaftlichem Output ausschließlich durch die Veränderung der jeweiligen Einsatzfaktoren Kapital, Arbeit und Energie erklärt. Das Verhältnis der Inputfaktoren wird durch eine intertemporale CES-Funktion (*constant elasticity of substitution*) beschrieben, die aus zwei miteinander verschachtelten Hauptkomponenten besteht (vgl. Gleichung 3-3). Die erste Komponente stellt den Zusammenhang der Substitution zwischen den Einsatzfaktoren Kapital und Arbeit in Form einer *Cobb-Douglas* Funktion dar, der zweite Term den Einsatzfaktor Energie als die aggregierte Summe unterschiedlicher Nachfragekategorien des Energiesektors, die im prozeßtechnischen Modellteil abgebildet werden.

$$Y_t = \left[ a \cdot K_t^{\alpha \cdot \rho} \cdot L_t^{\rho(1-\alpha)} + \sum_m b_m \cdot D_{t,m}^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} \quad (3-3)$$

mit

Y Volkswirtschaftliche Produktion

K Kapital

L Arbeit

- D Energienachfrage als Produktionsfaktor
- a Koeffizient
- b Koeffizient
- $\alpha$  partielle Produktionselastizität des Kapitals
- $\rho$  Substitutionskonstante

*Index*

- t Laufindex für die Zeit
- n Laufindex für die Nachfragekategorien des Energiesektors

Die langfristige Wachstumsrate der Wirtschaft wird maßgeblich über die Zunahme der Arbeitsproduktivität bestimmt, die in Form eines Effizienzfaktors exogen vorgegeben wird. Diese Wachstumsrate stellt das *potentielle* Wachstum der volkswirtschaftlichen Produktion dar und unterscheidet sich damit von der *tatsächlichen* Wachstumsrate, die modellendogen bestimmt wird. Das Zielkriterium des allgemeinen Gleichgewichtsansatzes ist die intertemporale Nutzenmaximierung des repräsentativen Verbrauchers. Dabei kann sich der Verbraucher zu jedem Zeitpunkt entscheiden, ob er den volkswirtschaftlichen Output für den gegenwärtigen Konsum verwenden möchte oder in Form von Investitionen ansparen will, die ihm dann für den zukünftigen Konsum zur Verfügung stehen (vgl. Gleichung 3-4). Gleichzeitig muß der Verbraucher Zahlungen an den Energiesektor in Form von Energiekosten bestreiten, für die er die Energiedienstleistungen für die Güterproduktion beziehen kann.

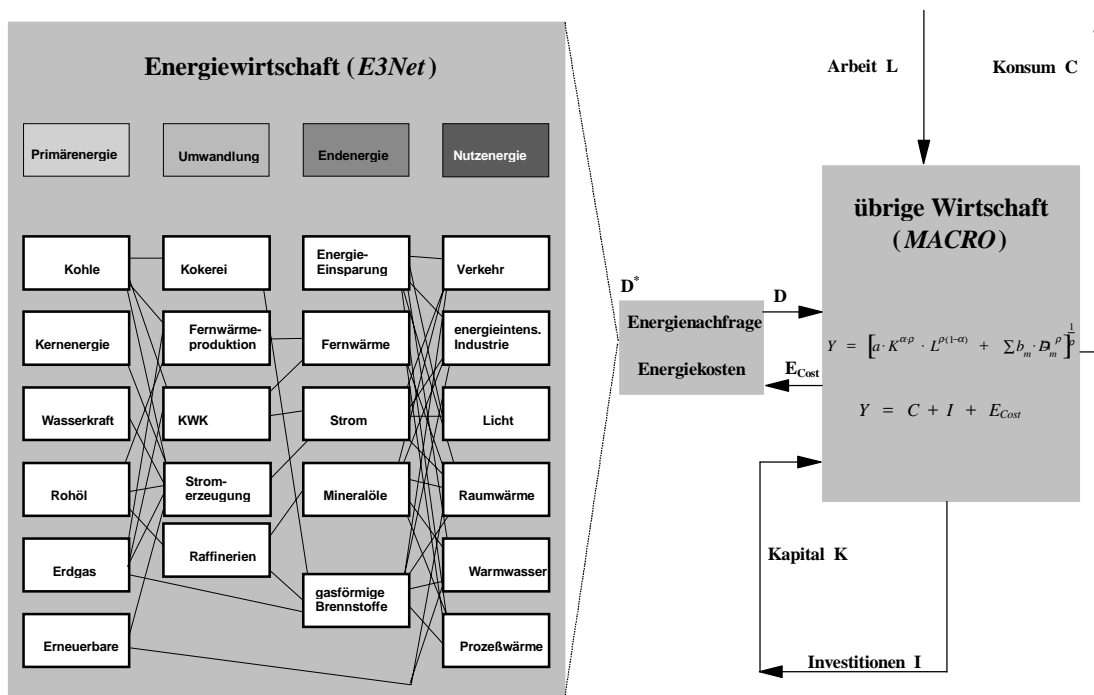
$$\ln C_t = \ln \left[ \left( a \cdot K_t^{\alpha \cdot \rho} \cdot L_t^{\rho \cdot (1-\alpha)} + \sum_m b_m \cdot D_{t,m}^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} - I_t - E_{\text{cost}, t} \right] \quad (3-4)$$

mit

- C Volkswirtschaftlicher Konsum
- I Investitionen
- E Energiekosten
- alle übrigen Größen wie in Gleichung (3-3)

Die Bereitstellung der Energiedienstleistungen erfolgt durch eine separate Modellierung in der prozeßtechnischen Komponente, die eine detaillierte technologische Beschreibung des Energiesektors darstellt. Die prozeßtechnische und makroökonomische Komponente sind fest über das Nachfrageniveau der Energiedienstleistungen und den zugehörigen Kosten für deren Bereitstellung gekoppelt ist (siehe Abbildung 3-3). Diese Kopplung (*hard linking*) garantiert die Konsistenz der Verbindung zwischen Energiesektor und übriger Volkswirtschaft. Das Gleichungssystem des gekoppelten Systems besteht aus einer konvexen, nichtlinearen Zielfunktion sowie den nichtlinearen Nebenbedingungen der

makroökonomischen Komponente und den linearen Restriktionen der prozeßtechnischen Komponente.



**Abbildung 3-3:** Kopplung einer prozeßtechnischen mit einer makroökonomischen Komponente in einem allgemeinen Gleichgewichtsansatz

Die Entkopplung des Wachstums der Energienachfrage von der Entwicklung der übrigen Volkswirtschaft kann grundsätzlich in drei Komponenten unterteilt werden:

- Verbesserung der Umwandlungseffizienz des gesamten Energieversorgungssystems,
- Einsatz von Technologien zur rationellen Energieanwendung und Energieeinsparung auf der Nachfrageseite sowie einem
- wirtschaftlichen Strukturwandel, autonomen technischen Fortschritt und der Änderung des Konsumverhaltens der Verbraucher.

Die ersten beiden Komponenten der Entkopplung sind mit ihren Kosten und Einsparpotentialen detailliert in der prozeßtechnischen Komponente ( $E^3Net$ ) abgebildet, so daß die Entwicklung der Umwandlungseffizienz des Energiesystems berücksichtigt werden kann. Der wirtschaftliche Strukturwandel und der autonome, nicht preisinduzierte technische Fortschritt sowie die Änderung des Konsumverhaltens des repräsentativen Verbrauchers werden über einen Koeffizienten der Nachfrageentkopplung (*demand decoupling factor*) festgelegt, getrennt für die jeweiligen Nachfragekategorien und Zeitabschnitte.

### 3.2.4 Lösungsalgorithmen nichtlinearer Optimierungsprobleme

Ein nichtlineares Optimierungsproblem liegt vor, wenn die Zielfunktion oder die in den Nebenbedingungen vorkommenden Funktionen der Entscheidungsvariablen nicht mehr sämtlich lineare Gleichungen darstellen. Je nach der Art der funktionalen Beschreibung des Gleichungssystems aus Zielfunktion und Nebenbedingungen lassen sich die nichtlinearen Optimierungsprobleme in verschiedene Kategorien unterteilen.

Eine wesentliche Unterscheidung ist die Beschränkung des Lösungsraums durch die Restriktionen, nach der eine Einordnung der Gleichungssysteme in die Klasse der *restringierten* und der *unrestringierten* Optimierungsprobleme erfolgt. Nichtlineare Probleme in der Energiewirtschaft gehören zu der Klasse der *restringierten Optimierungsaufgaben*, deren zulässiger Bereich durch die Gleichungen bzw. Ungleichungen der Randbedingungen eingegrenzt wird.

Eine spezielle Klasse von restringierten Optimierungsproblemen stellen die *konvexen Optimierungsprobleme* dar, bei denen der zulässige Bereich eine konvexe Menge ist. Für konvexe Optimierungsprobleme fallen lokale und globale Optima zusammen, so daß die Eindeutigkeit der Lösung gegeben ist. Damit stellt die Konvexität des Lösungsraums eine wesentliche Voraussetzung für die Formulierung nichtlinearer Optimierungsaufgaben in der Energiewirtschaft dar.

In der nichtlinearen Optimierung gibt es kein Standardverfahren, wie etwa der Simplex-Algorithmus in der linearen Programmierung, der prinzipiell alle Optimierungsprobleme in zufriedenstellender Weise lösen kann. Daher sind für verschiedene Klassen nichtlinearer Optimierungsprobleme geeignete Lösungsverfahren entwickelt worden, die die speziellen Eigenschaften des jeweiligen Problemtyps ausnutzen. Für die hier betrachteten restringierten Optimierungsprobleme können im wesentlichen vier verschiedene Lösungsverfahren unterschieden werden:

- Verfahren der zulässigen Richtungen (*method of feasible direction*)
- Verfahren der Straffunktion (*method of penalty function*)
- Schnittebenenverfahren (*method of gradient projection*)
- Karush-Kuhn-Tucker-Methode

Während sich das *Verfahren der zulässigen Richtung* hauptsächlich für Probleme mit linearen Restriktionen eignet, können die übrigen Verfahren auch Nichtlinearitäten in den Nebenbedingungen berücksichtigen. Das *Verfahren der Straffunktion* wird insbesondere dann verwendet, wenn lediglich die Nebenbedingungen des Gleichungssystems nichtlinear sind. Die *Methoden des Schnittebenenverfahrens* eignet sich für Optimierungsprobleme mit nichtlinearer Zielfunktion und nichtlinearen Nebenbedingungen, die Konvergenz des Lösungsalgorithmus ist mitunter jedoch langsam. Für die Verwendung der *Karush-Kuhn-Tucker-Methode* muß als notwendige Voraussetzung die stetige Differenzierbarkeit und

Konvexität der Lagrange-Funktion des Optimierungsproblems erfüllt sein, die aus den Gleichungs- bzw. Ungleichungssystem des nichtlinearen Problems gebildet werden kann.

Die Wahl des Lösungsverfahrens für die Erweiterung von  $E^3Net$  um nichtlineare Modellansätze ist durch die in der Programmiersprache GAMS derzeit verfügbare Software vorgegeben. Diese Einschränkung erscheint zunächst nachteilig. Da die betreffenden Programme jedoch auf unterschiedlichen Verfahren beruhen, stehen unter GAMS alle wichtigen nichtlinearen Lösungsverfahren zur Verfügung. Bei den unter GAMS lauffähigen Optimierungsinstrumenten handelt es sich um die Programme MINOS /Murtagh, Saunders 1983/, CONOPT /Drud 1992/ und OSL /Wilson 1991/. Eine mathematische Beschreibung der Lösungsverfahren findet sich in /Kühner, Schaumann 1996/.

MINOS verwendet für Probleme mit nichtlinearer Zielfunktion und linearen Restriktionen eine Kombination aus einem *Algorithmus der reduzierten Gradienten* (RG), einem *Quasi-Newton-Algorithmus* und einer *Strategie der aktiven Mengen*. Zur Behandlung von Problemen, bei denen nicht nur die Zielfunktion, sondern auch ein Teil der Restriktionen nichtlinear ist, wird ein *Lagrange-Erweiterungs-Projektions-Verfahren* benutzt.

CONOPT basiert auf dem *verallgemeinerten Verfahren des reduzierten Gradienten* (GRG). Alle Matrixoperationen sind so implementiert, daß sie sich zur Behandlung von Modellformulierungen mit vielen oder mit hochgradigen nichtlinearen Gleichungssystemen eignen. CONOPT kann auch auf Probleme mit nicht differenzierbaren Restriktionen angewendet werden.

Die *IBM Optimization Subroutine Library* (OSL) gestattet lediglich die Behandlung einer speziellen Klasse von nichtlinearen Optimierungsproblemen, nämlich solchen mit linearen Restriktionen und konvexer quadratischer Zielfunktion. OSL verwendet das *Verfahren der sequentiellen linearen Programmierung* (SLP) und das *Verfahren der aktiven Mengen*.

Für die hier aufgezeigten nichtlinearen Erweiterungen wurde im wesentlichen auf das Programm MINOS zurückgegriffen, da die Matrizen der Optimierungsprobleme für die Fallstudie (vgl. Abschnitt 3.4) sehr groß sind und das Verhältnis von nichtlinearen zu linearen Gleichungen klein ist. Im Verhältnis zu CONOPT erwies sich der Lösungsalgorithmus von MINOS als erheblich effizienter.

### 3.3 Rahmendaten und Definition der Szenarien

Die Unterschiede im Modellverhalten mit den zuvor diskutierten methodischen Erweiterungen werden anhand einer Fallstudie für die Bundesrepublik Deutschland für unterschiedliche Szenarien analysiert. Die Definition der Szenarien ist so gewählt, daß ein möglichst großes Spektrum denkbarer zukünftiger Entwicklungen abgedeckt wird. Allen Szenarien liegt ein Satz



gemeinschaftlicher Rahmenannahmen für die zukünftige Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2020 zugrunde. Sie betreffen im wesentlichen die Projektionen der demographischen und ökonomischen Entwicklung sowie Annahmen für die Preisentwicklung auf den internationalen Energiemärkten. Die ökonomischen Rahmenannahmen stellen für den linearen Ansatz die tatsächliche Projektion der Wirtschaftsentwicklung dar, während sie für den allgemeinen Gleichgewichtsansatz lediglich bei der Kalibrierung der Trendentwicklung zur Anwendung kommen.

Für das Rohöl wird ein realer Weltmarktpreis von 25 \$<sub>89</sub>/bbl im Jahre 2005 und 34 \$<sub>89</sub>/bbl im Jahr 2020 unterstellt. Gegenüber 1991 bedeutet dies eine jährliche Preissteigerung von 2,0 %. Die Preisrelation zum Importpreis für Erdgas verschiebt sich nach 2010 zu Ungunsten des Erdgases. Für die Importsteinkohle wird ein nur mäßiger Preisanstieg angenommen, der bis 2020 etwa 0,6 % pro Jahr beträgt. Die Annahmen zur demographischen Entwicklung unterstellen für den Zeitraum bis 2020 eine im wesentlichen unveränderte Bevölkerungszahl von etwa 80 Mio. Einwohnern in Deutschland. Die zugehörige Wohnfläche steigt im Betrachtungszeitraum um etwa 0,6 % pro Jahr. Für die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes wird ein jährliches Wachstum von etwa 2,5 % bis zum Jahr 2005 und von 2,1 % in der Periode 2005 bis 2020 angenommen.

Die oben aufgeführten Rahmenannahmen stellen eine Entwicklung der Volkswirtschaft dar, die weitestgehend dem Trend der letzten Jahre entspricht. Die Fortführung der bisherigen Energie- und Umweltpolitik wird durch das *Trendszenario* beschrieben. Es unterstellt Mindestabnahmen heimischer Braun- und Steinkohle sowie eine Nutzung der Kernenergie auf heutigem Niveau. Die wirtschaftlichen Potentiale der Energieeinsparungen werden aufgrund von Hemmnissen in nur eingeschränktem Umfang im Markt umgesetzt. In diesem *Trendszenario* wird keine gezielte zusätzliche Klimaschutzpolitik betrieben. Dem *Trendszenario* werden drei alternativen Entwicklungen vergleichend gegenübergestellt:

- No-Regret-Szenario oder Referenzszenario
- Emissionsminderung unter Hemmnissen (M1)
- Emissionsminderung ohne Hemmnisse (M2)

Das *No-Regret-Szenario* stellt eine Least-Cost-Entwicklung für die Bundesrepublik Deutschland dar. Gegenüber dem Trendszenario entfallen die Mindestabnahmebedingungen für die heimische Kohle und die Markthemmnisse der wirtschaftlichen Einsparpotentiale treten nicht auf. Auch im *No-Regret-Szenario* wird keine gezielte zusätzliche Klimaschutzpolitik unterstellt. Das *No-Regret-Szenario* kann damit die Bereitstellung der Energiedienstleistungen zu verringerten Kosten erreichen, so daß Auswirkungen auf die Nachfrageentwicklung der erweiterten Modellansätze zu erwarten sind.

Die beiden *minderungszielorientierten Szenarien* untersuchen eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland gemäß den Vorgaben der Bundesregierung von 25 % bis

zum Jahr 2005 und den Empfehlungen der Enquete-Kommission von 50 % bis zum Jahr 2020. Sie unterscheiden sich in ihren Annahmen zur heimischen Kohle und Kernenergiepolitik: Das *Emissionsminderung ohne Hemmnisse* beinhaltet keinerlei Vorgaben für die Rolle der Kernenergie und die Mindestabnahmeverpflichtungen für die heimischen Kohlen entfallen; das *Emissionsminderung unter Hemmnissen* beinhaltet ein Moratorium für die Kernenergie bis zum Jahr 2005 und hält an den Mindestabnahmebedingungen für die heimische Kohle fest. Beide Szenarien werden die Kosten für die Energiebereitstellung gegenüber dem Trendszenario erhöhen, so daß auch hier eine Veränderung der Nachfrageentwicklung in den erweiterten Modellansätzen zu erwarten ist.

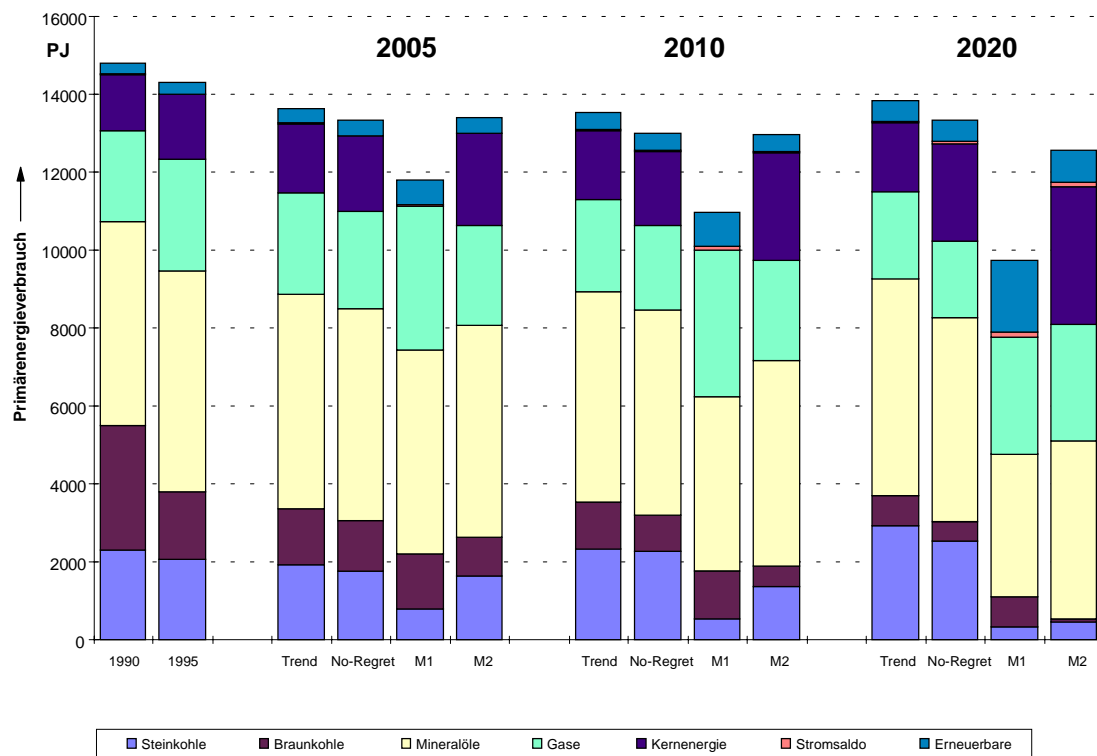
### **3.4 Ergebnisse der Fallstudie für Deutschland**

Die modelltechnischen Erweiterungen werden im Rahmen einer Fallstudie für die Bundesrepublik Deutschland untersucht. Der zusätzliche Informationsgewinn durch die partialanalytische Betrachtung einerseits und die gesamtwirtschaftliche Einbettung andererseits wird durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse zu den herkömmlichen, prozeßtechnischen Modellansätzen aufgezeigt. Dazu werden zunächst die Ergebnisse der Szenarioanalyse mit dem bestehenden Ansatz der prozeßtechnischen Energiesystemmodelle vorgestellt und im Anschluß die Veränderungen der erweiterten nichtlinearen Ansätze diskutiert.

### 3.4.1 Treibhausgasminderungsstrategien in Energiesystemmodellen

Im *Trendszenario* setzt sich die Entwicklung der sinkenden Energieintensitäten aus den vergangenen Jahre fort, so daß trotz einer Verdopplung des Bruttoinlandsproduktes bis zum Jahr 2020 der Primärenergieverbrauch auf annähernd konstantem Niveau bleibt (siehe Abbildung 3-4). Die Struktur der Energieträger ist gegenüber 1990 weitestgehend unverändert mit Ausnahme der Importsteinkohle, die zunehmend die heimische Braunkohle substituiert. Wichtigster Primärenergieträger bleibt weiterhin das Mineralöl mit einem Anteil von etwa 40 %, gefolgt von den Kohlen (gut 25 %) und den Gasen (ca. 20 %). Der Anteil der Erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch verdoppelt sich für den Betrachtungszeitraum und erreicht im Jahr 2020 einen Anteil von knapp 4 %.

Veränderte energiepolitische Rahmenbedingungen führen zu deutlich unterschiedlichen Entwicklungen im Energiesektor. Die Differenzen in der Höhe des Primärenergieverbrauchs lassen sich einerseits durch die unterschiedliche Ausschöpfungstiefe der Maßnahmen zur Energieeinsparung in den Endverbrauchssektoren und andererseits durch die Substitutionsmöglichkeiten im Umwandlungssektor erklären. Die größte Verringerung des Primärenergieverbrauchs wird für das *Minderungsszenario MI* (minus 30 % gegenüber *Trend* in 2020) erzielt, das eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50 % bis 2020 bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernenergie erzielt.



**Abbildung 3-4:** Primärenergieverbrauch nach Energieträgern für Deutschland im Szenarienvergleich nach dem linearen Energiesystemmodellansatz

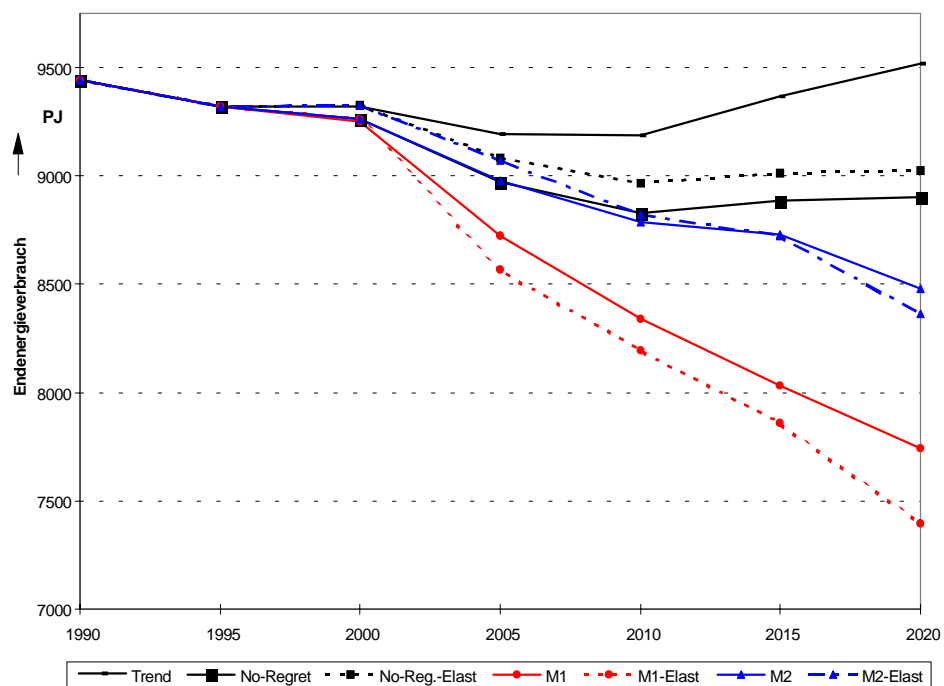
Ohne energiepolitische Vorgaben zur Rolle der Kernenergie oder dem Mindesteinsatz heimischer Stein- und Braunkohle (*Minderungsszenario M2*) kann das Minderungsziel zu deutlich verringerten Kosten erzielt werden, so daß die kostenintensiven Maßnahmen zur Energieeinsparung nicht zum Einsatz kommen und der Primärenergiebedarf damit lediglich um knapp 10 % gegenüber der *Trendentwicklung* sinkt. Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs unter *No-Regret*-Bedingungen verläuft ebenfalls unterhalb der *Trendentwicklung*, da insbesondere die wirtschaftlichen Maßnahmen zur Energieeinsparung ungehemmt den Markt durchdringen und so zu einer deutlichen Absenkung des Endenergiebedarfs führen.

### 3.4.2 Auswirkungen preiselastischer Nachfrageänderungen

Die in Abbildung 3-4 aufgezeigten Entwicklungen sind im Rahmen von Szenarioanalysen mit Energiesystemmodellen ermittelt worden, in denen eine preisunelastische Nachfrage unterstellt ist. Hier haben die deutlich unterschiedlichen Kosten für die Bereitstellung der Nachfrage in den jeweiligen Szenarien keine Auswirkungen auf die tatsächliche Höhe der nachgefragten

Energiedienstleistungen. Im Gegensatz dazu zeigt die Nutzung des im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelnden Modellansatzes mit eigenpreiselastischem Nachfrageverhalten, daß die von veränderten Preisen ausgehenden Signale die Nachfrage merklich beeinflussen können.

In der *Trendentwicklung* entsprechen die in den Randbedingungen des linearen Prozeßmodells vorgegebenen Nachfragehöhen den Gleichgewichtsmengen. Das *Trendszenario* stellt damit die *Benchmark-Entwicklung* für die übrigen Szenarien dar (vgl. Abbildung 3-5).



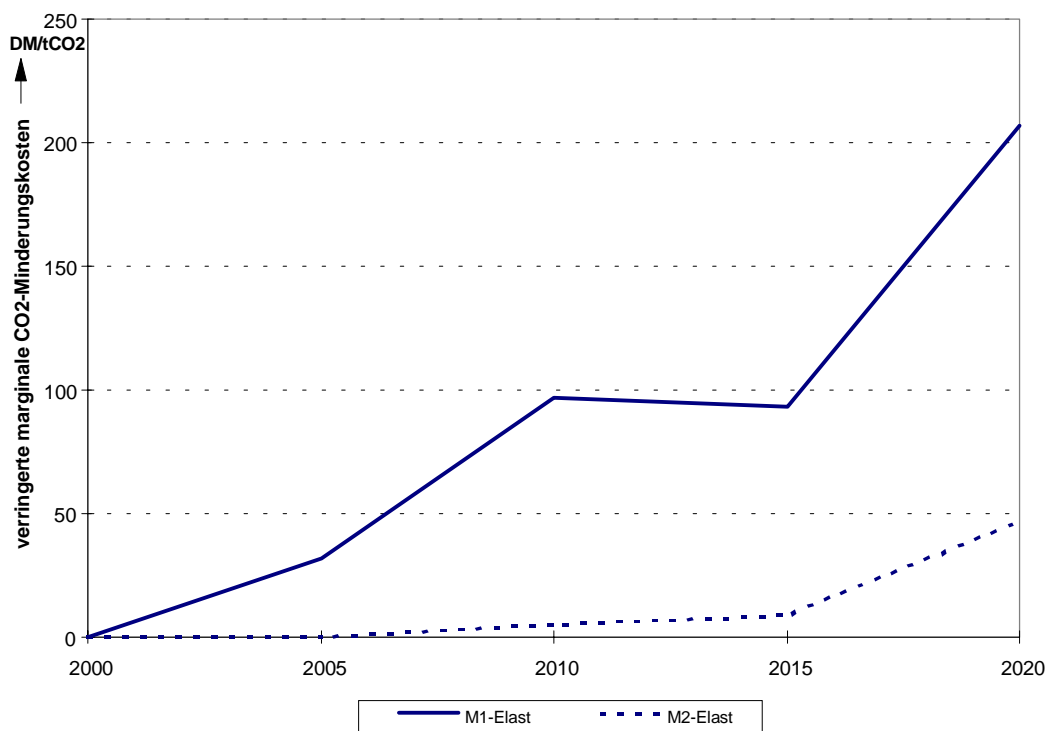
**Abbildung 3-5:** Auswirkungen der Berücksichtigung preiselastischer Nachfragerreaktionen für den Endenergieverbrauch im Szenariovergleich

Im *No-Regret-Szenario* sinken die Kosten der Energiebereitstellung durch die aufgehobenen Vorgaben für den Mindesteinsatz heimischer Kohlen und für die Beschränkung der Kernenergiekapazitäten. Für eine exemplarisch unterstellte Eigenpreiselastizität von  $\varepsilon = -0,3$  sowohl für die Raumwärmenachfrage im Haushalt als auch für die Personenverkehrsnachfrage auf der Energiedienstleistungsebene erhöht sich die Endenergienachfrage um knapp 1,5 % gegenüber der preisunelastischen Abbildung, wie ein Vergleich der beiden Fälle *No-Regret* und *No-Reg.-Elast* in Abbildung 3-5 zeigt. Die gewählte Höhe der Elastizität entspricht einer mittleren Abschätzung für die kurzfristige

Preiselastizitäten der Nachfrage auf der Ebene der Energiedienstleistung (vgl. hierzu /Wietschel 1994/).

Der gegensätzliche Effekt tritt auf, wenn sich die Bereitstellungskosten der Energienachfrage gegenüber der Trendentwicklung erhöhen wie im *Minderungsszenario M1*. Das CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel von 25 % im Jahr 2005 bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernenergie bewirkt ein Absinken des Endenergieverbrauchs um knapp 2 % für 2005. Das CO<sub>2</sub>-Minderungsziel von 50 % im Jahr 2020 führt zu einer Verringerung des Endenergieverbrauchs von 4,5 % im selben Jahr. Demgegenüber unterscheidet sich der Endenergieverbrauch im *Minderungsszenario M2* wegen der vergleichsweise geringen Minderungskosten nur unwesentlich bei einer Berücksichtigung von preiselastischen Nachfrageeffekten.

Mit der Veränderung der nachgefragten Mengen und dem daraus resultierenden verringerten Energieträgerbedarf lassen sich die angestrebten CO<sub>2</sub>-Minderungsziele zu geringeren Kosten erzielen. Der Betrag der Verringerung der marginalen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten für die preiselastische Abbildung des Nachfrageverhaltens gegenüber den Minderungskosten ohne Berücksichtigung einer preiselastischen Nachfrage ist in Abbildung 3-6 dargestellt.



**Abbildung 3-6:** Verringerung der marginalen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten durch die Berücksichtigung preiselastischer Nachfragereaktionen

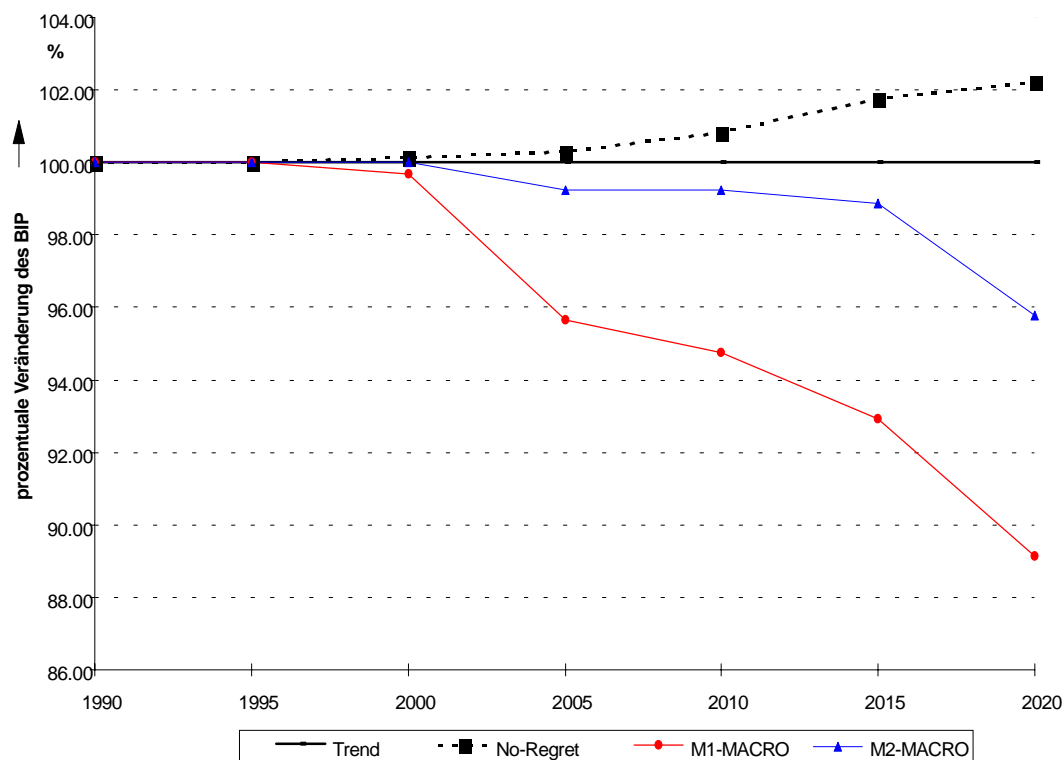
Für die gewählten Preiselastizitäten ergibt sich im *Minderungsszenario M2* für das Jahr 2020 eine Verringerung der marginalen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten um knapp 50 DM je Tonne CO<sub>2</sub>, im *Minderungsszenario M1* eine Differenz von immerhin gut 200 DM pro Tonne CO<sub>2</sub>. Die aufgezeigten Anpassungsreaktionen der Nachfrage hängen stark von der gewählten Werten für die Eigenpreiselastizitäten ab. Da die Nachfrage nach Energiedienstleistungen, die für die gewählte Modellierung des Energiesystems die Eingangsgröße darstellt, statistisch nicht erfaßt wird, können die Eigenpreiselastizitäten durch ökonometrische Schätzungen nur schwer ermittelt werden. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Damit ist der zusätzliche Informationsgewinn durch die preiselastische Abbildung der Nachfrage in Energiesystemmodellen erheblich von dem Erkenntnisfortschritt in diesem Bereich abhängig.

### 3.4.3 Gesamtwirtschaftliche Rückwirkungen

Die Einbettung des Energiesektors in einen gesamtwirtschaftlichen intertemporalen Gleichgewichtsansatz führt zu einer Integration der Entwicklung der Energiedienstleistungsnachfrage in die volkswirtschaftliche Entwicklung. Die daraus resultierende wechselseitige Beeinflussung von Preisen, Wirtschaftswachstum und tatsächlicher Höhe der nachgefragten Energiedienstleistungen stellt den zusätzlichen Informationsgehalt der methodischen Erweiterung einer Kopplung eines Energiesystemmodells mit einem neoklassischen Wachstumsmodell zu einem Allgemeinen Gleichgewichtsansatz dar.

Abbildung 3-7 zeigt die wechselseitigen Effekte, die durch die integrierte Berücksichtigung von Energiepreisen und Wirtschaftswachstum erzielt werden. In dem *Trendszenario*, das die Benchmark-Entwicklung bis zum Jahr 2020 darstellt, wächst das Bruttoinlandsprodukt von 1990 bis 2020 um knapp 100 %. Das Absinken der Kosten für die Bereitstellung der Energiedienstleistungen in der *No-Regret-Entwicklung* gegenüber dem *Trendszenario* führt zu leicht erhöhten Wachstumsraten des BIP, so daß das BIP bis zum Jahr 2020 um gut 2 Prozentpunkte höher als im *Trend* ausfällt.

Demgegenüber führt insbesondere das *Minderungsszenario M1* zu deutlichen Verlusten beim Wirtschaftswachstum. In der Periode vom Jahr 2000 bis 2005 fällt das jährliche Wachstum um etwa 1 %-Punkt geringer als in der *Trendentwicklung* aus, in den nachfolgenden Jahren um etwa einen halben Prozentpunkt. Damit ergibt sich ein BIP-Verlust bis zum Jahr 2020 von insgesamt gut 10 % gegenüber der *Trendentwicklung*. Entfallen die energiepolitischen Vorgaben zum Mindesteinsatz der heimischen Kohlen und der Kernenergie (*Szenario M2*), so läßt sich das 50 %-ige CO<sub>2</sub>-Minderungsziel zu deutlich verringerten volkswirtschaftlichen Kosten erreichen und die Wachstumsverluste des BIP gegenüber dem Trend betragen lediglich 4 % bis zum Jahr 2020.

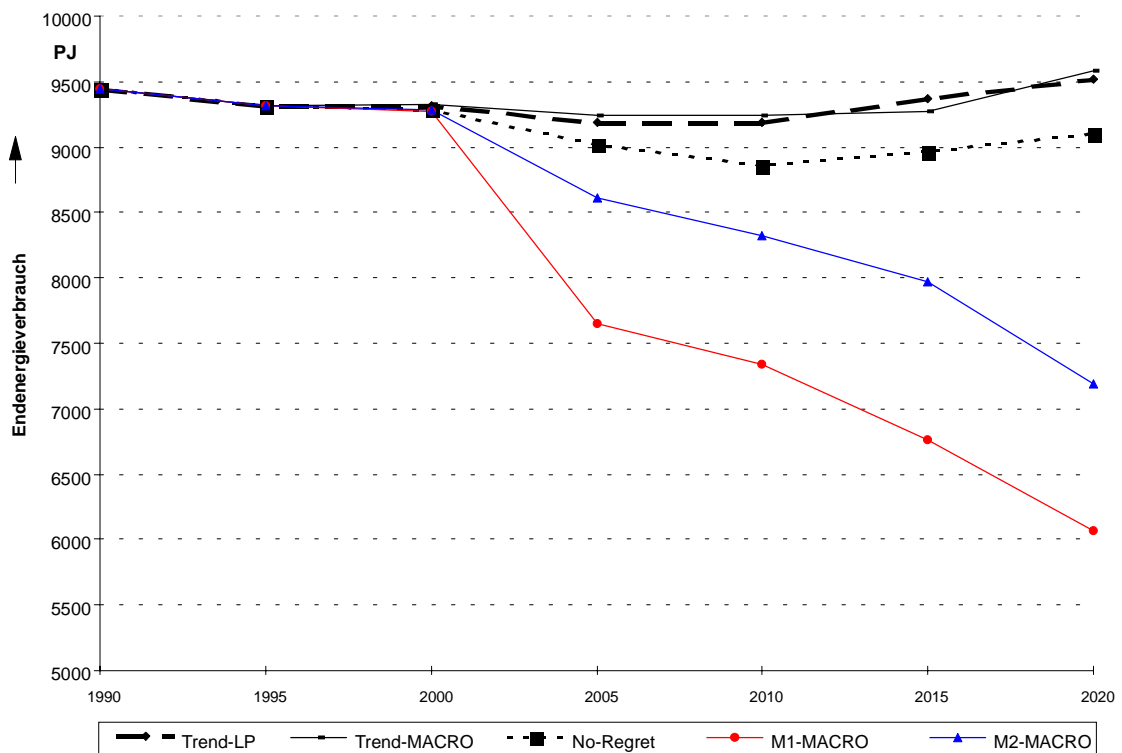


**Abbildung 3-7:** Veränderung der Bruttoinlandsproduktes gegenüber der Trendentwicklung im Szenariovergleich

Das in der *No-Regret-Entwicklung* erhöhte Wachstumsniveau führt insbesondere im Raumwärmebereich zu einem Anstieg der Energiedienstleistungsnachfrage gegenüber dem *Trend* von etwa 15 % bis zum Jahr 2020. Bezogen auf die Entwicklung der daraus resultierenden Endenergienachfrage wirkt dieser Steigerung jedoch die Einfluß der erhöhten Marktdurchdringungen von wirtschaftlichen Einsparmaßnahmen entgegen, die in der *No-Regret-Entwicklung* als zusätzliche Annahme unterstellt sind. In Summe kompensieren die Verbrauchsminderungen durch die Einsparmaßnahmen den Anstieg der Energiedienstleistungsnachfrage, so daß sich gegenüber der gewählten *Trendentwicklung* der sogenannte *Rebound-Effekt*, nämlich ein Anstieg des Energieverbrauchs durch ein höheres Wirtschaftswachstum, nicht einstellt (vgl. Abbildung 3-8).

Die Wechselwirkungen von verringertem Wirtschaftswachstum und niedrigerer Energienachfrage führen in den Minderungsszenarien in Kombination mit der Ausschöpfung weiterer Einsparungen zu einem Absinken des Endenergieverbrauchs, der jeweils etwa 20 % geringer als in den entsprechenden Ergebnissen der linearen Energiesystemmodelle ausfällt (vgl. Abbildung 3-8).





**Abbildung 3-8:** Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Szenariovergleich des allgemeinen Gleichgewichtsansatzes

### 3.5 Fazit

Die Erweiterung der linearen Ansätze der Energiesystemmodelle um die Methoden der nichtlinearen Programmierung ermöglicht die Modellierung von Effekten, die für das Modellverhalten von wesentlicher Bedeutung sein können und in den bestehenden Ansätzen bislang keine Berücksichtigung finden. Die Integration von Preiselastizitäten und die Einbeziehung makroökonomischer Wechselwirkungen auf die Entwicklung der Nachfrage stellen solche Aspekte dar. Insbesondere bei der Analyse von Szenarien, die stark von einer Trendentwicklung abweichen, kann die nichtlineare Erweiterung der Energiesystemmodelle zur Berücksichtigung von Preis- und makroökonomischen Rückwirkungen die Konsistenz der Annahmen verbessern und so zu einem realistischeren Systemverhalten führen.

Die Endogenisierung der Nachfrageentwicklung ist auf zwei Stufen umgesetzt worden. In der ersten Stufe wird die Nachfrage als eigenpreiselastische Funktion im Rahmen eines partiellen Gleichgewichtsansatzes für die Energiewirtschaft abgebildet. In der zweiten Stufe ist die Nachfrage im Rahmen eines allgemeinen Gleichgewichtsansatzes in die volkswirtschaftliche Entwicklung vollständig eingebettet. Auf beiden Stufen kann der

ursprüngliche technologische Detaillierungsgrad des prozeßtechnischen Ansatzes beibehalten werden. Dies zeichnet insbesondere den totalanalytischen Ansatz des  $E^3Macro$  gegenüber der Mehrzahl der allgemeinen Gleichgewichtsansätze in der Energiewirtschaft aus.

Aufgrund der derzeit verfügbaren kommerziellen nichtlinearen Solver sind bei umfangreichen prozeßtechnischen Komponenten jedoch der Größe der MPS-Matrix Grenzen gesetzt, da das Gesamtproblem numerisch instabil bzw. nicht mehr lösbar ist. Eine weitere Beschränkung für die praktische Anwendung stellt die Verlängerung der Lösungszeiten dar. Ausgiebige Versuchsreihen mit unterschiedlichen nichtlinearen Solvern legen die Empfehlung nahe, zum derzeitigen Zeitpunkt Problemgrößen von etwa 70000 Nicht-Nullelementen nicht zu überschreiten.

Letztendlich muß die Verwendung nichtlinearer Formulierungen in den Modellansätzen in Energiemodellen immer im Rahmen eines Abwägungsprozesses entschieden werden, der den zusätzlichen Erkenntnisgewinn aus der sachgerechten Abbildung des Realsystems mit den numerischen Einschränkungen und den verlängerten Lösungszeiten vergleicht.



## **4 Entwicklung und Anwendung eines multisektoralen Energiewirtschaftsmodells**

### **4.1 Problemstellung und Zielsetzung**

Neben prozeßtechnischen Energiesystemmodellen, die um eine makroökonomische Komponente erweitert sind (vgl. Abschnitt 3), können für die Analyse von energie- und umweltpolitischen Maßnahmen und deren Folgen auf die übrigen Bereiche einer Volkswirtschaft auch in sich geschlossene, gesamtwirtschaftliche Wirtschaftsmodelle genutzt werden. Hier werden im Rahmen einer aggregierten Totalanalyse die energie- und umweltpolitisch induzierten Veränderungen (direkte und indirekte Preis- bzw. Einkommenseffekte) in allen Wirtschaftsbereichen modelltheoretisch konsistent erklärt. Allerdings gehen wegen der hohen Aggregierungsebene wichtige technologische Detailinformationen verloren, was die produktionsseitige Anpassung der Volkswirtschaft, und hier insbesondere der Energieversorgungsstrukturen, auf exogene Änderungen der Rahmenbedingungen weniger nachvollziehbar macht.

Vor diesem Hintergrund soll die Entwicklung des Energiewirtschaftsmodells *NEWAGE*<sup>8</sup> die Totalanalyse energiepolitischer Handlungsalternativen erlauben und dabei wichtiges, energietechnisches Detailwissen berücksichtigen. Ziel der Modellentwicklung ist die prototypische Integration eines prozeßtechnischen Energieversorgungsmodells in ein übergeordnetes, aggregiertes gesamtwirtschaftliches Modell, wodurch - simultan - die technologisch fundierte und gesamtwirtschaftlich konsistente energiepolitische Analyse ermöglicht wird.

Die Entwicklung des Energiewirtschaftsmodells erfolgt in sechs Arbeitsschritten, deren Inhalt und Ergebnisse im folgenden beschrieben werden.

#### **Arbeitsschritt 1: Entwicklung des multisektoralen Energiewirtschaftsmodells *NEWAGE* für die Bundesrepublik Deutschland (ohne prozeßtechnisches Submodul)**

### **4.2 Wirtschaftstheoretische Grundlage der Modellformulierung**

Wirtschaftstheoretische Grundlage des Analyseinstrumentariums ist die Allgemeine Gleichgewichtstheorie. Modelle vom Typ des Allgemeinen Gleichgewichts sind in der angewandten Wirtschaftsforschung bei der Analyse handels-, finanz- und umweltpolitischer Fragestellungen

---

<sup>8</sup> *NEWAGE* ist ein Akronym für National, European, World-wide Appplied General Equilibrium modeling system. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Komponente *NEWAGE-N* (Modell einer offenen Volkswirtschaft) entwickelt und für die Bundesrepublik Deutschland (*NEWAGE-D*) angewendet.

weit verbreitet. Auf der Grundlage plausibler, mikroökonomisch fundierter Verhaltensannahmen sind sie in hohem Maße dazu geeignet, die Allokationseffekte wirtschaftspolitischer Maßnahmen für die Gesamtwirtschaft aufzuzeigen. Hierzu zählen die Auswirkungen auf Produktions- und Konsumstrukturen, Beschäftigung und funktionale Einkommensverteilung sowie auf aggregierte wirtschaftspolitische Indikatoren, wie z. B. das Bruttoinlandsprodukt oder die Aussenhandelsbilanz.

Der geschlossene, totalanalytische Ansatz gewährleistet methodische Konsistenz bei der Berücksichtigung von Wechselwirkungen (sog. *spill-over*- und *feed-back*-Effekte) auf nationalen und internationalen Märkten. Die Differenzierung nach Regionen, Industriesektoren und verschiedenen Haushaltstypen erlaubt eine differenzierte Untersuchung der Struktur- und Verteilungseffekte von Politikmaßnahmen. Die mathematisch-analytische Formulierung ermöglicht es, daß die zum Teil gegenläufigen Einzeleffekte wirtschaftspolitischer Maßnahmen auf ihren resultierenden Gesamteffekt untersucht werden können. Zudem zwingt die Umsetzung von Erklärungshypothesen in ein mathematisch-analytisches Modell zur schlüssigen Darlegung der Systemvariablen und ihrer Wirkungszusammenhänge.

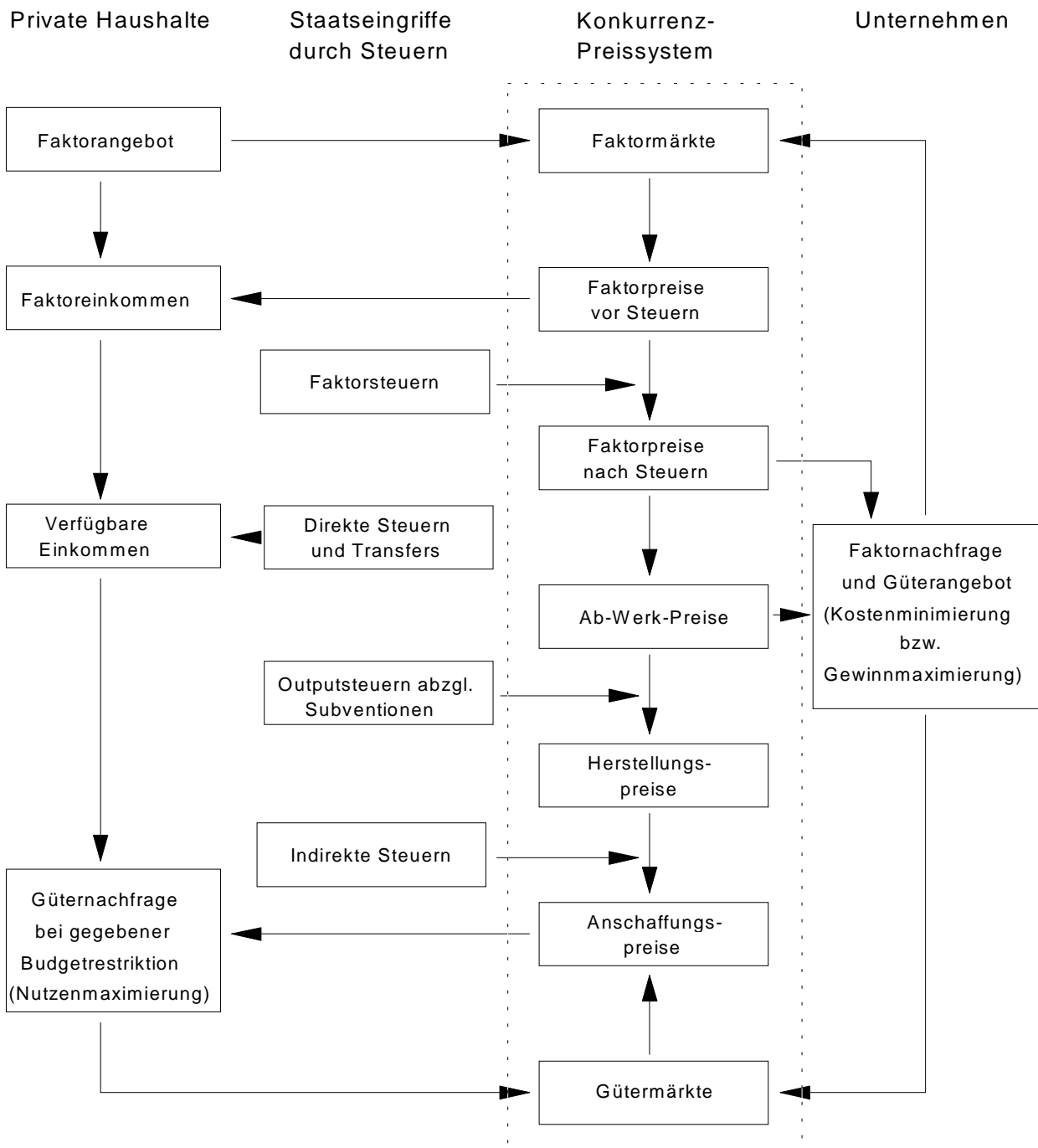
In Gleichgewichtsmodellen spielen Preise auf unterschiedlichen Märkten bei der Koordination der Angebots- und Nachfrageentscheidungen individueller Wirtschaftssubjekte eine zentrale Rolle. Sie übernehmen Signal-, Kompensations- und Lenkungsfunktion:

- Preise signalisieren die Knappheit von Gütern. Je weniger von einem Gut vorhanden ist, desto höher ist im allgemeinen sein Preis.
- Preise kompensieren die Kosten eines Gutes, welche volkswirtschaftlich durch seine Bereitstellung anfallen. Die Kompensationsfunktion verankert das Verursacherprinzip innerhalb einer Marktwirtschaft. Mit dem Kaufpreis eines Gutes zahlt der Nachfrager den monetären Gegenwert für die Opportunitätskosten, die der Volkswirtschaft durch Produktion und Konsum dieses Gutes entstehen.
- Preise lenken die Märkte in ein Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage. Bei Nachfrageüberschuß treibt die einsetzende Nachfragekonkurrenz den Preis nach oben, bei Angebotsüberschuß die einsetzende Angebotskonkurrenz den Preis nach unten.

Abbildung 4-1 veranschaulicht die Struktur eines einfachen Gleichgewichtsmodells zur komparativ-statischen Analyse wirtschaftspolitischer Eingriffe in das Preissystem über Steuern (wie z. B. eine CO<sub>2</sub>- oder Energiesteuer). Zur Vereinfachung der graphischen Darstellung wird auf die Abbildung von Produktionsverflechtungen und Außenhandelsbeziehungen verzichtet.

In der Modellökonomie wählen Haushalte ihr Faktorangebot und ihre Güternachfrage bei gegebenen Konsumentenpreisen für Faktoren und Güter so, daß die resultierenden Einkommens-Konsum-Kombinationen ihren Nutzen maximieren und konsistent mit den verfügbaren Einkommen sind. Unter Berücksichtigung der technologischen Möglichkeiten und der von den Märkten signalisierten Preise (Knappheiten) für Faktoren und Güter treffen die Unternehmen ihre kostenminimierende Faktornachfrage- bzw. gewinnmaximierende Güterangebots-

entscheidung. Ein flexibler Preismechanismus bringt Angebot und Nachfrage auf den Güter- und Faktormärkten zum Ausgleich. Der Staat erhebt Steuern, um Staatseinnahmen zu erzielen (Fiskalziel) oder Produktions- und Konsumstrukturen im Sinne einer gewünschten Allokationsverschiebung (wie zum Beispiel der Erreichung von Umweltqualitätszielen) zu beeinflussen. Als Folge der staatlichen Steuereingriffe stellt sich ein neues Gleichgewicht ein, dessen quantitative Ausprägungen mit den entsprechenden Werten des Ausgangsgleichgewichts verglichen werden können.



**Abbildung 4-1:** Grundstruktur eines allgemeinen Gleichgewichtsmodells

### 4.3 Wahl des mathematischen Formats zur Modellimplementierung

*NEWAGE* ist im sog. Komplementaritätsformat /Mathiesen 1985/; /Cottle, Pang 1992/; /Rutherford 1994a/ als nichtlineares System von Gleichungen und Ungleichungen geschrieben. Im Vergleich zu anderen Ansätzen der algebraischen Umsetzung eines allgemeinen Gleichgewichtsmodells (zum Beispiel als System von Gleichungen oder als mathematisches Optimierungsprogramm) bietet das Komplementaritätsformat ein Höchstmaß an Flexibilität, was die Abbildung von ökonomischen Sachverhalten anbetrifft /Böhringer 1996/.<sup>9</sup> Insbesondere erlaubt das Format eine hybride Darstellung von sektoralen Produktionsmöglichkeiten. Die technologischen Möglichkeiten eines Industriesektors können wahlweise durch einen "ökonomischen Top down"- oder durch einen "ingenieurstechnischen Bottom up"-Ansatz erklärt werden /Böhringer 1997/. Die Realitätsnähe bzw. empirische Belastbarkeit modellgestützter Analysen kann durch diesen Hybridansatz stark erhöht werden.

### 4.4 Allgemeine Modellcharakteristika

Im folgenden wird das Modell *NEWAGE* hinsichtlich der Kriterien sektorale Disaggregation, Behandlung der preisabhängigen Substitutionsmöglichkeiten in Produktion und Konsum sowie Modellierung von Faktormärkten, Staat und Außenhandel charakterisiert.

#### *Sektorale Disaggregation*

Auf der Produktionsseite werden in Anlehnung an die verfügbaren Input-Output-Statistiken bis zu 59 Industriesektoren unterschieden. In Hinblick auf energie- bzw. umweltpolitische Fragestellungen kommt der Beschreibung der Energieangebotsseite besondere Bedeutung zu. Die Abbildung verschiedener Energiesektoren (Erdöl, Gas, Mineralölprodukte, Steinkohle, Braunkohle, Strom; zusätzlich ist auch der Einsatz von Kernbrennstoffen in der Stromerzeugung berücksichtigt) ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Schadstoffintensitäten und Substitutionsmöglichkeiten unterschiedlicher Energieträger.

Bei der Darstellung der Nichtenergiesektoren berücksichtigt das Modell branchenspezifische Unterschiede in Faktorintensitäten, dem Grad an Faktorsubstitutionsmöglichkeiten und Preiselastizitäten der Güternachfrage, um den Strukturwandel in der industriellen Produktion als Folge wirtschaftspolitischer Eingriffe analysieren zu können.

---

<sup>9</sup> Für die Implementierung der algebraischen Modellformulierung auf dem Computer werden die Programmiersprachen GAMS /Brooke et al. 1992/ und MPSGE /Rutherford 1994b/ verwendet.

### *Preisabhängige Substitutionsmöglichkeiten in Produktion und Konsum*

Geschachtelte Kostenfunktionen mit konstanten Substitutionselastizitäten (CES) beschreiben die Substitutionsmöglichkeiten in der heimischen Produktion zwischen Kapital, Arbeit, Energie- und Materialinputs (KLEM). Das Materialaggregat setzt sich in allen Sektoren aus nicht-energetischen Inputs zusammen, die in einem fixen Einsatzverhältnis zueinander stehen.

Innerhalb des Energieaggregats werden die Substitutionsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Energieträgern über CES-Funktionen beschrieben. Die flexible KLEM-Spezifikation von Technologien erlaubt eine umfassende Darstellung der Substitutionsmöglichkeiten in der Produktion, einschließlich der Energieträgersubstitution innerhalb des Energieaggregats (*fuel-switch*) und der Substitution zwischen Energie und anderen Produktionsfaktoren (Energieeinsparung). Die Konsummöglichkeiten der Haushalte werden durch geschachtelte CES-Funktionen wiedergegeben, die auf unterschiedlichen Ebenen die Substitutionsmöglichkeiten zwischen Nichtenergiegütern und Energiegütern abbilden.

### *Faktormärkte*

Primärfaktoren der Produktion sind Arbeit und Kapital. Das Arbeitsangebot ist durch die Nachfrage nach Freizeit elastisch, wobei die Wahlentscheidung zwischen Freizeit und Arbeit konsistent mit einer empirisch beobachtbaren Elastizität des Arbeitsangebots ist. Die Kapitalstöcke entwickeln sich in Abhängigkeit von den Abschreibungen und der Investitionstätigkeit.

Hinsichtlich der (intersektoralen, internationalen) Mobilität der Faktoren können unterschiedliche Annahmen getroffen werden, um kurzfristige und langfristige Anpassungsreaktionen der Volkswirtschaft an geänderte wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen zu unterscheiden.

Standardmäßig werden funktionierende Wettbewerbsmärkte für Faktoren unterstellt, auf denen flexible Preise für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage sorgen. Es ist aber möglich, Marktthemmnisse in Form von Mengen- oder Preisadministrierungen zu integrieren, was zu Marktungleichgewichten zwischen Angebot und Nachfrage führen kann. Dies ist insbesondere für den Arbeitsmarkt wichtig, wo unfreiwillige Arbeitslosigkeit als Folge gesetzlicher Mindestlöhne oder auf Basis eines sog. Phillips-Zusammenhangs untersucht werden kann. Bei letzterem wird unterstellt, daß hohe Arbeitslosenraten die Verhandlungsmacht der Gewerkschaften schwächen und zu niedrigeren Reallohnabschlüssen führen; umgekehrt ist ein hoher Beschäftigungsstand mit höheren Reallöhnen verknüpft.

### *Staat*

Der Staat sorgt für die Bereitstellung öffentlicher Güter (Bildung, allg. Verwaltungsleistungen, Investitionen der öffentlichen Hand etc.) und einen Transfer von Sozialleistungen (Zahlungen



der Kranken-, Renten-, Arbeitslosen-versicherung etc.). Die damit verbundenen Ausgaben müssen über Steuern (inkl. Sozialabgaben) gedeckt werden.

#### *Außenhandel*

Im Außenhandel können inländische und ausländische Produkte der gleichen Kategorie wahlweise als vollkommene (Heckscher-Ohlin Annahme) oder unvollkommene (Armington-Annahme) Substitute in Import und Export betrachtet werden. In der Standardversion werden Importe an Rohöl, Gas, Strom und Kohle als perfekte Substitute für heimische Energieträger der gleichen Kategorie betrachtet, wohingegen in den übrigen Sektoren eine Unterscheidung zwischen inländischen und ausländischen Produkten über die Armington-Annahme stattfindet (so hat z. B. Wein aus Frankreich für den deutschen Konsumenten eine andere Qualität als deutscher Wein).

Die inländische Nachfrage nach Importen ergibt sich aus dem Kostenminimierungskalkül von Unternehmen und Haushalten. Die Exporte einer Industrie leiten sich aus der Zielsetzung ab, die Produktionsgewinne aus inländischem Absatz und Exportabsatz zu maximieren. über den Planungszeitraum muß sich ein außenwirtschaftliches Gleichgewicht einstellen, da längerfristig internationale Forderungen bzw. Verbindlichkeiten beglichen werden müssen. Ein flexibler Wechselkurs sorgt dafür, daß sich Importe und Exporte (inkl. internationaler Kapitalflüsse) über den Zeithorizont wertmäßig ausgleichen.

## **Arbeitsschritt 2: Modellparametrisierung und Erstellung einer Datenbasis**

### **4.5 Modellparametrisierung durch Kalibrierung**

Wie bei angewandten Gleichgewichtsanalysen üblich, wird das Modell auf der Basis eines Ausgangsgleichgewichts "kalibriert". Dabei werden die Parameter der funktionalen Formen zur Beschreibung der Produktionsmöglichkeiten und Präferenzen aus gegebenen Daten für Mengen, Preise und Elastizitäten so bestimmt, daß die numerische Lösung des kalibrierten Gleichgewichtsmodells gerade die Ausgangswerte reproduziert. Bei der Erstellung eines mikroökonomisch konsistenten Datensatzes müssen Informationen aus verschiedenen Datenquellen (nationale Input-Output-Tabellen, Handelsstatistiken, Steuerstatistiken etc.) miteinander abgeglichen werden.

### **4.6 Erstellung einer Datengrundlage**

Zentrale Datengrundlage für die makroökonomischen Modellanalysen sind die Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes, die die wichtigsten gesamtwirtschaftlichen Daten für

ein Jahr enthalten. Die Input-Output-Tabellen bilden die intersektorale Verflechtung der Produktion für 58 Sektoren in Richtung und Intensität sowie die Endnachfrage nach Struktur und Höhe ab. Mit Hilfe von einfachen Aggregationsprogrammen können die Daten auf beliebiger Ebene konsistent zusammengefaßt werden. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung der Datenbasis an eine sich je nach Problemstellung ändernde sektorale Struktur. Um die Robustheit von Modellergebnissen in Bezug auf die Datenbasis zu testen, wurden mikroökonomisch konsistente Datensätze für unterschiedliche Bezugsjahre (1988, 1990, 1991, 1993) erstellt.

Kernparameter des Modells sind Elastizitäten. Elastizitäten bestimmen die Richtung und die Stärke von Angebots- bzw. Nachfragerreaktionen auf Preisveränderungen. So sind Substitutions- bzw. Transformationselastizitäten ein Maß für die preisabhängigen Substitutionsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Inputs bzw. für die preisabhängigen Transformationsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Outputs. Auf der Inputseite geben Substitutionselastizitäten an, wie „leicht“ ein bestimmter Output aus unterschiedlichen Inputkombinationen (Technologien) produziert werden kann. Eine Substitutionselastizität von unendlich impliziert, daß alternative Inputkombinationen vollkommen gleichwertig sind, so daß die Technologiewahl bei kostenminimierender Produktionsweise allein von den Preisen der Inputs abhängt. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit (Kapazitätsobergrenzen) wird nur der kostengünstigste Faktor eingesetzt. Dagegen drückt eine Substitutionselastizität von Null aus, daß es keine technologischen Alternativen gibt und der Inputmix vollständig unabhängig von der relativen Preisstruktur der Inputs vorgegeben ist. Die Höhe der Substitutionselastizität bestimmt die ökonomischen Kosten einer Prozeßsubstitution: Je geringer die Substitutionselastizität, desto teurer werden Substitutionsvorgänge. Analoges gilt für Transformationselastizitäten auf der Outputseite. Empirische Schätzungen von Elastizitäten sind zum Teil widersprüchlich. Als Ursachen lassen sich unter anderem verschiedene Annahmen über den technologischen Fortschritt, den Zeithorizont (kurz- versus langfristig) und den Aggregationsgrad von ökonometrischen Schätzungen anführen. Die Modellspezifikation von *NEWAGE* wurde so flexibel gehalten, daß alternative Schätzungen von Substitutionselastizitäten im Rahmen von Sensitivitätsanalysen leicht berücksichtigt werden können.

### **Arbeitsschritt 3: Fallstudie**

In der modellgestützten Fallstudie werden die volkswirtschaftlichen Auswirkungen einer CO<sub>2</sub>-Besteuerung unter Ausnahme von energie- und exportintensiven Industrien für die alten Bundesländer untersucht, wie sie Gegenstand der Diskussion um eine deutsche CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie ist /Böhringer, Rutherford 1997/.

Die Simulationsrechnungen mit *NEWAGE* zeigen, daß Steuerbefreiungen - je nach Umfang der Ausnahmeregelung - die gesamtwirtschaftlichen Kosten der Emissionsminderung drastisch erhöhen. Die Verringerung der Steuererhebungsgrundlage bewirkt bei gleichem Minde-

runungsziel eine Zunahme der gesamtwirtschaftlichen Emissionsminderungskosten. Steuerbefreiungen führen zu einer Erhöhung des Steuersatzes für den steuerpflichtigen Teil der Volkswirtschaft, falls das selbe Niveau von Emissionsminderungen wie bei einer einheitlichen Steuer ohne Befreiung erreicht werden soll. Günstige Substitutionspotentiale in steuerbefreiten Sektoren werden nicht ausgeschöpft, was zu Lasten teurerer Alternativen in steuerpflichtigen Bereichen geht. Die Grenzkosten einer Emissionsminderung erhöhen sich stark mit der Anzahl steuerbefreiter Industriesektoren. Steuerbefreiungen erhalten zwar Arbeitsplätze in den dadurch indirekt subventionierten Sektoren, aber diese Arbeitsplätze sind aufgrund der verringerten ökologischen Wirksamkeit gesamtwirtschaftlich sehr kostspielig.

Sollen extreme Arbeitsplatzeffekte in einzelnen Sektoren verhindert werden, dann sind zum Beispiel sektorspezifische Lohnsubventionen für diese Sektoren kombiniert mit einer uniformen Emissionssteuer vorzuziehen. Die negative Bewertung von Steuerbefreiungen kann sich unter Umständen ändern, wenn als Folge unilateraler Maßnahmen globale Externalitäten, wie hier CO<sub>2</sub>-Emissionen, über Produktionswechsel von energie- und exportintensiven Gütern massiv ins Ausland verlagert werden (sog. Umweltdumping oder *Leakage*). In diesem Fall können partielle Steuerbefreiungen gegenüber einer einheitlichen Schadstoffsteuer kosteneffizienter sein, da sie der kontraproduktiven Verlagerung globaler Externalitäten entgegenwirken.

#### **Arbeitsschritt 4:     Synthese von Top down und Bottom up durch Integration eines prozeßtechnischen Submoduls**

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte energie- oder umweltpolitischer Maßnahmen werden stark von den produktionsseitigen Anpassungsmöglichkeiten der Wirtschaft, d. h. der Verfügbarkeit technologischer Alternativen, bestimmt. Beispielsweise ist das Erreichen von CO<sub>2</sub>-Minderungszielen für die Volkswirtschaft um so günstiger, je leichter sich CO<sub>2</sub>-reiche durch CO<sub>2</sub>-arme bzw. CO<sub>2</sub>-freie Energieträger (Energieträgersubstitution) und je besser sich Energie durch andere Produktionsfaktoren (Energieeinsparung) ersetzen lassen. Bei der modellhaften Abbildung technologischer Substitutionsmöglichkeiten besteht ein Zielkonflikt zwischen prozeßtechnischer Detailinformation und der näherungsweise Erfassung vieler konkreter Einzelprozesse durch eine abstrakte Aggregattechnologie. Einerseits ist eine aggregierte Beschreibung zur Reduktion der Komplexität in einem gesamtwirtschaftlichen Modell notwendig. Andererseits fördert die technologische Fundierung der Substitutionspotentiale über Einzeltechnologien die Realitätsnähe und damit die Aussagefähigkeit einer Analyse.

Die Erweiterung der Grundversion von *NEWAGE* erfolgt dergestalt, daß neben einer aggregierten Beschreibung sektoraler Produktionsmöglichkeiten über neoklassische Produktionsfunktionen (vom CES-Typ) konkrete Technologieoptionen eines Industriezweigs mittels der in partialanalytischen Technologiemoellen weit verbreiteten linearen Aktivitätsanalyse dargestellt werden können. Alternative Technologien können einzeln oder in Kombinationen entsprechend

ihrer Kapazitätsobergrenzen betrieben werden. Technologischer Fortschritt läßt sich über konkrete Zukunftstechnologien berücksichtigen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Die Charakterisierung der Produktionsmöglichkeiten eines Sektors über technologie-spezifische Input- bzw. Kostenstrukturen sowie Kapazitätsobergrenzen führt zu den für die lineare Aktivitätsanalyse typischen Kosten-Potential-Kurven. Ändern sich im Zuge wirtschafts-politischer Eingriffe die Relativpreise, dann können bisher inaktive Technologien wirtschaftlich (aktiv) und vormals aktive Technologien unrentabel (inaktiv) werden.

#### **Arbeitsschritt 5: Erweiterung der Datenbasis am Beispiel der prozeßtechnischen Integration des Stromsektors**

Für die gesamtwirtschaftliche, technologisch fundierte Allokationsanalyse von (energie-) um-weltpolitischen Maßnahmen bietet sich die ingenieurtechnische Beschreibung diskreter Strom-erzeugungsoptionen an, da die Substitutionsmöglichkeiten im Stromsektor für die Reduktion energiebedingter Schadstoff-Emissionen eine zentrale Rolle spielt. So entfielen zum Beispiel im Jahr 1990 ca. 36 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Verbrennung fossiler Ener-gieträger in der Stromerzeugung (Westdeutschland). Angesicht dieser Größenordnung ist die rea-litätsnahe Abbildung von Substitutionspotentialen durch Energieeinsparung (Effizienzverbessere-rung) und Energieträger-"Switch" (Energieträgersubstitution) im Stromerzeugungsbereich be-sonders wichtig. Dabei reicht die Spezifikation von wenigen Schlüsseltechnologien der Strom-erzeugung aus, um grundlegende, technologiebedingte Abweichungen in der Energie- bzw. Schadstoffintensität sowie der Kapital-, Arbeits- und Materialintensität über prozentuale Ko-stenanteile zu erfassen und damit preisabhängige Substitutionspotentiale zu charakterisieren.

Im konkreten Beispiel werden die technologischen Möglichkeiten der Stromerzeugung in der Ausgangssituation durch sechs aktive und fünf inaktive Kraftwerkstypen beschrieben. In-aktive Kraftwerkstypen sind dadurch gekennzeichnet, daß ihre Strombereitstellungskosten den am Markt erzielbaren Strompreis in der Ausgangssituation übersteigen. Durch energiepolitische Maßnahmen, wie z. B. eine CO<sub>2</sub>-Steuer, kann sich die Wettbewerbsfähigkeit der Technologien ändern. Bisher aktive Technologien (wie CO<sub>2</sub>-intensive Braunkohlekraftwerke) können unwirt-schaftlich werden, zuvor inaktive Technologien (wie neue Wind- oder Solarkraftwerke) können wettbewerbsfähig werden. Die Angebotstechnologien werden in Abhängigkeit von ihrer zeitli-chen Darbietung in die drei Lastbereiche Grundlast, Mittellast und Spitzenlast mit unterschiedli-chen Strombereitstellungskosten aufgeteilt.

Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht der Technologien mit ihrer jeweiligen Lastzuordnung und ihrem Aktivitätszustand im Ausgangsgleichgewicht. Für die in Tabelle 4-1 dargestellte Technologiestruktur der Stromerzeugung ergibt sich nach Anwendung einer betriebswirtschaft-

lichen Kostenrechnung eine technologiespezifische Kostenstruktur<sup>10</sup>. Bezogen auf den lastabhängigen Marktpreis werden in der Ausgangssituation die prozentualen Kostenanteile der KLEM-Inputs Kapital (mobil), Arbeit, Energie, Material sowie die technologiespezifische Rendite (für aktive Technologien) angegeben. Technologien, die in der Ausgangssituation nicht betrieben werden, sind durch eine KLEM-Kostensumme größer 1 charakterisiert, d. h., die Summe ihrer Inputkosten übersteigt den lastspezifischen Marktpreis. Neben der Kostenstruktur sind auch die Kapazitätsobergrenzen der Technologien (z. B. in TWh) anzugeben.<sup>11</sup>

**Tabelle 4-1:** Übersicht über die betrachteten alternativen technologischen Möglichkeiten zur Stromerzeugung

Technologie	Lastbereich	Ausgangsbetriebszustand
Kernkraft	Grundlast	aktiv
Braunkohle	Grundlast	aktiv
Steinkohle	Mittellast	aktiv
Wasserkraft	Mittellast	aktiv
Gas	Spitzenlast	aktiv
Öl	Spitzenlast	aktiv
Gas-GuD1*	Grundlast	inaktiv
Gas-GuD2	Mittellast	inaktiv
Steinkohle-NT**	Mittellast	inaktiv
Wind	Mittellast	inaktiv
Sonne	Mittellast	inaktiv

\* GuD: Gas- und Dampf-Kraftwerk

\*\* NT: neue Kohleverfeuerungstechniken

<sup>10</sup> Für die Aufteilung der Kosten auf Kapital, Arbeit, Material und Energie wird eine einzelwirtschaftliche Standardkalkulation auf der Grundlage von Technologie- und Kostendaten, wie Auslastungszeiten, Netto-nutzungsgrad, Brennstoffkosten, etc., durchgeführt.

<sup>11</sup> Vgl. hierzu das Analyseraster für die Studien der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ /Enquete 1993/.

Bei der Ermittlung der Kostenstruktur erfolgt ein Abgleich mit den aggregierten Kostendaten für den Stromsektor, wie sie in volkswirtschaftlichen Input-Output-Tabellen angegeben werden. Dieser Abgleich ist erforderlich, da eine gesamtwirtschaftliche Input-Output-Tabelle als Datengrundlage für die Modellanwendung verwendet wird, und sich zwecks Datenkonsistenz die spezifischen Kosten der Einzeltechnologien in der Summe zu den entsprechenden sektoralen Werten in der Input-Output-Tabelle addieren müssen. Die Kosten der Einzeltechnologien enthalten im Gegensatz zu den aggregierten Input-Output-Daten keine Aufwendungen, die für Vertrieb und Verteilung von Strom entstehen. Um größere Verzerrungen der relativen Kostenstruktur zwischen den Technologien als Folge des Abgleichs zu verhindern, wird eine fiktive "Overhead"-Technologie eingeführt, der alle Kosten außerhalb der eigentlichen Stromerzeugung zugeschrieben werden. Diese Kosten fallen konstant für jede erzeugte Stromeinheit an.

### **Arbeitsschritt 6: Fallstudie**

Das hybride Energiewirtschaftsmodell wird im sechsten Arbeitsschritt zur Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte von CO<sub>2</sub>-Steuern eingesetzt. Dabei werden quantitative wie qualitative Unterschiede zu einer reinen Top down-Modellierung untersucht.

In den Szenariorechnungen werden exogene CO<sub>2</sub>-Minderungsziele von 10 %, 20 % und 30 % vorgegeben. Der CO<sub>2</sub>-Steuersatz, welcher zur Erreichung der Minderungsziele erforderlich ist, ergibt sich als Schattenpreis der jeweiligen Emissionsbeschränkung. Die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Emissionsbeschränkungen werden für zwei alternative Formulierungen der technologischen Substitutionsmöglichkeiten im Stromsektor simuliert:

*TOP\_DOWN:* Die Produktionsmöglichkeiten für den Stromsektor werden analog zu allen übrigen Sektoren im Modell beschrieben: Geschachtelte, separierbare Kostenfunktionen mit konstanten Substitutionselastizitäten (CES) geben die Substitutionsmöglichkeiten in der heimischen Produktion zwischen Kapital, Arbeit, Energie- und Materialinputs an. Das Materialaggregat setzt sich aus nichtenergetischen Inputs zusammen, die in einem fixen Einsatzverhältnis zueinander stehen. Innerhalb des Energieaggregats werden die Substitutionsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Energieträgern über eine mehrfach geschachtelte, separierbare CES-Funktion beschrieben.

*BOTTOM\_UP:* Die Produktions- bzw. Substitutionmöglichkeiten in der Stromerzeugung werden, wie in den Arbeitsschritten 4 und 5 beschrieben, durch diskrete Technologien wiedergegeben (vgl. Tabelle 4-1). Die Beschreibung der

technologischen Möglichkeiten in allen anderen Sektoren entspricht derjenigen von *TOP\_DOWN*.

Was die Wohlfahrtskosten und die marginalen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten anbetrifft, erhält man für beide Varianten *TOP\_DOWN* und *BOTTOM\_UP* qualitativ dasselbe Ergebnis. Die Wohlfahrtsverluste und die Grenzkosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung (CO<sub>2</sub>-Steuer) steigen nichtlinear mit der Höhe der Minderungsziele an. Bezüglich der Höhe der Wohlfahrtskosten für die jeweiligen Minderungsziele ergibt sich jedoch kein eindeutiges Ranking der Varianten. Für eine Minderung von 10 % bzw. 30 % ist die Erschließung von CO<sub>2</sub>-Substitutionspotentialen in der Variante *TOP\_DOWN* teurer, bei 20 % CO<sub>2</sub>-Reduktion dagegen günstiger als in der Variante *BOTTOM\_UP*. Das uneinheitliche Ranking ist auf den diskontinuierlichen Technologiewechsel für die Spezifikationsvariante *BOTTOM\_UP* zurückzuführen.

Wichtiger als die quantitativen Unterschiede in makroökonomischen Aggregaten (wie zum Beispiel dem Bruttoinlandsprodukt) sind die qualitativen Unterschiede, die sich auf sektoraler Ebene bei alternativer Modellierung der Stromerzeugungsoptionen ergeben können. So fallen die Produktions- und Beschäftigungseffekte für verschiedene Sektoren (Bsp: Strom- oder Gaswirtschaft) in den beiden Varianten gegenläufig aus. Der Grund hierfür liegt darin, daß die expliziten Preis- und Substitutionselastizitäten bei der Variante *TOP\_DOWN* stark von den impliziten Elastizitäten der Variante *BOTTOM\_UP* abweichen. Die unterschiedlichen qualitativen Auswirkungen haben struktur- bzw. verteilungspolitisch eine wichtige Implikation: Während in der einen Modellvariante gewisse Sektoren zu Verlierern des Strukturwandels (und damit zu potentiellen Beziehern von Anpassungshilfen) zählen, könnten sie in der anderen Modellierungsvariante als Gewinner dastehen. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, warum die möglichst realitätsnahe Abbildung von maßnahmeninduzierten Substitutions- und Outputeffekten eine bedeutsame Rolle spielt.

#### 4.7 Fazit

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte energie- bzw. umweltpolitischer Maßnahmen werden stark von den produktionsseitigen Anpassungsmöglichkeiten der Wirtschaft, d. h. der Verfügbarkeit technologischer Alternativen, bestimmt. Angesichts der spezifischen Vor- und Nachteile von aggregierter (Top down) und prozeßorientierter (Bottom up) Produktionsbeschreibung erscheint es sinnvoll, beide Ansätze im Rahmen einer übergeordneten Modellierung zu kombinieren. Eine aggregierte Beschreibung von Produktionsmöglichkeiten über substitutionale neoklassische Produktionsfunktionen ermöglicht die drastische Reduktion der Komplexität (Dimensionalität) gesamtwirtschaftlicher Modelle. Die Belastbarkeit modellgestützter Analysen kann durch die prozeßorientierte Darstellung ausgewählter Produktionsbereiche, deren technologische Möglichkei-

ten für die Fragestellung entscheidend sind, erhöht werden. Eine prozeßorientierte Vorgehensweise ist insbesondere dann zweckmäßig, wenn sich die Produktionsmöglichkeiten auf eine kleine bzw. überschaubare Anzahl diskreter Schlüsseltechnologien beschränken läßt oder nur mangelhaftes Datenmaterial zur Schätzung von Substitutionselastizitäten verfügbar ist.

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte multisektorale Energiewirtschaftsmodell *NEWAGE* ermöglicht die Integration prozeßtechnischer Technologieinformationen in ein übergeordnetes, aggregiertes gesamtwirtschaftliches Modell. Dies wurde prototypisch für den Bereich der Stromerzeugung umgesetzt. Damit ist ein leistungsfähiges Instrumentarium für die technologisch fundierte und gesamtwirtschaftlich konsistente energie- bzw. umweltpolitische Analyse geschaffen worden. Erweiterungen erscheinen insbesondere für die beiden in der klimapolitischen Diskussion zentralen Bereiche des Verkehrs und der Raumwärme zweckmäßig.





## 5 Entwicklung eines Simulationsansatzes für Energiesystemmodelle

### 5.1 Problemstellung und Zielsetzung

Zur Untersuchung energiewirtschaftlicher Fragestellungen werden heute in der Regel Optimierungsmodelle eingesetzt. Oft ist es jedoch nötig, vom Entscheidungsträger gezielt vorgeschlagene Strategien durchzurechnen, um zu bestimmen, wieweit diese Strategie sich von der optimalen Lösung entfernt. Hierzu werden Modelle eingesetzt, die das zuvor optimierte System simulieren können. Die Systembeschreibung und ein Großteil der Daten können dabei von der Optimierung übernommen werden. Die Simulationsrechnung soll die einfache und schnelle Berechnung vieler verschiedener Varianten ermöglichen, um so mit geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand einen guten Überblick über das Systemverhalten zu bekommen. Weil die Simulationstechnik mit weniger Daten auskommt als die Optimierung, eignet sie sich besonders gut für Fragestellungen, bei denen die Datenbasis lückenhaft ist.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel des Arbeitsbereiches, ein Simulationsmodell für energiesystemanalytische Fragestellungen zu entwickeln. Für das Simulationsmodell wird *PlaNet* als Acronym eingeführt.

### 5.2 Konzeption von *PlaNet*

*PlaNet* ist ein PC-basiertes entscheidungsunterstützendes System zur Evaluierung energie- und umweltpolitischer Strategien auf kommunaler, regionaler und nationaler Ebene. Mit *PlaNet* lassen sich Energiesystemmodelle generieren, die sich zur Bedarfsanalyse, zur Simulation von Energiesystemen und zur Analyse von Umweltbelastungen eignen. *PlaNet* simuliert Energiesysteme technologieorientiert nach dem "accounting" Prinzip, beginnend bei der volkswirtschaftlichen Aktivität bis zum Primärenergieverbrauch, und erstellt Energiebilanzen, Emissionsbilanzen und Kostenbilanzen. *PlaNet* bietet eine flexible und leistungsfähige Datenverwaltung und setzt bewährte wissenschaftliche Methoden zur Simulation von Energiesystemen ein.

*PlaNet* berechnet die Energie- und Materialflüsse eines Energiesystems, sowie den Ressourcenverbrauch, die Technologiekapazitäten, die Emissionen und die Kosten. Mit *PlaNet* können für eine Vielzahl von Maßnahmen die Auswirkungen auf Energieverbrauch, Kosten und Schadstoffemissionen des Energiesystems analysiert werden, wie z. B. Brennstoffsubstitution (Ausstieg aus dem Jahrhundertvertrag für Steinkohle), Einführung neuer Technologien (Wind, Photovoltaik), Ausstieg aus Technologien (Kernenergie), Durchführung von Maßnahmen zur rationellen Energieanwendung, Einführung von Energie- und Schadstoffsteuern und Einführung von Luftreinhaltungsmaßnahmen (Entschwefelung,

Entsticklung). *PlaNNet* ist auch geeignet, Sachbilanzen für die ganzheitliche Bilanzierung zu erstellen. Bei der Modellierung des Energiesystems ist *PlaNNet* flexibel bezüglich der zeitlichen, örtlichen und sektoralen Auflösung.

*PlaNNet* unterstützt alle Phasen des strukturierten Planungsprozesses. Alle wesentlichen Informationen zu einer Fallstudie werden in einer eigenständigen, als Informationssystem konzipierten Datenbank gespeichert und dokumentiert. Die moderne Datenverwaltung ist vollständig mit dem Simulationsmodell integriert. Eine übersichtliche Strukturierung des Planungsprozesses gepaart mit einer benutzerfreundlichen Bedienoberfläche, die keine speziellen EDV-Kenntnisse voraussetzt, schaffen die Grundlage für mehr Transparenz und Nachvollziehbarkeit bei der Planung und steigern die Produktivität des Modellierers. Die Kompatibilität mit dem Optimierungsmodul (vgl. Abschnitt 2.4) wird durch die Verwendung einer einheitlichen Datenstruktur (vgl. Abschnitt 1.4) gewährleistet.

Das *PlaNNet*-Konzept basiert auf dem Entwurf in /Schlenzig et al. 1993/. Die wesentlichen Eigenschaften von *PlaNNet* sind in der folgenden Übersicht zusammengefaßt:

- Referenzenergiesystem (RES) zur flexiblen Abbildung des Energiesystems,
- freie zeitliche, räumliche und sektorale Strukturierung des RES,
- Bilanzierung von Energie- und Materialflüssen, Kosten, Kapazitäten, Emissionen,
- Berücksichtigung von Lastganglinien in der Simulation,
- Ankopplung an die standardisierte, modellunabhängige Datenbank *NetWork*,
- Konsistenzprüfung der mathematischen Modellspezifikation,
- Benutzerfreundlichkeit, kontextsensitives Hilfesystem,
- integrierte Maßeinheitenumrechnung,
- verbessertes Szenario-Management,
- flexible graphische und tabellarische Auswertetools für die Modellergebnisse,
- Erstellung von vom Benutzer definierbaren Energiebilanzen,
- transparente Bewertungssystematik zur Beurteilung der berechneten Lösungsstrategien,
- Standardisierung des Modellaufbaus durch Modularisierung,
- Kompatibilität mit Optimierungsmodellen,
- einfache Software-Wartung, gute Dokumentation.

*PlaNNet* ist vollständig in das *MESAP*-Instrumentarium (vgl. Abschnitt 1.2) integriert. Damit besitzt *PlaNNet*, wie jedes *MESAP*-Modell, eine **modulare Architektur** und bietet unter einer einheitlichen Bedienoberfläche zu jedem Schritt der Energieplanung ein Modul an. Über eine standardisierte Datenchnittstelle sind kommerzielle Softwarepakete wie Tabellenkalkulation und Textverarbeitung integriert. Alle Module von *PlaNNet* sind in Abbildung 5-1 dargestellt. Sie umfassen die fallstudienorientierte Datenbank *NetWork* (vgl. Abschnitt 1.4), den *Navigator*, den *Analyst*, den *Case-Manager*, die Rechenmodule *PlaNNet-Flow* und *PlaNNet-Cost* und den *Evaluator*. Mit der Datenbank *NetWork* werden alle Daten, die während einer Fallstudie anfallen, gespeichert. Während der *Navigator* Dateneingabe, Zeitreihenverwaltung und Retrieval über-

nimmt, erlaubt der *Analyst* die Auswertung von Daten und Ergebnissen als Tabelle, Grafik oder Standardbericht sowie einfache statistische Analysen. Der *Case-Manager* unterstützt die Erstellung, Verwaltung und Dokumentation von Szenarien. Die Simulationsmodule *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* berechnen Energie- und Schadstoffbilanzen für beliebige Energiesysteme sowie die erforderlichen Kapazitäten der Umwandlungstechnologien. Eine gesamtwirtschaftliche Kostenrechnung bestimmt die über den gesamten Beobachtungszeitraum abdiskontierten Kosten des Energiesystems. Ein *Evaluator* ermöglicht die multikriterielle Bewertung der untersuchten Strategien. Alle Module erlauben die Dokumentation der durchgeführten Arbeiten.

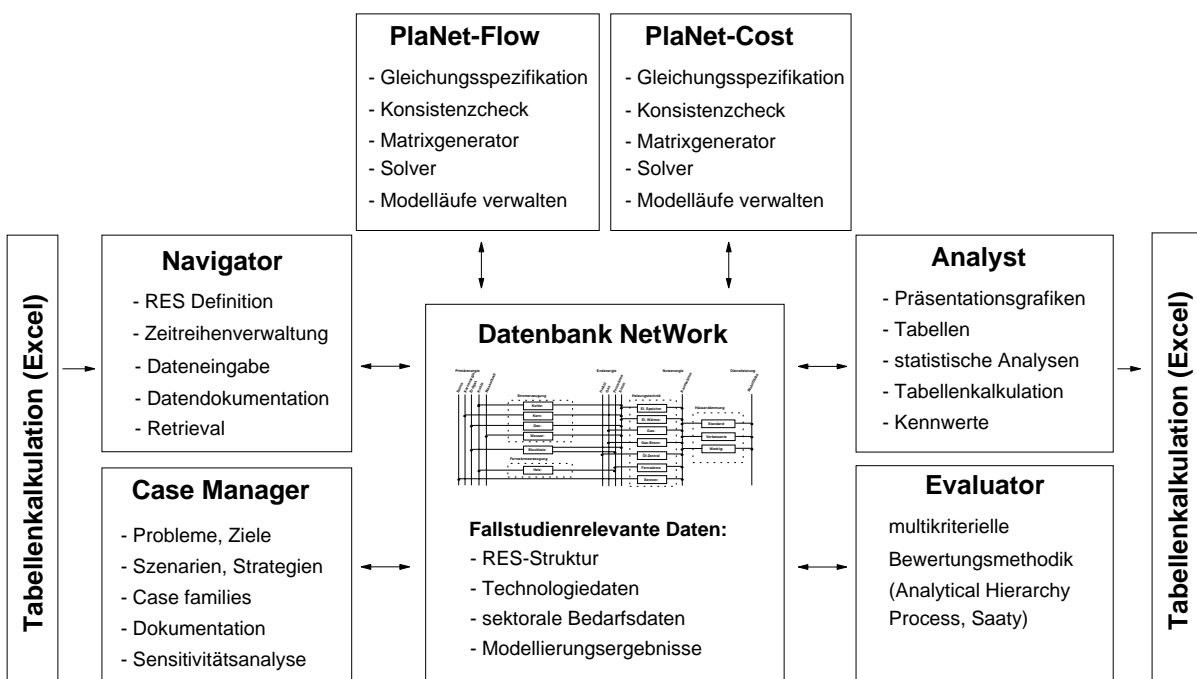


Abbildung 5-1: Der modulare Aufbau von *PlaNet*

Kernidee des Konzepts von *PlaNet* ist die **Standardisierung der Datenschnittstelle** für Energiesystemdaten. Dies wird durch eine klare Trennung von der Topologie des Energiesystems und der mathematischen Struktur des Modells erreicht. Die Datenbank *NetWork* orientiert sich ausschließlich an der Topologie des Energiesystems und nicht wie andere Datenbanken an der mathematischen Struktur eines Modells. Die Topologie der Energiesysteme wird dabei generell in Form eines Netzwerks, dem "Referenzenergiesystem" (RES) (vgl. Abschnitt 1.3), abgebildet. *NetWork* übernimmt die komplette Datenverwaltung, während die Rechenmodule selber nur noch mathematische Algorithmen enthalten.

*PlaNet* gewährleistet ein hohes Maß an **Flexibilität und Anpassungsfähigkeit**, um die Analyse optimal an die untersuchten Fragestellungen, Zielsetzungen und die zur Verfü-

gung stehenden Daten anzupassen. Die zeitliche und räumliche Auflösung der Analyse sowie der Aggregationsgrad des Energiesystems und damit der Detaillierungsgrad der Analyse können vom Anwender frei gewählt werden. Dasselbe gilt auch für die Anzahl und Verknüpfung der Technologien im Referenzenergiesystem sowie die Strukturierung der Sektoren.

*PlaNet* unterstützt alle Phasen der Energieplanung - von der Definition der Problemstellung über die Modellierung bis hin zur Erfolgskontrolle. Eine wichtige Komponente der **Entscheidungsunterstützung** ist dabei die lückenlose und so weit wie möglich automatisierte Dokumentation der Vorgehensweise im Rahmen einer Fallstudie. Dokumentiert werden die Struktur des Energiesystems (RES) sowie die Probleme, Ziele, Szenarien und Maßnahmen der Fallstudie und ihre Verknüpfung mit den Annahmen im Datensatz. Neben der Spezifikation des Gleichungssystems kann auch die Herkunft der Daten lückenlos beschrieben werden. Im Bereich der Modellierung unterstützt *PlaNet* die Erstellung und Verwaltung des Gleichungssystems. Die Szenariotechnik wird durch das Konzept hierarchischer Entscheidungsbäume schon auf der Ebene der Datenverwaltung unterstützt. Werkzeuge zur Erstellung von Tabellen, Grafiken und Standardberichten erleichtern die Auswertung der Modellläufe. Hilfsmittel für eine Bewertung der Modellergebnisse, insbesondere bei einer multikriteriellen Bewertung stehen zur Verfügung. Die Erfolgskontrolle (Monitoring) wird dadurch erleichtert, daß die Datenbank als Informationssystem weitergeführt und die Modellläufe leicht aktualisiert werden können.

*PlaNet* bietet eine "Windows"-orientierte **benutzerfreundliche grafische Bedienoberfläche** mit einer menügesteuerten Programmablaufsteuerung und einer maskenorientierten Dateneingabe. Konsistenzchecks fangen mögliche Fehler schon während der Dateneingabe ab. Ein kontextsensitives Hilfesystem erklärt die Funktionalität des Programms.

*PlaNet* wurde mit Visual Basic entwickelt und ist daher auf jedem Pentium PC unter MS-Windows einsetzbar. Dabei kommt die Microsoft Access Engine als relationale Datenbank zum Einsatz. *PlaNet* ist auf allen Computernetzwerken multiuserfähig. Eine Client-Server Implementierung ist konzeptionell vorgesehen.

Die beiden Rechenmodule in *PlaNet* zur Fluß- und zur Kostenberechnung bestehen jeweils aus sechs Komponenten: der Dialogkomponente zur Festlegung der *Gleichungsspezifikation*, dem *Konsistenzchecker*, dem *Gleichungssystemgenerator*, dem *Zeitreihengenerator*, der *Mappingroutine* zur Datenaufbereitung und dem *Solver*. Die Durchführung eines Modelllaufs, d. h. die Berechnung eines sogenannten *Case*, verläuft für jedes Rechenmodul nach dem gleichen Schema. Nachdem der Modellierer in *NetWork* das RES definiert hat, legt er über eine modulspezifische Eingabemaske die Spezifikation des Gleichungssystems fest. Diese Gleichungsspezifikation dokumentiert gleichzeitig auch alle Entscheidungen des Modellierers. Der *Konsistenzchecker* prüft, ob das Gleichungssystem vollständig und korrekt definiert wurde und liefert ein detailliertes Fehlerprotokoll. Da Gleichungssysteme immer aus

Gleichungen, Ungleichungen, Parametern und Variablen bestehen, wurde eine standardisierte Vorgehensweise für den *Gleichungssystemgenerator* konzipiert, der RES-Topologie, Gleichungsspezifikation und Daten zusammenbringt und das zu lösende Gleichungssystem mit Platzhaltern für Parameter und Variable erstellt. Die Lösungsreihenfolge der Gleichungen wird vom *Sequencer* des Gleichungsgenerators ermittelt. Anschließend prüft der *Zeitreihengenerator*, ob für alle Parameter und Variablen des Gleichungssystems Zeitreihen in der Datenbank existieren und legt fehlende an. Auf diese Weise wird aus RES und Gleichungsspezifikation das vollständige Profil der für einen Modellauf notwendigen Eingabedaten erstellt. Die Belegung der Parameterliste mit den im Modellauf zu verwendenden Hypothesen, wird vom *Case-Manager* verwaltet. Vor der Berechnung des Gleichungssystems wird dann durch die *Mappingroutine* der eigentliche Inputdatensatz für diesen Case erstellt. Der *Solver* ersetzt die Platzhalter des Gleichungssystems durch die Werte aus den entsprechenden Zeitreihen, berechnet mit dem Gleichungssystem die Werte der Variablen und speichert sie ab. Der Solver in *PlaNet* ist standardisiert und wird von beiden Modulen *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* benutzt.

### 5.3 Das Modul *PlaNet-Flow* zur Simulation der Flüsse des Energiesystems

*PlaNet-Flow* ist ein lineares Modell zur Energiebedarfsanalyse, zur Simulation von Energiesystemen und zur Analyse von Umweltbelastungen, das auf dem Konzept des Referenzenergiesystems aufbaut. Die physikalischen Flüsse (Energie, Material, Emissionen, Schadstoffe) werden im Referenzenergiesystem nach dem Prinzip des "Accounting Framework" für eine vorgegebene Nachfrage und verschiedene Marktdurchdringungsstrategien der Umwandlungstechnologien "buchhalterisch" bilanziert und die Energie- und Schadstoffbilanz des gesamten Energiesystems bestimmt. Eingriffe in das Energiesystem werden durch Veränderungen der Marktanteile modelliert, d. h., die Marktanteile konkurrierender Technologien sind die exogen vorgegebenden Parameter des Modells.

**Inputs** (Parameter) von *PlaNet-Flow* sind:

- die exogen vorgegebene Nachfrage nach einer Commodity,
- der exogen vorgegebene Fluß einer Commodity in oder aus einem Prozeß,
- der Marktanteil eines Prozesses an der Produktion oder am Verbrauch einer Commodity,
- das Verhältnis zweier Flüsse eines Prozesses, welches die Umwandlung einer Commodity in eine andere Commodity beschreibt (Nutzungsgrad, Emissionsfaktor oder Fuel-Mix eines Prozesses, Stromkennzahl eines BHKW's, Intensität einer Nachfrage).

**Ergebnisse** (Variable) von *PlaNet-Flow* sind:

- die Mengen der Commodities, bezogen auf eine Bilanzierungsperiode,

- die Flüsse der Commodities (pro Bilanzierungsperiode) in oder aus den Prozessen.

#### 5.4 Das Modul *PlaNet-Cost* zur Berechnung der Kosten des Energiesystems

Das Modul *PlaNet-Cost* setzt über die gemeinsame Datenschnittstelle auf der von *PlaNet-Flow* berechneten physikalischen Flußbilanzierung auf, bestimmt die erforderlichen Kapazitäten der Umwandlungstechnologien im RES und bilanziert die gesamten volkswirtschaftlichen Kosten des Energiesystems. Die Kosten umfassen Investitionskosten, Brennstoffkosten, fixe und variable Betriebskosten sowie die Summe der Kosten der Güter, die in das System eingeführt werden. Zur Bestimmung der Investitionskosten wird eine leistungsproportionale Annuität ermittelt, indem die leistungsbezogenen Investitionskosten gleichmäßig auf die technische Lebensdauer verteilt werden. Die installierte Leistung wird über einen Auslastungsfaktor aus dem kapazitätsrelevanten Fluß des Prozesses ermittelt. Zusätzlich können Steuern, externe Kosten oder DSM-Programmkosten (Demand Side Management) berücksichtigt werden. Zusätzlich werden für alle Güter des RES die spezifischen Gestehungskosten bestimmt. Zuletzt werden die über den Beobachtungszeitraum abdiskontierten Gesamtkosten des Energiesystems berechnet.

Das Kostenmodul benötigt zur Berechnung die folgenden **Inputs**:

- an der Systemgrenze: die Preise der Güter,
- für jeden Prozeß: der Fluß durch jede Verbindung,  
die Investitionskosten (bezogen auf die Kapazität),  
die fixen Betriebskosten (bezogen auf die Kapazität),  
die variablen Betriebskosten (flußbezogen),  
die Auslastung (h/a),  
die durchschnittliche Lebensdauer,  
die Kostenallokationsfaktoren bei Koppelproduktion.

Folgende **Steuern und Abgaben** können eingeführt werden:

- für Prozesse: mengenbezogene Steuern für alle Flüsse,  
geldwertbezogene prozentuale Steuern nur für Inputflüsse,  
Mehrwertsteuer nur für Outputflüsse,  
mengenbezogene externe Kosten für alle Flüsse,  
absolute DSM-Programmkosten,  
fixe DSM-Programmkosten bezogen auf die Kapazität,
- für Commodities: mengenbezogene Steuern,  
geldwertbezogene prozentuale Steuern.

Für Prozesse kann definiert werden,

- ob der Prozeß kostenrelevant ist (Dummyprozesse erzeugen keine zusätzlichen Kosten),
- ob die Kapazität exogen vorgegeben wird oder berechnet werden soll,
- welches der kapazitätsrelevante Fluß ist, wenn die Kapazität berechnet werden soll,
- für jeden Inputfluß:
  - ob er mit anderen variablen Betriebskosten belegt ist,
  - ob er mit externen Kosten belegt ist,
  - ob er mit mengen- oder geldwertbezogenen Steuern belegt ist,
- für jeden Outputfluß:
  - ob er kostenrelevant ist,
  - ob er mit anderen variablen Betriebskosten belegt ist,
  - ob er mit externen Kosten belegt ist,
  - ob er mit einer mengenbezogenen Steuer belegt ist,
  - ob er mit einer Mehrwertsteuer belegt ist,
- ob es absolute und/oder fixe DSM-Kosten gibt,
- ob die Kosten proportional zu den Flüssen oder benutzerdefiniert auf die kostenrelevanten Flüsse aufgeteilt werden sollen.

Folgende **Ergebnisse** werden für jedes Stützjahr ermittelt:

- für jeden Prozeß:
  - die installierte Leistung,
  - die gesamten Investitionskosten,
  - die gesamten fixen Betriebskosten,
  - die gesamten variablen Betriebskosten,
  - die gesamten Brennstoffkosten,
  - die Gesamtkosten des Prozesses,
  - die bezogenen Gestehungskosten der erzeugten Güter,
  - die Steuern, externe Kosten, DSM-Programmkosten,
- für jedes Gut:
  - die durchschnittlichen bezogenen Gestehungskosten,
- für das gesamte RES:
  - die Gesamtkosten des Systems.

Das Kostenmodul ermittelt über den gesamten Modellierungszeitraum:

- für jeden Prozeß:
  - die Gesamtkosten (Barwert),
- für das gesamte RES:
  - die Gesamtkosten (Barwert) des Systems.

## 5.5 Der Case-Manager als Werkzeug für das Szenariomanagement

Ziel der Modellierung ist nicht die einmalige Berechnung des Energiesystems. Vielmehr werden alternative Berechnungen (Cases) durchgeführt, um einen Vergleich energiepolitischer Handlungsalternativen zu ermöglichen. Da die Entwicklung der vom Entscheidungsträger nicht beeinflussbaren Rahmenbedingungen unbekannt ist, wird die Bewertung innerhalb einer Bandbreite von möglichen zukünftigen Entwicklungen, sogenannten Szenarien, durchgeführt. Szena-



rien sind Zukunftsbilder, die mögliche Entwicklungen illustrieren. Sie treffen keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit dieser Entwicklung und sind daher keine Prognosen. Energieszenarien stellen vielmehr eine denkbare, konsistente Entwicklung der energiewirtschaftlichen Leitparameter dar, wie z. B. Wirtschaftswachstum, Bevölkerungswachstum, Entwicklung der verfügbaren Ressourcen, Weltmarktpreise.

Der für das Simulationsmodell *PlaNet* entwickelte *Case-Manager* unterstützt den Modellierer bei der Aufgabe, die Vorstellungen der Entscheidungsträger zu quantifizieren und in Modellrechnungen umzusetzen. So wird eine vergleichende Bewertung von politischen Handlungsalternativen (Strategien) unter wechselnden Rahmenbedingungen (Szenarien) erreicht. Ein *Szenario* beschreibt eine Variante in der Entwicklung der vom Entscheidungsträger nicht beeinflussbaren Rahmenbedingungen. Szenarien lassen sich in Szenariotrends untergliedern, z. B. in Trends für die Preisentwicklung, für die Bevölkerungsentwicklung und für die wirtschaftliche Entwicklung. Ein *Szenariotrend* (scenario condition) beschreibt die Entwicklung eines Ausschnitts der Rahmenbedingungen. Die Summe aller Trends bildet ein Szenario. Ein optimistisches Szenario kann z. B. aus den Trends "niedrige Preisentwicklung", "mäßiges Bevölkerungswachstum" und "starkes Wirtschaftswachstum" gebildet werden.

Im strategischen Bereich des Energiesystems kann der Entscheidungsträger eingreifen und Marktanteile von Technologien beeinflussen, neue Technologien und Brennstoffe fördern und andere mit Grenzwerten oder Steuern einschränken. *Strategien* „beschreiben ein Vorgehen, das dazu führen soll, ein System in Abhängigkeit seines Zustandes durch eine vorgegebene Abfolge von Handlungen in einen gewünschten Zielzustand zu bringen“ /Schmidt 1996/. Strategien sind also Entscheidungen über alternative Aktionskurse und bestehen aus einer Kombination aufeinander abgestimmter Maßnahmen. Eine *Maßnahme* ist ein gezielter Eingriff in das System, die in der Regel auf einen Energieträger bzw. Schadstoff, eine Technologie oder einen bestimmten Sektor abzielt. Eine Strategie zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen könnte sich z. B. aus den Maßnahmen, "rationelle Energieverwendung", "Substitution von Kohle durch Gas und erneuerbare Energieträger" und "DSM-Maßnahmen zur Beeinflussung der Nachfrage und des Investitionsverhaltens der Verbraucher" zusammensetzen.

Der *Case-Manager* strukturiert Rechenläufe und ist die Schnittstelle zwischen inhaltlicher Formulierung eines Modellaufs und seiner mathematischen Quantifizierung. Inhaltlich besteht ein Case aus den Komponenten Szenarien, Szenariotrends, Strategien und Maßnahmen. Zur mathematischen Quantifizierung teilt der *Case-Manager* die Bestimmungsgrößen (Systemparameter) des Energiesystemmodells in zwei Bereiche. Auf der einen Seite sind die **Szenarioparameter**, die der Entscheidungsträger mit seinen Entscheidungsmöglichkeiten nicht beeinflussen kann und die die Rahmenbedingungen festlegen. Auf der anderen Seite befinden sich die **Strategieparameter**, die der Entscheidungsträger beeinflussen und aktiv

gestalten kann, um Energienachfrage, Technologiemix, Energieverbrauch und Umweltschäden zu beeinflussen.

Zur Bestimmung eines vollständigen und eindeutigen Modelldatensatzes für einen Case (Rechenlauf) muß jedem Systemparameter genau eine Hypothese zugeordnet werden. Der *Case-Manager* erleichtert die Zuordnung von Hypothesen zu Systemparametern. Statt für jeden Parameter aus der Systemparameterliste genau eine Hypothese zuzuordnen, erlaubt der *Case-Manager*, einzelnen Komponenten Paare aus Systemparametern und Hypothesen zuzuordnen. Diese Komponenten lassen sich dann beliebig kombinieren, wobei in einem ersten Schritt Trends zu Szenarien gruppiert und Maßnahmen zu Strategien gebündelt werden können. Strategien und Szenarien lassen sich dann beliebig in Form eines Entscheidungsbaums kombinieren. Szenarien und Strategien bilden die Knoten dieses Baumes. Jeder Knoten des Baumes steht dabei für einen Case, der sich aus denjenigen Szenarien und Strategien zusammensetzt, die sich auf dem Pfad zwischen ihm und der Wurzel dieser *Case-Familie* befinden. Mit der Festlegung aller Szenarien und Strategien eines Cases sind auch die ihn beschreibenden Trends bzw. Maßnahmen bestimmt. Da allen diesen Komponenten ein genau umrissener Satz von Systemparametern mit entsprechenden Hypothesen zugeordnet ist, wird der vollständige Case aus der Summe der Definitionen gebildet. Durch die unbegrenzte Kombinationsmöglichkeit einzelner Komponenten im Entscheidungsbaum wird es möglich, eine Vielzahl von Cases zu erstellen, ohne die Hypothesenzuordnung jedesmal komplett neu zu definieren. Ein Konsistenzcheck prüft, ob ein Parameter nicht zweimal mit unterschiedlichen Hypothesen belegt wird.

Die zweite Funktion des *Case-Managers* ist die Dokumentation der inhaltlichen Vorgehensweise bei der strategischen Analyse und beim Aufbau der Cases. Deswegen kann mit dem *Case-Manager* die Bedeutung der einzelnen Komponenten mit Texten inhaltlich beschrieben werden. Durch die Zuordnung einzelner Parameter-Hypothesenpaare zu den Komponenten wird dokumentiert, wie die inhaltliche Aussage jeweils in entsprechende Zahlenwerte für die Modellierung übersetzt wird. Der Entscheidungsbaum dokumentiert, welche Komponenten einen Case bilden.

Da die geschilderten Fragestellungen auch für andere Komponenten aus dem *MESAP*-Instrumentarium relevant erscheinen, könnte eine sinnvolle Weiterführung der Aktivitäten darin bestehen, den für das Simulationsmodell *PlaNet* entwickelten *Case-Manager* auch für andere *MESAP*-Rechenmodule nutzbar zu machen.

## 5.6 Modellierung des Verkehrssektors in Deutschland

Ziel der Fallstudie war es, anhand des Verkehrssektors in Deutschland zu zeigen, wie die Optimierungsrechnungen des *IKARUS-LP*-Modells mit *PlaNet* simuliert werden können,

sowie die Erfahrungen zu vergleichen und eine Basis zu schaffen, die es ermöglicht, auf den Ergebnissen des LP-Modells aufsetzend, weitergehende Simulationsläufe durchzuführen. Ausgangspunkt für die Berechnungen ist die mittels des *SQL-Link* erstellte *MESAP*-Fallstudie *IKARUS-LP* (vgl. Kapitel 2.3). Zusätzlich wurde zur für *PlaNet* notwendigen Festlegung der Marktanteile der einzelnen Technologien (vgl. Abschnitt 5.3) auf die auf der *IKARUS* CD-ROM dokumentierten Basisfälle des *IKARUS-LP*-Modells zurückgegriffen. Als Modellierungsperiode werden, wie im *IKARUS-LP*-Modell, die Stützjahre 1989, 2005 und 2020 gewählt.

Im Gegensatz zum *IKARUS-LP*-Modell, bei dem für die alten und für die neuen Bundesländer zwei unabhängige identische RES definiert werden, nutzt *PlaNet* das Konzept des Master-RES, welches für beide Regionen nur einmal angelegt wird. Das aus dem *IKARUS-LP*-Modell abgeleitete RES des Verkehrssektors für Deutschland mit 236 Gütern und 302 Prozessen konnte in *PlaNet* durch die Nutzung des Master-RES und die Vernachlässigung von nicht benötigten Platzhaltern (Erweiterungen lassen sich in *PlaNet* bei Bedarf leicht implementieren) auf 56 Güter und 54 Prozesse reduziert werden. Damit ist das RES in *PlaNet* wesentlich kompakter und übersichtlicher.

*PlaNet* besitzt eine zentrale Datenbank, in der alle Daten als Zeitreihen gespeichert sind. Damit kann *PlaNet* für jede Information auch grafisch eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung geben. Im Gegensatz dazu sind im *IKARUS-LP*-Modell die Daten und Ergebnisse nach Regionen und Stützjahren in getrennten Datensätzen gespeichert und können nur nach manueller Aufbereitung im zeitlichen Zusammenhang visualisiert werden.

Das Konzept des Master-RES in *PlaNet* ermöglicht die Datenvererbung von der Master-Region *Deutschland* in die zwei Regionen *Alte Bundesländer* und *Neue Bundesländer*. Technische Daten, die in beiden Regionen gleich sind, müssen daher nur einmal bei der Master-Region gespeichert werden. Dadurch kann die fehleranfällige Datenredundanz auf ein Minimum beschränkt werden.

Abbildung 5-2 zeigt beispielhaft den Marktanteil des Prozesses "Besetzung f. PKW P-Nah" am Gut "Personen-km Nahverk. P-Nah". Die Daten werden für die in der Modellierungsperiode definierten Stützjahre 1989, 2005 und 2020 ausgewiesen. Im unteren Teil des Bildschirms findet sich eine grafische Darstellung der Zeitreihe sowie eine Tabelle, die um die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (Gr.rate) ergänzt ist. In die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (Gr.rate) ergänzt ist. In Abbildung 5-2 ist ebenfalls das Vererbungsprinzip für Daten zu erkennen. Während die Daten für die Stützjahre 1989 und 2005 explizit für Ostdeutschland eingegeben wurden, wurde für 2020 kein Wert angegeben. Dieser wird daher aus der Master-Region vererbt. Die Hypothese REF entspricht dem Basisreferenzfall.



**Abbildung 5-2:** Marktanteil des Prozesses "Besetzung f. PKW P-Nah" an der Bildung des Gutes "Personen-km Nahverk. P-Nah"

Nach der Simulation werden mit dem Modul *Analyst* Berichte über die aggregierten Simulationsergebnisse erstellt. Die Darstellung erfolgt zeitreihenorientiert in Form von Tabellen und Grafiken. Dabei werden die Sektoren Personenverkehr und Güterverkehr in Ost-, West- und Gesamtdeutschland unterschieden. Für diese Sektoren wurden jeweils Berichte für die Zusammensetzung der Verkehrsmittel, den Energieträgermix und die Emissionen angelegt, die ebenfalls in der Datenbank gespeichert sind. Der interaktive Ansatz des *Analyst* ermöglicht es, zusätzliche Berichte über die Modellläufe anzufertigen, ohne zu programmieren. Abbildung 5-3 zeigt den Ausschnitt eines *Analyst*-Reports für die Verkehrsmittel des Personenverkehrs.



**Abbildung 5-3:** Ergebnisdarstellung mit dem Modul *Analyst*

## 5.7 Fazit

Das Planungsinstrument *PlaNet* ist ein entscheidungsunterstützendes System für die strukturierte Energie- und Umweltplanung, in dessen Mittelpunkt die zentrale Datenbank *NetWork* steht. Während die standardisierte Datenschnittstelle die Kopplung der Rechenmodule vereinfacht, ermöglicht die Gestaltung der Datenbank als Informationssystem eine umfassende Dokumentation der Daten und eine transparente Darstellung der strategischen Vorgehensweise während einer Fallstudie. *PlaNet* basiert auf dem Konzept der strukturierten Planung und unterstützt alle Phasen des Planungsprozesses. Es erweitert damit den klassischen Horizont der Planungsinstrumente von der reinen Modellierung, d. h. der reinen Berechnung des Energiesystems, zu einer Entscheidungsunterstützung, die auch die Gestaltung der strategischen Vorgehensweise sowie die Auswertung, Darstellung und multikriterielle Bewertung der Ergebnisse umfaßt. Alle wesentlichen Informationen zu einer Fallstudie werden in

einer einzigen Datenbank gespeichert und dokumentiert. Dies umfaßt Probleme, Ziele, Systembeschreibung, untersuchte Maßnahmen, Szenarien, Daten, die mathematische Modellbeschreibung, Gestaltung der Cases, Modellergebnisse, Analysereports und Bewertungsschema. Die übersichtliche Strukturierung des Planungsprozesses, die vollständige Unterstützung aller seiner Phasen, sowie ausführliche Dokumentationsmöglichkeiten, gepaart mit benutzerfreundlichen Retrievalfunktionen schaffen die Grundlage für die heute notwendige Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Planung.

*PlaNet* ist flexibel bezüglich der zeitlichen, örtlichen und sektoralen Auflösung für die Modellierung des Energiesystems. Die Struktur des Referenzenergiesystem (RES) kann vom Benutzer vorgegeben werden. *PlaNet* berechnet die Energie- und Materialflüsse im RES, den Ressourcenverbrauch, die Technologiekapazitäten, die Emissionen und die Kosten des Energieversorgungssystems. *PlaNet* berechnet für eine Vielzahl von energiewirtschaftlichen Maßnahmen die Auswirkungen auf Energieverbrauch, Kosten und Schadstoffemissionen des Energiesystems. *PlaNet* ist auch geeignet, Sachbilanzen für die ganzheitliche Bilanzierung zu erstellen.

Durch Simulationsrechnungen mit dem Datensatz und dem RES des Verkehrssektors aus dem *IKARUS-LP*-Modell mit dem Simulationsmodell *PlaNet* zeigt sich, daß *PlaNet* geeignet ist, Modellrechnungen des *IKARUS-LP*-Modells nachzuvollziehen und für weitergehende Analysen aufzubereiten. Die mit *PlaNet* angestrebten konzeptionellen Verbesserungen bei der Übersichtlichkeit der Modellierung und der Ergebnisdarstellung sowie bei Case-Management und Datenhaltung konnten anhand dieses Anwendungsbeispiels erfolgreich unter Beweis gestellt werden.



## 6 Erweiterungen der Analysemöglichkeiten von *NetWork*

### 6.1 Problemstellung und Zielsetzung

Neben der methodischen Weiterentwicklung einzelner Komponenten des *MESAP*-Instrumentariums, die in den vorangegangenen Abschnitten erläutert werden, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Einbindung des *ECOLOG*-Modells ‘*E<sup>3</sup>Net*’ und Integration neuer methodischer Ansätze in das *IKARUS*-Instrumentarium“ (*ECOLOG II*) auf der Grundlage der zentralen Datenbank *NetWork* ein Graphikeditor als eine wesentliche Erweiterung der Analysemöglichkeiten von *NetWork* entwickelt, der als *Netzwerkdesigner und -analyst (NDA)* oder *Netzwerkeditor* bezeichnet wird. Der NDA erlaubt eine interaktive Erstellung der Modellstruktur eines Energiesystemmodells in der Darstellungsform des Referenzenergiesystems (RES). Dabei steht vor allem die Übertragung einer textuellen in eine visualisierte graphische Modellbeschreibung, die intuitiv vom Anwender erfaßt und verändert werden kann, im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten. Während in unterschiedlichsten Bereichen, wie z. B. bei Petri-Netzen, Fließ- und Blockdiagrammen, System-Dynamics, Bond-Graphen oder ganzheitlicher Bilanzierung, graphische Modellbildungsmethoden bereits heute zur Verfügung stehen, gibt es für Energiesystemmodelle noch keine etablierte Methode, die eine interaktive graphische Modellerstellung am Rechner ermöglicht. Da der Ansatz des Referenzenergiesystems (vgl. Kapitel 1.3) bereits seit Mitte der 70er Jahre als Basis für die Darstellung der Topologie von Energiesystemmodellen dient, wurde diese Methode zur Grundlage verwendet, um einen *Netzwerkeditor* zu entwickeln, der eine graphische Modellbildungsmöglichkeit für Energiesystemmodelle auf der Grundlage von *NetWork* zur Verfügung stellt.

Für die Modellbildung und -anwendung stehen heute verschiedene Softwarewerkzeuge, wie z. B. *GAMS* /Brooke et al. 1992/ im Bereich der Optimierung oder *ACSL* /RAPID HOUSE 1995/ und *Stella III* /HPS 1994/ im Bereich der Simulation, zur Verfügung. Wegen komplizierter EingabeprozEDUREN und Algorithmen ist die Fehlersuche in den Eingabe- oder Ergebnisdatsätzen oftmals schwierig durchzuführen. Der Energieplaner wird dadurch von der eigentlichen Aufgabe, Schlüsselgrößen und deren Verknüpfungen zu definieren und Entscheidungsalternativen zu analysieren, abgelenkt, da er sich zu intensiv mit der Handhabung des verwendeten Werkzeugs auseinandersetzen muß. Jeder Modellierer wünscht sich daher verständliche und beherrschbare Werkzeuge zur Energiesystemanalyse.

Um die Transparenz des Modells für den Modellersteller und Auftraggeber zu erhöhen und um die Überprüfung der erstellten Modelle zu ermöglichen, kann das Modell jedoch dem Modellbegutachter hierarchisch gegliedert und in graphischer Form präsentiert werden, so daß auch ein am Modellierungsprozeß Unbeteiligter rasch den Überblick über das Modell gewinnen



und diskutieren kann. Graphische Mittel ermöglichen, „eine größere Menge von Informationen gleichzeitig kompakt, verständlich und handhabbar“ darzustellen.

Für die Entwicklung des *Netzwerkeditors* wurde während der 1. Projektphase ein vorläufiges Arbeitskonzept erstellt, das dann im 2. Projektabschnitt in einen ersten Prototypen umgesetzt wurde. Im 3. Projektabschnitt wurden vor allem die Analysemöglichkeiten, die auf einem mit dem *Netzwerkeditor* entwickelten Referenzenergiesystem durchgeführt werden können, analysiert und konzeptionell erfaßt. Die methodische Konzeption, die graphentheoretischen Grundlagen und die software-technische Implementierung des graphischen *Netzwerkeditors* werden in den folgenden Abschnitten behandelt

## 6.2 Die methodische Konzeption graphischer Modellbildung

Die Erkenntnis, daß sowohl die Topologie als auch Detailinformationen möglichst in graphischer Form, d. h. visualisiert, dem Anwender der auf *NetWork* basierenden Modelle präsentiert werden sollten, geht zurück auf Arbeiten aus dem Bereich der kognitiven Psychologie /Anderson 1983/; /Dörner 1993/, aus dem Bereich der Ergonomie von Computer-Bedienoberflächen /Balzert et al. 1988/; /Fähnrich et al. 1994/; /Stary 1994/ und aus den mit energiewirtschaftlichen Fragestellungen eng verwandten Gebieten der Regelungs- /Fejes et al. 1993/ und Verfahrenstechnik /Bär 1993/, in denen bereits graphische Editoren entwickelt worden sind.

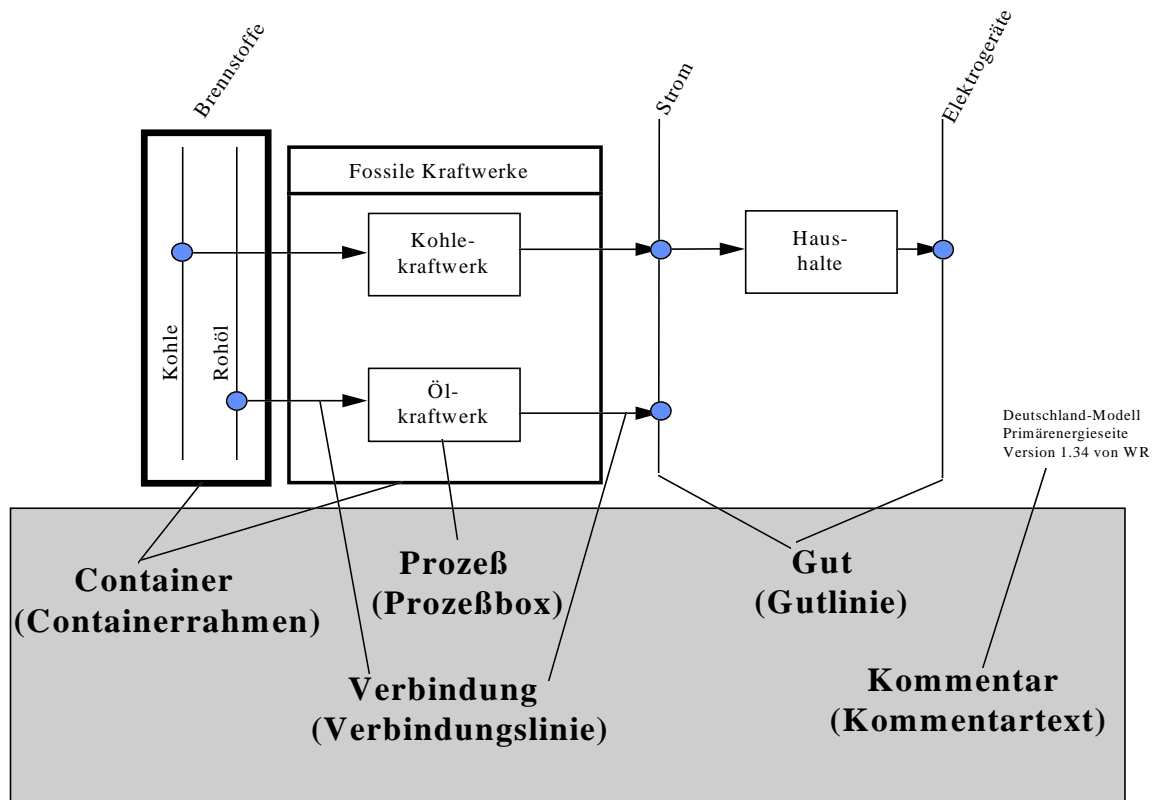
Als Grundlage für die visualisierte Darstellung der Topologie eines Energiesystemmodells im *Netzwerkeditor* dient die im Bereich der energiewirtschaftlichen Modellbildung übliche Methode des Referenzenergiesystems. In Abbildung 6-1 wird das RES mit seinen Bausteinelementen und den jeweils zugeordneten graphischen Symbolentsprechungen vorgestellt.

Das graphische Element Prozeßbox wird im Referenzenergiesystem stellvertretend für einen Prozeß in der realen Welt abgebildet, in dem ein Gut in ein anderes Gut umgewandelt wird. Ein Prozeß kann z. B. ein Kohlekraftwerk sein, in dem Kohle in Strom und Wärme transformiert wird. Die Güterlinie hingegen steht für ein Gut in der realen Welt, das Ein- oder Ausgangsgut eines Prozesses sein kann. Verbindungslinien repräsentieren den Fluß eines Gutes in der realen Welt, wobei die Verbindungslinie sowohl Eingangs- als auch Ausgangsfluß eines Prozesses sein kann. Die Pfeilrichtung der Verbindungslinie gibt dabei die ausgezeichnete Flußrichtung des Gutes an.

## 6.3 Graphentheorie und Referenzenergiesystem

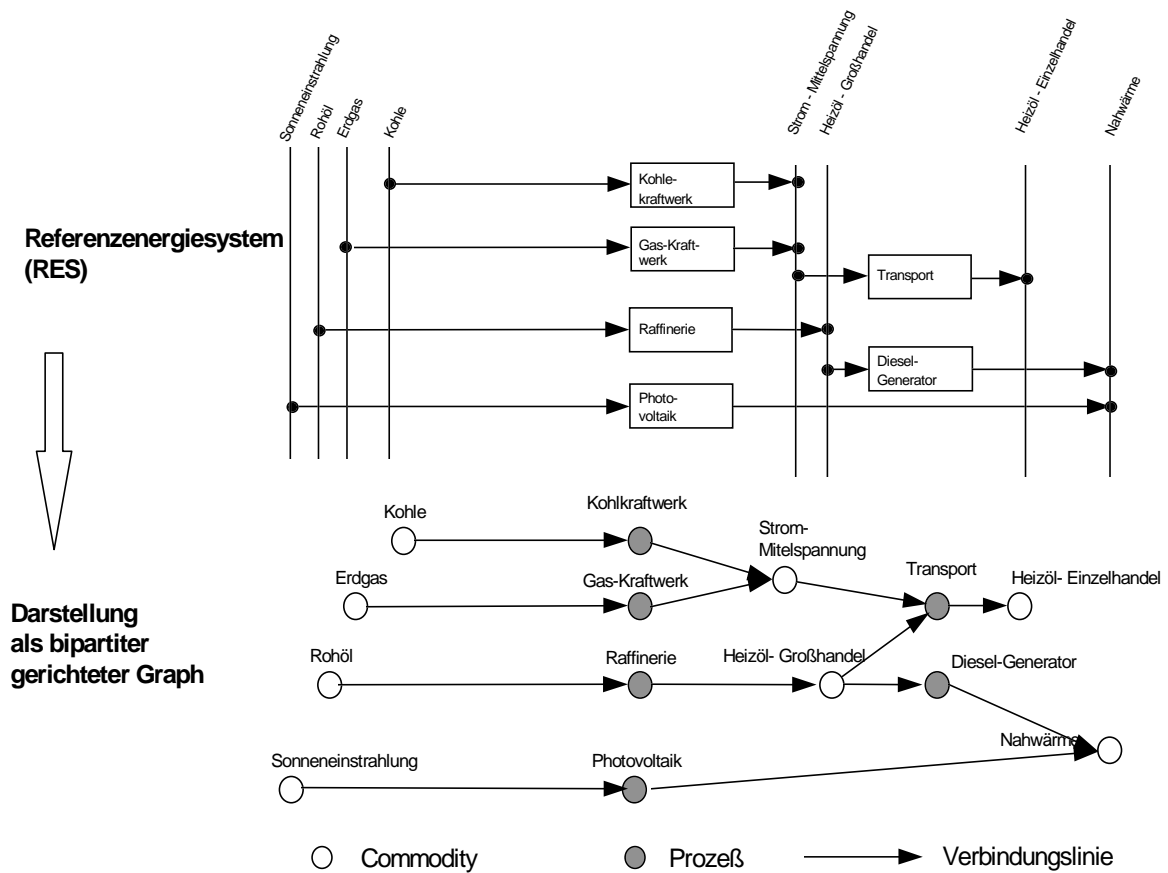
Bei der Konzeption des *Netzwerkeditors* ist auf die Graphentheorie (vgl. z. B. /Hässig 1979/; /Aigner 1993/; /Clark Holton 1995/; /Turau 1996/) zurückgegriffen worden, um

auf deren Definitionen, Sätze und Algorithmen bei der Umsetzung aufsetzen zu können. Das Referenzenergiesystem ist aus graphentheoretischer Sicht ein endlicher, gerichteter, bipartiter Graph, d. h. ein Graph mit zwei unterschiedlichen Knotenarten und spezifizierter Richtung jeder Kante. Die Übertragung des Referenzenergiesystems in eine Darstellung als Graph ist in Abbildung 6-2 veranschaulicht.



**Abbildung 6-1:** Die Bausteine des Referenzenergiesystems und die den Bausteinelementen zugeordneten graphischen Symbole

Der in Abbildung 6-2 dargestellte Graph, der dem Referenzenergiesystem zugeordnet wird, besitzt zusätzlich eine implizite Vorzugsrichtung, da es Konvention ist, die Primärenergie-seite immer links und die Nutzenergie-seite immer rechts im Referenzenergiesystem einzuzichnen. Dadurch wird den Knoten des Graphen als zusätzliche Eigenschaft eine Ordnungsrelation zugewiesen. Die resultierende graphische Darstellung des Referenzenergiesystems besitzt eine hohe Ähnlichkeit zu den ebenfalls auf bipartiten Graphen basierenden Petri-Netzen, wenn Güterlinien durch Kreise ersetzt und beliebig plaziert werden dürften. Da Petri-Netze jedoch zur Modellbildung im Bereich der diskreten Simulation entwickelt worden sind, unterscheiden sich die Strukturierungs- und Berechnungsmethoden, die auf der Topologie des bipartiten Graphen jeweils durchgeführt werden /Reger 1995/.



**Abbildung 6-2:** Referenzenergiedarstellung als Graphen

Der dem Referenzenergiesystem zugeordnete Graph  $G$  besteht aus der Menge der Knoten  $V$  und der Menge der Kanten  $E$  mit einer Abbildung  $\Psi$ , die jedem  $e \in E$  eine Menge von zwei unterschiedlichen Elementen  $v, v' \in V$  zuordnet. Betrachtet man zunächst nur die Basiselemente *Güter*, *Prozesse* und *Verbindungen*, so repräsentiert das Referenzenergiesystem einen bipartiten Graphen, da  $V = V_C \cup V_P$  und  $E \subseteq V_C \times V_P \cup V_P \times V_C$ , wobei die Menge  $V_C$  die Güter und die Menge  $V_P$  die Prozesse umfaßt. Da für eine Verbindungsline zwischen  $v$  und  $v'$  nur ein  $e = (v, v') \in E$  mit  $v \neq v'$  im Referenzenergiesystem zugelassen ist, kann dieses als schlichter Graph angesehen werden. Da das Referenzenergiesystem auch als Bild gezeichnet werden kann, in dem sich außer in den Knotenelementen Güterlinien und Prozeßboxen keine Verbindungslinien schneiden, ist der dem Referenzenergiesystem zugeordnete Graph  $G$  planar.

Durch die Verwendung von *Containern* wird der Überblick und damit die Transparenz für den Anwender erhöht, da dadurch eine Hierarchisierung erreicht werden kann, die die Elemente des Referenzenergiesystems in einer Rangordnung, d. h. einer Ober- und Unterordnung, gliedert. Hierfür ist es notwendig, ein Konzept für hierarchische Netztopologien aufzustellen. Eine wesentliche Anforderung an das Konzept ist die Reihenfolgenunabhängigkeit

bei der Platzierung von Elementen im Referenzenergiesystem /Eschenbacher 1990/. Dadurch können Prozeßboxen und Güterlinien in beliebiger Folge im Referenzenergiesystem platziert werden. Reihenfolgenunabhängigkeit bei der Platzierung von Containern bedeutet, daß sowohl das Top down als auch das Bottom up Prinzip bei Modellbildung unterstützt werden kann /Lehner et al. 1995/. Das im folgenden beschriebene Konzept der hierarchischen Graphen, das als Grundlage für die Darstellung eines hierarchisch strukturierten Netzes für den *Netzwerkeditor* erarbeitet worden ist, ist an die Arbeiten von /Schürr 1991/ und /Himsolt 1994/ angelehnt.

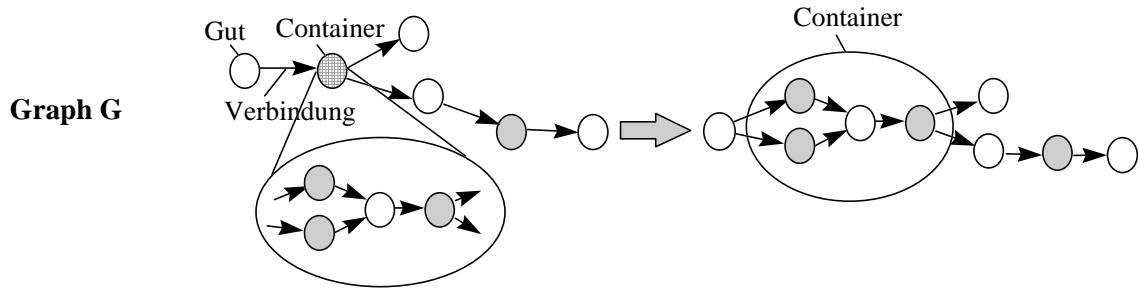
Bei dem Konzept der hierarchischen Netztopologie kann zwischen den Funktionen zum Bearbeiten des erweiterten RES (d. h. Aufbau und Löschen) und den Funktionen zur Darstellung der unterschiedlichen hierarchischen Strukturen unterschieden werden. Das Konzept basiert funktionsunabhängig auf einer gemeinsamen Datenstruktur der hierarchischen Graphen. Ein hierarchischer Graph besteht aus einem terminalen Graphen  $G$ , seiner Historie  $H$  und dem Ableitungsbaum  $T$ .

Eine Hierarchie kann erzeugt werden, indem z. B. ein Prozeß detaillierter modelliert wird. Hierfür wird einem Knoten  $v$  ein Container  $s$  zugeordnet, der wiederum einen Graphen  $G_U$  enthält, der als *Teilnetz* bezeichnet wird. Eine Aufteilung des RES in Teilnetze ist graphentheoretisch nur dann möglich, wenn im bipartiten Graph ein Knoten durch ein passendes Teilnetz ersetzt werden kann. Eine Voraussetzung ist hierfür, daß die Ein- und Ausgänge des Teilnetzes identisch mit den Ein- und Ausgängen des hierarchisch höher liegenden Netzes sind. Besteht ein Zugriff auf Knoten innerhalb eines Teilnetzes von höher liegenden Knotenebenen, so muß das Teilnetz vorher in die höher liegende Knotenebene integriert werden und der Knoten, der das Teilnetz enthält, im Graphen ersetzt werden. Dies zeigt exemplarisch Abbildung 6-3, in der einem Kohlekraftwerk seine Bestandteile zugeordnet werden.

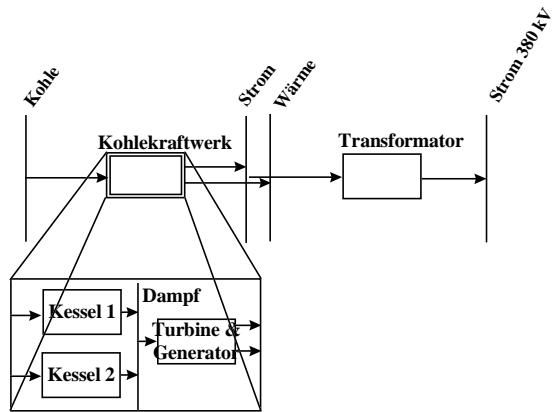
Der Graph  $G$  enthält als Ergebnis einen Container. Die hierarchische Struktur des Gesamtgraphen  $G$  und seiner Teilnetzgraphen  $\{G_U\}$  wird in einem sogenannten Ableitungsbaum  $T_{hier}$  gespeichert. In Abbildung 6-4 ist ein Beispiel für die hierarchische Strukturierung eines RES durch Containerelemente und die dazu gehörige Gruppierung im Objektbaum  $T$  abgebildet. An den Blättern des Objektbaumes befinden sich die Basiselemente Gut und Prozeß des RES. Die Tiefe des Objektbaumes ist abhängig von der maximalen Verschachtelungstiefe der Container.

Durch die unterschiedlichen Modellierungsmöglichkeiten (Top down oder Bottom up) im Netzwerkeditor ist bei der Erstellung eines RES zu unterscheiden,

1. ob ein neues Objekt als Container in das RES eingefügt wird,
2. ob ein Container durch Zusammenfassen von bestehenden Objekten im RES erzeugt wird,
3. ob ein Container gelöscht wird,

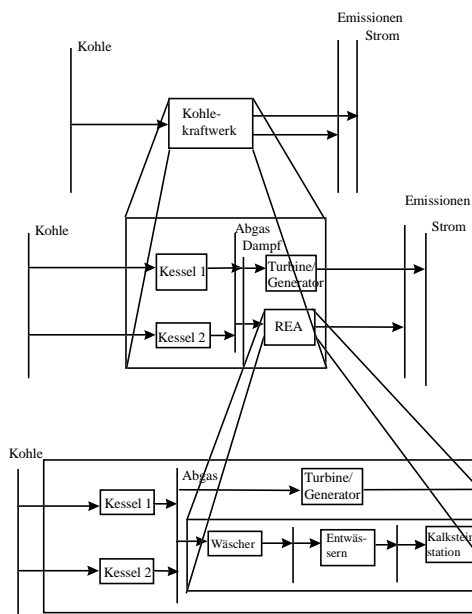


**Referenzenergiesystem**

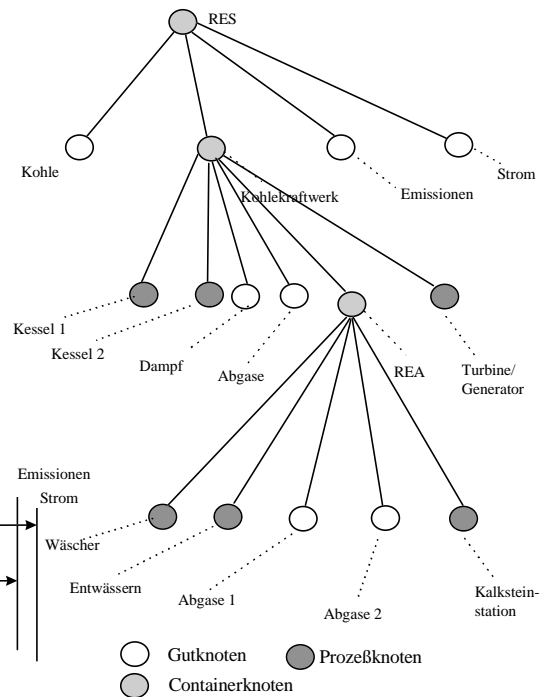


**Abbildung 6-3:** Einfügen einer Hierarchie in das planare RES

**Hierarchische Struktur im RES**



**Objektbaum T**



**Abbildung 6-4:** Hierarchische Struktur im RES und Umsetzung im Objektbaum T

4. ob ein Container aufgehoben wird,
5. ob ein Container verschoben wird.

Die Regeln für die Bearbeitung des Objektbaum T sind durch die Graphengrammatik für hierarchischen Graphen festgelegt /Nagl 1979/.

Durch die Trennung der hierarchischen Struktur von der Netzstruktur wurde ein flexibles und erweiterbares Konzept geschaffen, das verschiedene softwaretechnische Umsetzungen zuläßt, da einerseits jeder Container in einem eigenen Fenster auf dem Bildschirm dargestellt andererseits aber auch automatisch der Inhalt eines Containers ins Gesamt-RES eingefügt werden kann.

Die Übersichtlichkeit, der dargestellten hierarchischen Strukturen wird über verschiedene Sichten geregelt. Sie sind im erweiterten Objektbaum T abgespeichert. Bei der Behandlung von Sichten ist zu unterscheiden, ob diese hierarchische Strukturen sichtbar bzw. unsichtbar graphisch darstellen oder ob sie als Filter eingesetzt werden. Im ersten Fall ist es nur notwendig, Containern das Attribut *closed* bzw. *open* zuzuordnen.

Da mehrere unterschiedliche Sichten bzw. Filter auf ein bestehendes RES existieren können, sind unterschiedliche hierarchische Sichten-Objektbäume notwendig. Zur Filterung der Darstellung werden den Knoten (Prozessen, Gütern und Containern) die Attribute „sichtbar“ und „unsichtbar“ zugeordnet (vgl. Abbildung 6-5).

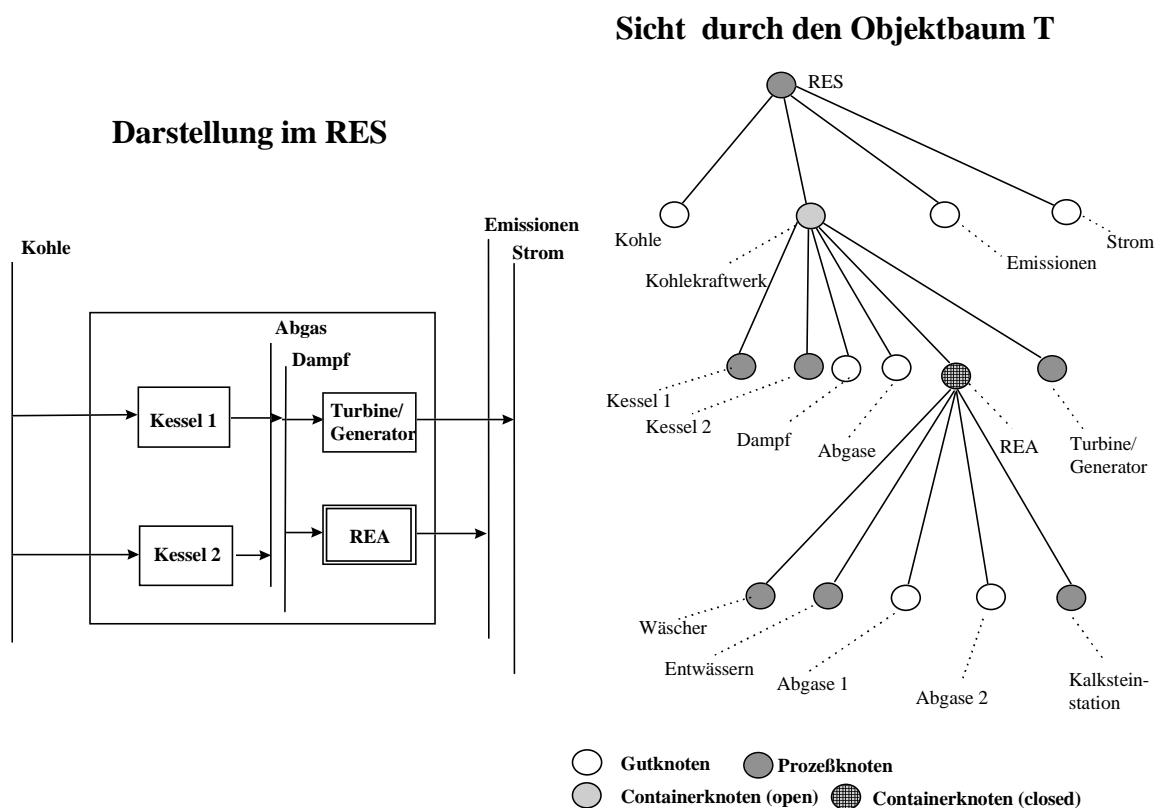
Die vorgenommene Übertragung des Referenzenergiesystems in eine graphentheoretische Beschreibung ermöglicht eine mathematische Fundierung der Regeln, die bei der Erstellung des RES beachtet werden müssen. Die Graphengrammatik gibt hierbei an, nach welchen Regeln der Graph des RES verändert wird. Hierbei kann bei den Regeln zwischen Ersetzen bzw. Einfügen eines Knotens (Prozeß oder Gut), einer Verbindung und eines Subgraphen unterschieden werden.

Bei der Anwendung des Containers im *Netzwerkeditor* ist von besonderer Bedeutung, daß die für die Berechnung nötige Planarität des dem Referenzenergiesystem zugeordneten Graphen nicht aufgegeben wird. Im Falle einer vollständigen Ersetzung aller Container  $s_i$  durch die zugeordneten Untergraphen  $G_U$  kann der Gesamtgraph  $G$ , der nur Basiselemente enthält, immer wieder erstellt werden /Himsolt 1994/. Jedoch können die Container bei der mathematischen Beschreibung dazu verwendet werden, Restriktionen auf Gruppen von Prozessen oder Gütern zu definieren. Beispielsweise könnte im Optimierungsproblem dadurch die Obergrenzen für den Primärenergieverbrauch fossiler Energieträger begrenzt werden.

#### **6.4 Softwaretechnische Umsetzung**

Für die softwaretechnische Umsetzung des Netzwerkseditors wurde ein Prototyp entwickelt. Beim Prototypen des NDA handelt es sich um ein in Visual Basic 3.0 programmiertes Windows

3.11 Programm, das auch unter Windows 95 verwendet werden kann. Abbildung 6-6 zeigt die Bedienoberfläche des Netzwerkeditors nach dem Öffnen einer existierenden Fallstudie. Im Arbeitsfenster wird das existierende RES angezeigt, wie es beim Beenden der letzten Arbeitssitzung aufgebaut war.

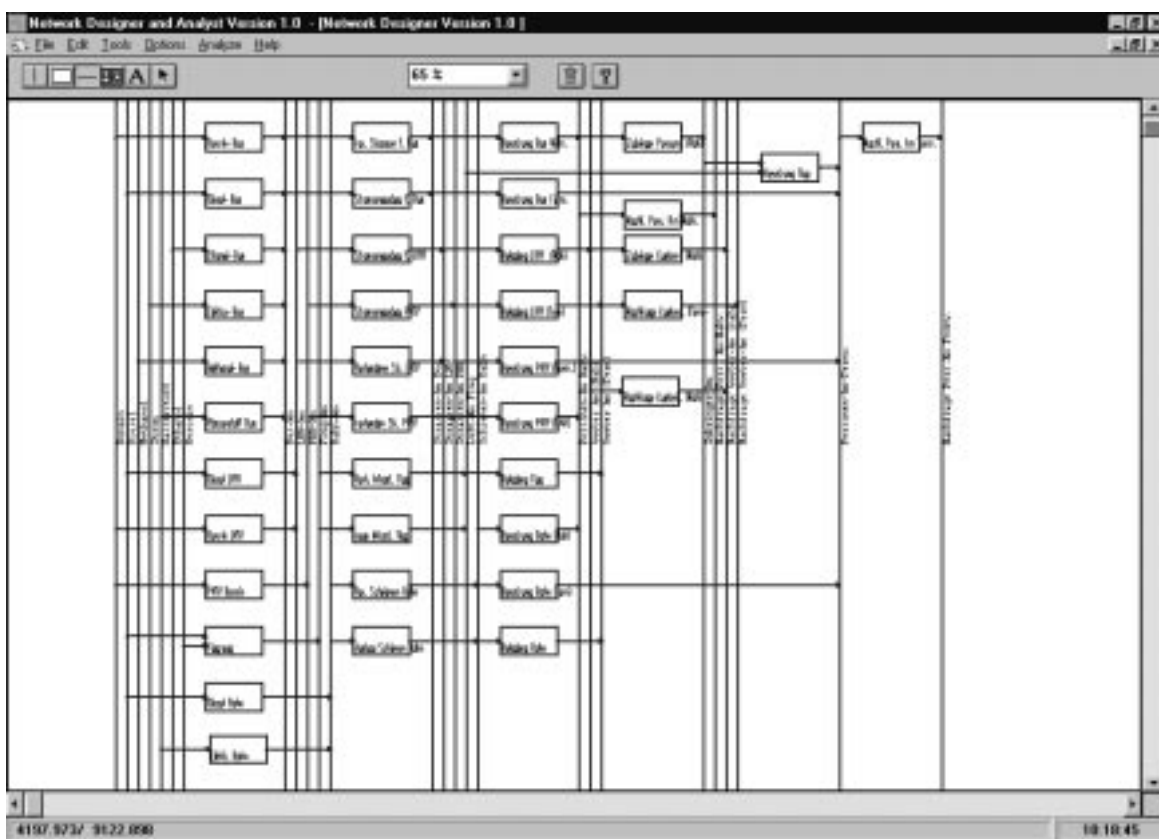


**Abbildung 6-5:** Hierarchische Darstellung des RES durch Sichten

Unterhalb der Menüs wird dem Anwender in der Benutzeroberfläche eine Werkzeugleiste angezeigt, in der die verschiedenen Bausteinelemente des Netzwerkeditors zur Verfügung gestellt werden. Durch Anklicken des gewünschten Symbols in dieser Werkzeugleiste und einem erneuten Mausklick in der Arbeitsfläche kann der Anwender ein graphisches Objekt im Arbeitsfenster und damit im Referenzenergiesystem positionieren. Abbildung 6-6 macht dabei deutlich, daß die Namen der senkrechten Güterlinien durch den Netzwerkeditor vertikal so positioniert werden, daß sie für den Anwender immer angezeigt werden, auch wenn der Ausschnitt nach oben oder unten verschoben wird (sog. *Scrollen*).

Folgende Funktionen zum Erstellen eines Energiesystemmodells stehen im NDA-Prototypen zur Verfügung:

- Erzeugen und Plazieren neuer Objekte;
- Sofortige Konsistenzprüfung nach der Plazierung mit evtl. Zurückweisung von Aktionen, wenn gegen die Erstellungsregeln des Referenzenergiesystems verstoßen wird;
- Anwählen und Verändern von Objekteigenschaften;
- Verschieben von Objekten. Dabei werden die Verbindungslinien, die z. B. zwischen Güterlinien und dem verschobenen Prozeß verlaufen, automatisch neu positioniert;
- Löschen von Objekten, wobei im Falle von Prozeßboxen oder Güterlinien verbundene Verbindungslinien automatisch mitgelöscht werden.
- Layout-Algorithmus zum automatischen gleichmäßigen Anordnen der Objekte.



**Abbildung 6-6:** Benutzeroberfläche des NDA mit geöffneter Fallstudie

Alle oben beschriebenen Aktionen werden immer direkt auf der zentralen Datenbank *NetWork* durchgeführt, so daß im Mehrbenutzerbetrieb der Datenbank andere Anwender, die auf die Fallstudie Zugriffsrechte haben, Änderungen sofort mitgeteilt bekommen.

Um dem Benutzer eine optimalen Überblick über das Gesamt-RES anzubieten, wurde eine sogenannte Zoom-Funktion implementiert. Zur Kontrolle der Arbeit kann der Benutzer den aktuellen Bildschirminhalt oder das gesamte Referenzenergiesystems in der aktuellen Bildschirmauflösung ausdrucken.



## 6.5 Analysemöglichkeiten mit Hilfe des Netzwerkeditors

Die Unterstützung der graphischen Modellerstellung bei Energiesystemmodellen durch die Bereitstellung eines graphischen Netzwerkeditors legt es nahe, auch Analysen eines Modells über die visualisierte Modellstruktur in Form des Referenzenergiesystems zu ermöglichen. Die Analyse kann zur Überprüfung der Konsistenz des Energiesystems vor Optimierungs- und Simulationsläufen eingesetzt werden oder zur Darstellung und Auswertung der Ergebnisse von Optimierungs- und Simulationsläufen. Die unterschiedlichen Analysefunktionen werden im folgenden vorgestellt.

### 6.5.1 Überprüfung der Konsistenz einer RES-Definition

Bei der Überprüfung der Konsistenz des RES kann zwischen der logischen Konsistenz, der topologischen Konsistenz und der Vollständigkeit der Datensätze differenziert werden:

- Die *logische Konsistenz* kann im allgemeinen nur vom Modellierer überprüft werden. Hierfür können Teile des RES durch unterschiedliche hierarchische Darstellungen ausgeblendet bzw. aggregiert werden oder durch Filter Objekte aus der Gesamtmenge der Objekte selektiert werden.
- Die *topologischen Inkonsistenzen* des RES können durch eine unterschiedliche farbige Darstellung der Objektbausteine auf dem Bildschirm graphisch sichtbar gemacht werden. *Topologische Inkonsistenzen* treten nur auf, wenn Bausteine (Güter, Prozesse, Container) nicht oder unvollständig in das RES integriert sind.
- *Unvollständige Modelldatensätzen* können bei Optimierungs- oder Simulationsläufen zu falschen oder unvollständigen Ergebnisse führen. Die geforderte Vollständigkeit der Parameter und exogenen Modellgrößen ist abhängig von der mathematischen Beschreibung. Daher kann der Benutzer durch den NDA nur halb manuell bei der Auswertung der Datensätze unterstützt werden.

### 6.5.2 Auswertung der Ergebnisse von Optimierungs- und Simulationsläufen

Die Auswertung der Ergebnisse von Optimierungs- und Simulationsläufen kann dazu benutzt werden, um

- eine *graphische Stabilitätsanalyse* durchzuführen;  
Ziel der Modellierung ist das Durchführen von mehreren alternativen Berechnungen, um Entscheidungsalternativen zu vergleichen. Da die Entwicklung der vom Entscheidungsträger nicht beeinflussbaren Rahmenbedingungen unbekannt ist, wird die Bewertung der Strategien

innerhalb einer Bandbreite von möglichen zukünftigen Entwicklungen, sogenannten Szenarien, durchgeführt. Ziel der graphischen Stabilitätsanalyse von Optimierungsläufen ist es, die Häufigkeit, mit der Flüsse in die Lösung eingehen, anzuzeigen. Für Simulationsläufe ist dieses Verfahren ungeeignet, da die Größe der Flüsse vorgegeben ist.

- die Energieflüsse graphisch darzustellen;

Hierfür werden häufig Flußbilddarstellungen verwendet. Dabei werden die Energieflüsse von Prozeß zu Prozeß eingezeichnet. Die Verschiedenartigkeit der Flüsse wird durch unterschiedliche Farbgebung und die Größe des Flusses durch unterschiedlich starke Balken verdeutlicht. Das RES ist mit der Flußbilddarstellung verwandt. Es fehlen allerdings die entsprechenden Flußbalken, die Prozeßboxen haben eine einheitliche Größe und die Prozesse sind nicht in Prozeßklassen unterteilt. Bei der graphischen Darstellung der Flüsse durch unterschiedlich starke Verbindungslinien im RES ergeben sich die folgende Probleme:

- Aufgrund der vorgegebenen Breite der Prozesse darf die Gesamtbreite aller in einen Prozeß einmündenden Flußbalken diese Breite nicht überschreiten.
- Im Energiesystem werden Flüssen mit unterschiedlichen Einheiten und Dimensionen betrachtet (z. B. Emissionen und Energieflüsse).
- Flüsse mit Nullwerten sind in geeigneter Weise darzustellen.

Aufgrund dieser Probleme erscheint die Beschriftung der Flüsse (Verbindungen) mit den Werten der Flüsse am sinnvollsten.

- basierend auf der Topologie, Auswertungen durch Aggregationen vorzunehmen;

Die Bandstruktur des RES kann verwendet werden, um Aggregationsbäume zu bilden. Diese bestehen nur aus Knoten eines Typs, wobei der Knotentyp nicht auf die Grundobjekte (Prozeß, Gut) begrenzt ist, sondern auch für die Aggregation von Flüssen oder Wirkungsgraden zusammengesetzte Knotentypen (z. B. Prozeß und Gut) beinhalten kann. Die gemischten Knotentypen ermöglichen Aggregationen entsprechend aller in der Netzwerkdatenbank abgelegter Parameter und Daten.

Die Ergebnisse dieser Analyse dienen zum besseren Verständnis des Modellaufbaus und der Ergebnisse von Optimierungs- und Simulationsläufen.

## 6.6 Fazit

Die Visualisierung von Energiesystemmodellen bietet eine völlig neue Herangehensweise an den komplexen Prozeß der Modellierung sowie an die Durchführung von Rechenläufen. Sie bringt auch Verbesserungen bei den Möglichkeiten zur Ergebnisanalyse mit sich. Der entwickelte Netzwerkeditor unterstützt die in der Energie- und Umweltplanung übliche Darstellung der topologischen Struktur des Modells in Form des Referenzenergiesystems, wobei neue graphische Objekttypen und Funktionen definiert werden, die die Erstellung eines

Energiesystemmodells graphisch am Bildschirm ermöglichen. Durch die Integration des Netzwerkeditors in das modular aufgebaute *MESAP*-Instrumentarium kann damit sowohl das Simulationsmodell *PlaNet* als auch das Optimierungsmodell *E<sup>3</sup>Net* unterstützt werden.

Es zeigt sich, daß die in Form von Textinformationen in der zentralen Datenbank *NetWork* definierten topologischen Strukturen automatisch in eine graphische Darstellung umgewandelt werden können, wofür effiziente Layout-Algorithmen entwickelt worden sind. Es besteht die Möglichkeit, diese Algorithmen auch unabhängig vom Netzwerkeditor bei der Lösung graphentheoretischer Probleme zu verwenden. Aus der Anwendung wird ersichtlich, wie die Erstellung der Topologie eines Energiesystemmodells durch den NDA unterstützt und ergänzt wird. Der Einsatz einer gemeinsamen Datenbank für unterschiedlich funktionale Tools ermöglicht es, für die Eingabe der Daten den Timeseries-Navigator der zentralen Datenbank *NetWork* zu nutzen.

Zukünftige Weiterentwicklungen des NDA sollten die Darstellung und Integration unterschiedlicher Modelltopologien verbessern. Hiermit verbunden ist eine Erweiterung des Layout-Algorithmus, so daß manuelle Korrekturen am Layout nach erneuter Durchführung des Layout-Algorithmus erhalten bleiben. Die bei der Entwicklung des Netzwerkeditors eingeführten Strukturierungselemente (z. B. Container) können in anderen Modulen (z. B. *PlaNet*) verwendet werden. Eine erweiterte Datenbank *NetWork* könnte dem NDA einerseits als Modellbibliothek und andererseits als Geographisches Informationssystem dienen. Die Modellbibliothek soll das Modellieren von Energiesystemmodellen erleichtern und Expertenwissen speichern. Sie könnte bereits vordefinierte Prozesse, Prozeßketten, zusammengesetzte Objekte oder sogar komplette Teilmodelle beinhalten, die als dynamische Werkzeugbuttons mit verschiedenen Icons auf der Arbeitsfläche des Netzwerkeditors angezeigt werden. Der Modellierer könnte so vordefinierte Modellbausteine in sein Modell integrieren. Der Modellaufbau würde dadurch weiter vereinfacht.

Die Darstellung graphischer Informationen speziell mit Geographischen Informationssystemen (GIS) findet eine immer breitere Anwendung in der Energie und Umweltplanung. GIS werden speziell für die Planung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme eingesetzt, da hierfür eine räumlich hoch aufgelöste Betrachtung notwendig ist. Im Bereich der kommunalen Energieplanung finden GIS als Wärmeinformationssysteme Anwendung. Zentrale Bestandteile eines GIS bilden eine Datenbank und ein speziell ergänzendes Datenbankmanagementsystem. Die zukünftige Entwicklungen der Energiesystemmodellierung zielen darauf ab, methodisch eine flexible räumliche Abbildung zu integrieren und die hierfür benötigten Daten in GIS-Systemen abzulegen. Hierbei können sich die graphische Darstellung von Energiesystemmodellen mit Hilfe eines erweiterten Netzwerkeditors und graphische Informationssysteme ideal ergänzen.

## 7 Schlußbetrachtung

Modelle, die das komplexe Energiesystem und seine Wechselwirkungen mit der Umwelt vereinfachend darstellen, sind bei einer sachgerechten Nutzung besonders geeignet, Informationen über die Erreichung energie- und umweltpolitischer Ziele und über Auswirkungen unsicherer Einflüsse bereitzustellen.

Das *IKARUS*-Instrumentarium, das im Rahmen des Projektes *IKARUS* „Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien“ /FIZ 1997/ entwickelt wurde, dient dazu, in einer bisher noch nicht erreichten Informationstiefe Strategien zur Reduktion von Klimagasemissionen - insbesondere CO<sub>2</sub> - in Hinblick auf ökologische, ökonomische und energietechnische Konsequenzen zu analysieren und vergleichend zu bewerten. Das Instrumentarium besteht im wesentlichen aus mehreren Computermodellen und einer Technologie-Datenbank. Zur Analyse nationaler Klimagasreduktionsstrategien wurde ein Optimierungsmodell entwickelt (*IKARUS-LP*), mit dem in der Vergangenheit Auswirkungen einer zielorientierten CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie untersucht wurden. Das Optimierungsmodell bildet das Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland in Form vernetzter Prozesse ab. Dabei werden die Vielzahl der Optionen für verschiedene Techniken, die zugehörigen bezogenen Emissionen, die individuellen Kosten sowie mögliche Vernetzungen der Energieflüsse erfaßt. Neben ökonomischen und technischen Daten werden relevante energiepolitische Rahmenbedingungen berücksichtigt. Basisjahr des Referenzdatensatzes des Optimierungsmodelles ist das Jahr 1989, Analysen können für die Jahre 2005 (getrennt nach Ost- und Westdeutschland) und 2020 (ohne regionale Auflösung) durchgeführt werden.

*E<sup>3</sup>Net*, das im Rahmen des Projektes *ECOLOG* „Entwicklung eines Computermodells mit linearer Optimierung zur Abbildung eines regionalisierten Energiesystems am Beispiel Gesamtdeutschlands“ /Schaumann, Schweicke 1995/ entwickelt wurde, stellt eine Weiterentwicklung des Energiemodells EFOM-ENV dar. Das Energiesystemmodell *E<sup>3</sup>Net* bildet das gesamte Energiesystem in Abhängigkeit von der vorzugebenden Nachfrage nach Nutzenergie bzw. Energiedienstleistungen bis zur Primärenergie ab und dient zur Analyse der Entwicklung des Energiesystems unter vorzugebenden Rahmenbedingungen. Es eignet sich aufgrund seiner flexiblen Struktur zur Untersuchung kommunaler, regionaler, nationaler und multinationaler Energiesysteme. Diese Flexibilität wird durch die Konzeption der Datenbank *NetWork* erreicht, in der alle für prozeßtechnische Modelle erforderlichen Daten abgespeichert werden können. *E<sup>3</sup>Net* ist in das *MESAP*-Instrumentarium des IER Stuttgart eingebunden.

Das Ziel des Projektes „Einbindung des *ECOLOG*-Modells ‘*E<sup>3</sup>Net*’ und Integration neuer methodischer Ansätze in das *IKARUS*-Instrumentarium“ (*ECOLOG II*) war es, verschiedene Modellbildungsansätze und Werkzeuge für die energiewirtschaftliche Analyse aus dem

*IKARUS*-Instrumentarium und dem *MESAP*-Instrumentarium zu einem umfassenden Instrumentarium zusammenzufügen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung folgende Module bzw. Verknüpfungen realisiert:

- eine Kopplung der FIZ-Technik-Datenbank an die Datenbank *NetWork*,
- eine Verbindung der FIZ-LP-Datenbank mit *NetWork*,
- eine Überführung des *IKARUS-LP*-Datensatzes in eine Fallstudie für das optimierende Energiesystemmodell *E<sup>3</sup>Net*, das mit den Komponenten *E<sup>3</sup>X* und *RImp* an *NetWork* angebunden ist,
- ein optimierendes Energiesystemmodell mit preiselastischer Nachfrage *E<sup>3</sup>Micro*, das auf einer nichtlinearen Erweiterung des Modells *E<sup>3</sup>Net* basiert,
- ein Gleichgewichtsmodell *E<sup>3</sup>Macro*, das bei einer hohen energietechnischen Fundierung eine makroökonomische Komponente beinhaltet,
- ein allgemeines Gleichgewichtsmodell *NEWAGE*, das prototypisch ein prozeßtechnisches Energieversorgungsmodell in ein übergeordnetes, aggregiertes gesamtwirtschaftliches Modell integriert, wodurch - simultan - eine technologisch fundierte und gesamtwirtschaftlich konsistente energiepolitische Analyse ermöglicht wird,
- ein Simulationsmodell *PlaNet* sowie
- ein *Netzwerkdesigner und -analyst (NDA)* oder *Netzwerkeditor*, der eine interaktive graphische Erstellung der Modellstruktur eines Energiesystemmodells in der Darstellungsform des Referenzenergiesystems (RES) erlaubt.

Alle Rechen-, Transfer- und Graphikmodule wurden durch exemplarische Fallstudien, die im Kontext des *IKARUS*-Instrumentariums stehen, getestet. Damit wurde die Nützlichkeit und die Mächtigkeit der einzelnen Entwicklungen und Erweiterungen aufgezeigt. Somit steht im Umfeld des *IKARUS*-Instrumentariums mit dem erweiterten *MESAP*-Instrumentarium ein mächtiges Planungsinstrumentarium für energie- und umweltpolitische Fragestellungen zur Verfügung.

## Literaturverzeichnis

/Aigner 1993/

Aigner, M.: Diskrete Mathematik, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1993

/Anderson 1983/

Anderson, J. R.: The Architecture of Cognition. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1983

/Balzert 1992/

Balzert, H. (Hrsg.): CASE - Systeme und Werkzeuge. BI-Wiss.-Verlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1992

/Bär 1993/

Bär, M.: Wissensbasierte und fließbildorientierte Bedienung eines verfahrenstechnischen Simulators. VDI-Verlag: Fortschrittsberichte, VDI Reihe 20, Nr. 110, Düsseldorf, 1993

/Beller 1975/

Beller, M. (Hrsg.): Sourcebook for Energy Assessment. BNL 50483, Brookhaven National Laboratory, 1975

/Blesl et al. 1996/

Blesl, M.; Schlenzig, C.; Steidle, T.; Voß, A.: Entwicklung eines Energieinformationssystems. Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 23, Stuttgart, 1996

/Böhringer 1996/

Böhringer, C.: Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der umweltpolitischen Analyse. Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, 1996

/Böhringer 1997/

Böhringer, C.: NEWAGE. Modellinstrumentarium zur gesamtwirtschaftlichen Analyse von Energie- und Umweltpolitiken, in: Molt, S.; Fahl, U. (Hrsg.): Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland - Stand der Entwicklung -. IKARUS-Workshop am 24./25. Januar 1996. Proceedings, Forschungszentrum Jülich

/Böhringer, Rutherford 1997/

Böhringer, C.; Rutherford, T. F.: Carbon Taxes with Exemptions in an Open Economy: A General Equilibrium Analysis of the German Tax Initiative, in: Journal of Environmental Economics and Management 32/1997

/Brooke et al. 1992/

Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A.: GAMS - A User's Guide. Release 2.25. The Scientific Press, San Francisco, Kalifornien, USA, 1992

/Clark, Holton 1995/

Clark, J.; Holton, D. A.: Graphentheorie. Grundlagen und Anwendungen. Spektrum Verlag, Heidelberg, Oxford, Berlin, 1995

/Cottle, Pang 1992/

Cottle, R. W.; Pang, J. S.: The Linear Complementarity Problem. Academic Press.

/Dörner 1993/

Dörner, D.: Die Logik des Mißlingens, Strategisches Denken in komplexen Situationen. Verlag: Rowohlt, Reinbek b. Hamburg - Neuauflage, 1993

/Drud 1992/

Drud, A. S.: CONOPT - A GRG Code for Large Nonlinear Optimization. Reference Manual, ARKI Consulting and Development, Bagsvaerd, DK, 1992

/Enquete 1993/

Enquete-Kommission Schutz der Erdatmosphäre des Deutschen Bundestages: Gemeinsames Analyseraster. Version 3.0, November 1993, in: Studienprogramm Energie, Economica Verlag, Bonn, 1993

/Eschenbacher 1990/

Eschenbacher, P.: Entwurf und Implementation einer formalen Sprache zur Beschreibung dynamischer Modelle. Arbeitsberichte des IMMD, Band 23, Nummer 1, Universität Erlangen-Nürnberg, 1990

/Fähnrich et al.1994/

Fähnrich, K.-P.; Groh; G.; Raether, Ch.: Benutzergerechte Gestaltung von graphischen Systemen (GUIs), in: Online 5/1994

/Fejes et al.1993/

Fejes et al.: A graphical editor and process visualization system for man-machine interfaces of dynamic systems, in: The Visual Computer 10/1993

/FIZ 1997/

Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): IKARUS - Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien. BINE Informationsdienst, profiinfo I/97, Karlsruhe

/FIZ 1998/

Fachinformationszentrum Karlsruhe: IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken. Monographien des Forschungszentrums Jülich, Band 14, Jülich, 1998

/Hässig 1979/

Hässig, K. 1979: Graphentheoretische Methoden des Operations Research. B. G. Teubner, Stuttgart

/Himsolt 1994/

Himsolt, M.: Konzeption und Implementierung von Grapheneditoren. Verlag: Shaker, Aachen, 1994

/HPS 1994/

HPS (High Performance Systems Inc.): STELLA II - Technical Documentation Software Manual. High Performance Systems, Hanover, New Hampshire

/Kühner, Schaumann 1996/

Kühner, R.; Schaumann, P.: Einbindung des ECOLOG-Modells E<sup>3</sup>Net und Integration neuer methodischer Ansätze in das IKARUS Instrumentarium (ECOLOG II). Zweiter Zwischenbericht, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 1996

/Lehner et al.1995/

Lehner, F.; Hildebrandt, K.; Maier, R.: Wirtschaftsinformatik. Hanser, München, Wien, 1995

/Mathiesen 1985/

Mathiesen, L.: Computation of Economic Equilibrium by a Sequence of Linear Complementarity Problems, in: Manne, A. (Hrsg.): Economic Equilibrium - Model Formulation and Solution. Mathematical Programming Study 23

/Manne 1979/

Manne, A.: ETA-MACRO: A Model of Energy-Economy Interactions, in: Pindyck, R.S. (Hrsg.): Advances in the Economics of Energy and Resources, Greenwich, 1979

/Manne, Wene 1992/

Manne, A.; Wene, C.-O.: MARKAL-MACRO: A linked model for energy-economy analysis. BNL Report BNL-47161, Brookhaven National Laboratory, New York, 1992

/Marcuse et al. 1975/

Marcuse, W.; L. Bodin; E. Cherniavsky; Y. Sanborn: A Dynamic Time Dependent Model for the Analysis of Alternative Energy Policies. Summer Computer Simulation Conference, San Francisco, 21-23 July 1975

/Murtagh, Saunders 1983/

Murtagh, B. A.; Saunders, M. A.: MINOS 5.1 User's Guide. Technical Report SOL 83-20R, Systems Optimization Laboratory, Stanford University, 1983

/Nagl 1979/

Nagl, M.: Graph-Grammatiken : Theorie, Anwendungen, Implementierung. Vieweg, Braunschweig, 1979

/NCAES 1978/

National Center for Analysis of Energy Systems: An Analytical Framework for the Assessment of Energy Resource and Technology Options for Developing Countries. BNL-50800, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1978



---

/Prognos 1991/

Prognos: Die energiewirtschaftliche Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2010 unter Einbeziehung der fünf neuen Bundesländer. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Basel, 1991

/RAPID HOUSE 1995/

RAPID HOUSE: Einführung in die Simulationstechnik mit ASCL - Advanced continuous Simulation Language, 1995

/Reger 1995/

Reger, K.: Graphische Modellspezifikation und objektorientierter Ansatz in universellen Simulationssystemen, in: Biethahn, J., et al. (Hrsg.): Fortschritte in der Simulationstechnik, Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Vieweg, Braunschweig, 1995

/Rutherford 1994a/

Rutherford, T. F.: Extensions of GAMS for Complementarity Problems arising in Applied Economic Analysis, Discussion Paper. Department of Economics, University of Colorado, 1994

/Rutherford 1994b/

Rutherford, T. F.: Applied general equilibrium modelling with MPSGE as a GAMS subsystem, Discussion Paper. Department of Economics, University of Colorado, 1994

/Schaumann, Schlenzig 1997/

Schaumann, P.; Schlenzig, C.: MESAP III. Ein Werkzeug für Energie- und Umweltmanagement, in: Molt, S.; Fahl, U. (Hrsg.): Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland - Stand der Entwicklung -. IKARUS-Workshop am 24./25. Januar 1996. Proceedings, Forschungszentrum Jülich

/Schaumann, Schweicke 1995/

Schaumann, P.; Schweicke, O.: Entwicklung eines Computermodells mit linearer Optimierung zur Abbildung eines regionalisierten Energiesystems am Beispiel Gesamtdeutschlands. Endbericht des Projektes ECOLOG des Bundesministeriums für Forschung und Technologie. Wissenschaftliche Berichte der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Sozialwesen (FH) Zittau/Görlitz, Heft 39/1995 Nr. 1481, Zittau, 1995

/Schlenzig 1998/

Schlenzig, C.: PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung. Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 47, Stuttgart, 1998

/Schlenzig 1996/

Schlenzig, C.: A Standardized Relational Database Management System for Network Oriented Energy System Models - Data Dictionary. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 1996

/Schlenzig, Reuter 1996/

Schlenzig, C.; Reuter, A.: MESAP-III: An Information and Decision Support System for Energy and Environmental Planning, in: Carraro, C.; Haurie, A. (Hrsg.): Operations Research and Environmental Management. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996

/Schlenzig et al. 1993/

Schlenzig, C.; M. Fishedick; E. Fleißner; T. Pfeifer; S. Rivas; T. Schulze; C. Weber: Konzept für ein Modell zur Energiebedarfsanalyse und Simulation der Energieversorgung, Arbeitspapier. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 1993

/Schmidt 1996/

Schmidt, B.; Toussaint, A.: Referenzmodell SSA für Strategien. In: Simulation in Passau (SiP). Lehrstuhl für Operations Research und Systemtheorie, Universität Passau, Heft 3/96, Passau, 1996

/Schürr 1991/

Schürr, A.: Operationales Spezifizieren mit programmierten Graphersetzungs-systemen, formale Definitionen, Anwendungsbeispiele und Werkzeugunterstützung. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1991

/Stary 1994/

Stary, C.: Interaktive Systeme - Software-Entwicklung und Software-Ergonomie. Vieweg, Wiesbaden, 1994

/Turau 1996/

Turau, V.: Algorithmische Graphentheorie. Addison-Wesley, Bonn, Paris, 1996

/Voß et al. 1995/

Voß, A.; Schlenzig, C.; Reuter, A.: MESAP III: A Tool for Energy Planning and Environmental Management - History and new Developments, in: Hake, J.-Fr.; Kleemann, M.; Kuckshinrichs; W., Martinsen, D.; Walbeck, M. (Hrsg.): Advances in System Analysis: Modelling Energy-Related Emissions on a National and Global Level. Konferenzen des Forschungszentrums Jülich, Bd. 15 : 375, Jülich, 1995

/Wietschel 1994/

Wietschel, Martin: Die Wirtschaftlichkeit klimaverträglicher Energieversorgung: Entwicklung und Bewertung von CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien in der Energieversorgung und -nachfrage. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994

/Wilson 1991/

Wilson, D. G.: A brief Introduction to the IBM Optimization Subroutine Library (OSL), in: SIAG/OPT Views and News, Vol. 1

/Takayama, Judge 1971/

Takayama, T.; Judge, G.G.: Spatial and temporal price and allocation Models. North Holland, Amsterdam, 1971

