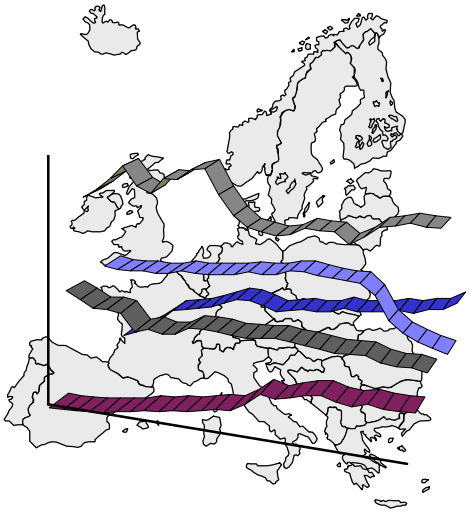
Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
IER

Forschungsbericht

PlaNet: Ein entscheidungs-unterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung



Christoph Schlenzig

Band 47 - 1998

Inhalt

Strategische Entscheidungen in Energiewirtschaft und -politik lassen sich ohne eine kontinuierliche, begleitende und transparente Planung nicht mehr legitimieren. Das in dieser Arbeit vorgestellte Instrument *PlaNet* ist ein entscheidungsunterstützendes System für die Evaluierung energie- und umweltpolitischer Strategien auf kommunaler, regionaler und nationaler Ebene. *PlaNet* besteht aus einer leistungsfähigen Datenbank, einem Energiesystemmodell, verschiedenen Moduln zur Unterstützung des Planungsprozesses und läuft auf PC´s unter Windows. Der systemtheoretische Modellierungsansatz eignet sich zur Bedarfsanalyse, zur Simulation von Versorgungssystemen sowie zur Analyse von Umweltbelastungen. Mit Hilfe von Energie-, Schadstoff- und Kostenbilanzen lassen sich die Auswirkungen energiepolitischer Maßnahmen systematisch vergleichen und ganzheitlich bewerten.

IER
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 31
D-70550 Stuttgart
Telefon + 49 711 - 685 7574
Telefax + 49 711 - 685 7567

PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung

Von der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) vorgelegte Abhandlung

Vorgelegt von
Christoph Schlenzig
geboren in Frankenthal/Pfalz

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. E. Göde

Tag der Einreichung:	28. Februar 1997
Tag der mündlichen Prüfung:	20. Oktober 1997

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Abteilung Systemtechnische Grundlagen und Methoden (SGM)
Dipl.-Phys. C. Schlenzig

ISSN 0938-1228

Christoph Schlenzig

Kriegsstraße 31
76133 Karlsruhe

Persönliche Angaben

Familienstand:	verheiratet, ein Kind
Staatsangehörigkeit:	deutsch
Geburtsdatum:	21.12.1958

Ausbildung

1967 - 1969 **Deutsche Schule, Mailand (Italien)**

1969 - 1977 **Europaschule, Luxembourg, Abitur (1,3)**

WS 1977/78 **Technische Universität, Karlsruhe**

Studium der Fachrichtung Physik
Studienschwerpunkte: Thermodynamik, Energiesysteme, Informatik, Elektronik

1978 **Aufnahme in die Studienstiftung des deutschen Volkes**

1985 **International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)**

Forschungsaufenthalt: Sustainable Development of the Biosphere

1985 - 1986 **Technische Universität, Berlin**

Diplom im Aufbaustudium „Energieberatung / Energiemanagement“ (sehr gut)

WS 1986/87 **Technische Universität, Karlsruhe**

Diplomhauptprüfung (Dipl.-Phys.) in der Fachrichtung Physik (sehr gut)

SS 1987 **Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart**

Aufnahme des Promotionsstudiums

1987 - 1988 **University of Washington, Seattle, USA**

Fulbright Stipendium: Master Program in Systems Engineering (GPA 3,85)

WS 1988/89 **Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart**

Weiterführung des Promotionsstudiums

1997 **Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart**

Promotion (Dr.-Ing.) am 20.10.1997: PlaNet, ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung (sehr gut)

Berufstätigkeit

1979 - 1985 **Freier Mitarbeiter bei KSB-Pumpen (Frankenthal und Luxembourg)**

Entwicklung von PC-Software für Kalkulation, Auftragsplanung und -abrechnung

seit 1989 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart**

- am Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) bis Ende 1989
- am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

- Projektleiter von Studien aus dem Bereich Energieplanung, Bedarfsanalyse und Energieinformationssysteme in Kenia, Seychellen, Nigeria, Madagaskar
- Projektleiter für die Entwicklung eines Simulationsmodells für Energiesysteme
- Projektleiter für die Entwicklung eines Energieinformationssystems (ENIS)
- Projektleiter für die Entwicklung des Planungsinstruments MESAP (Modulare Energiessystemanalyse und Planung)

1990 - 1993 **Kurzzeitexperte für die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)**

seit 1995 **Abteilungsleiter am IER**

Abteilung: "Systemtechnische Grundlagen und Methoden"
Verantwortliche Leitung der EDV am IER

Für Watson und Mitsuno II

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart. Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß für die Unterstützung meines Konzepts sowie für die Übernahme des Hauptberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Göde danke ich für die interessanten und ermunternden Gespräche bei der Erörterung meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferats. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Albrecht Reuter, der mich als mein langjähriger Abteilungsleiter und Mentor in das Fachgebiet der Energie- und Umweltplanung eingeführt hat und dessen wegweisende Arbeiten mit MESAP ich fortführen durfte. Dank seiner Initiative konnte ich in vielen Projekten in Afrika wertvolle Praxiserfahrung sammeln und diese mit seiner fachlichen Unterstützung in das Planungsinstrument *PlaNet* integrieren. Herrn Dr. Rolf Reiner möchte ich für die Übernahme des Lektorats meiner Dissertation danken.

Meinem Freund Dr.-Ing. Richard Laing möchte ich ganz besonders für die vielen engagierten fachlichen Diskussionen in Stuttgart, Nigeria und im "Maulwurf" danken sowie für seine moralische Unterstützung in den schwierigen Phasen dieses Projekts. Herrn Dr. Friedrich-Wilhelm Wasmann danke ich für die konstruktive Durchsicht meines Manuskripts und die vielen anregenden Gespräche über meine Arbeit und die Sprache der Wissenschaftler.

Besonders wertvoll war der wissenschaftliche Diskurs mit Kollegen aus anderen Abteilungen des IER. Für die vielen Diskussionen während der Entwicklung des *PlaNet*-Konzeptes möchte ich mich besonders bei Dipl.-Ing. Christoph Weber, Dipl.-Wi.-Ing. Bernhard Bösl, Dr.-Ing. Manfred Fischedick, Dipl.-Phys. Thomas Schulze und Dr. Ulrich Fahl bedanken. Dipl.-Ing. Richard Knodt und Dipl.-Ing. Albert Fischer von der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GTZ danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Erstellung des regionalen Energiekonzeptes in Madagascar, das ich als Fallstudie genutzt habe.

Für ihre aktive Mitarbeit, ihr Engagement und die kreative Arbeitsatmosphäre danke ich meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Dipl.-Ing. Joachim Bagemihl, Fiona Baumhögger, Dipl.-Ing. Jörg Baur, Dipl.-Phys. Markus Blesl, Sylvia Heshe, Dr.-Ing. Rolf Kühner, Dipl.-Ing. Salvador Rivas, Dipl.-Phys. Alf Schweiker, Dipl.-Ing. Thomas Steidle und Dipl.-Ing. Jürgen Weinmann. Für sein Engagement bei der softwaretechnischen Realisierung von *PlaNet* möchte ich mich besonders herzlich bei Herrn Thomas Bitz vom Programmierbüro Bitz & Röken bedanken. Und vor allen Dingen, danke Susanne!

Stuttgart, im Januar 1998

Christoph Schlenzig

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis V

Tabellenverzeichnis VII

Abkürzungsverzeichnis VIII

Glossar X

Kurzfassung XVI

Abstract XVII

1 Einleitung 1

2 Problemstellung und Zielsetzung 5
2.1 Problemstellung 5
2.1.1 Informationsverwaltung 5
2.1.2 Entscheidungsunterstützung 6
2.1.3 Benutzerfreundlichkeit 7
2.2 Zielsetzung 8
2.2.1 Informationverwaltung 8
2.2.2 Entscheidungsunterstützung 9
2.2.3 Benutzerfreundlichkeit 9

3 Planung und Entscheidungsfindung 11
3.1 Die Thermodynamik als Randbedingung für die Energieplanung 11
3.1.1 Die thermodynamischen Haupsätze 11
3.1.2 Die Energieumsetzungen auf der Erde 12
3.1.3 Die Dissipation der Materie 15
3.1.4 Die Gestaltungsfähigkeit des Menschen 16
3.2 Das Konzept der strukturierten Energie- und Umweltplanung 17
3.2.1 Der systemanalytische Ansatz zur Planung von Energiesystemen . . 17
3.2.2 Akteure und Instrumente 18
3.2.3 Der Prozeß der Entscheidungsfindung 20
3.3 Die Phasen des strukturierten Planungsprozesses 24
3.3.1 Problembeschreibung 25
3.3.2 Festlegung der Ziele 25
3.3.3 Beschreibung des Energiesystems und der Rahmenbedingungen . . . 26
3.3.4 Festlegung der Szenarien 28
3.3.5 Festlegung der zu untersuchenden Maßnahmen und Strategien 28
3.3.6 Auswahl der Methode für die Modellierung 29

3.3.7 Datenerhebung und Aufbau des Informationssystems 30
3.3.8 Modellierung und systematische Zukunftsanalyse 30
3.3.9 Entscheidung 31
3.3.10 Durchführung und Erfolgskontrolle 31
3.4 Entscheidungsunterstützende Systeme 32
3.4.1 Definition des Begriffs "entscheidungsunterstützendes System" 32
3.4.2 Anforderungen an entscheidungsunterstützende Systeme 35
3.4.3 Komponenten eines entscheidungsunterstützenden Systems 36
3.5 Die Technik der Modellierung 38
3.5.1 Ziel der Modellierung 38
3.5.2 Modellbildung 39
3.5.3 Mathematische Modellbeschreibung 40
3.5.4 Programmierung 41
3.5.5 Validierung 41
3.5.6 Die Grenzen von formalen Energiemodellen 42
3.6 Die historische Entwicklung von Energieplanungsinstrumenten 44
3.6.1 Energiemasterpläne 44
3.6.2 Energiesystemmodelle 45
3.6.3 Modulare Planungssysteme 45
3.6.4 Neueste Entwicklungen 46
3.7 Planungsinstrumente zur Energie- und Umweltplanung 49
3.7.1 Klassifizierungsmöglichkeiten 49
3.7.2 Energieinformationssysteme 53
3.7.3 Makroökonomische Modelle 54
3.7.4 Energiebedarfsmodelle 56
3.7.5 Energieversorgungs- und Energiesystemmodelle 57
3.7.6 Modulare Planungsinstrumente 64
3.7.7 Energiewirtschaftsmodelle 68
3.8 Anforderungen an die Funktionalität von Planungsinstrumenten 72
3.8.1 Informationsverwaltung 72
3.8.2 Flexibilität 72
3.8.3 Transparenz 72
3.8.4 Sensitivität der Ergebnisse 72
3.8.5 Entscheidungsunterstützende Fähigkeiten 73
3.8.6 Benutzerfreundlichkeit 73
3.8.7 Behandlung von Unsicherheitsaspekten 73

4 Das entscheidungsunterstützende System *PlaNet* 75
4.1 Zielsetzung und Konzeption 75
4.1.1 Modulare Architektur 75
4.1.2 Standardisierung der Datenschnittstelle 76
4.1.3 Flexibilität und Anpassungsfähigkeit 76
4.1.4 Entscheidungsunterstützung 77

4.1.5 Benutzerfreundlichkeit 77
4.1.6 Erschwinglichkeit und Portierbarkeit 77
4.2 Das Referenzenergiesystem als Modellbildungsschema 78
4.3 Das *PlaNet*-Datenbanksystem *NetWork* 81
4.3.1 Merkmale des Datenbanksystems *NetWork* 81
4.3.2 Das Referenzenergiesystem als Datenzugriffsschlüssel 83
4.3.3 Strukturelle, zeitliche und räumliche Auflösung 85
4.3.4 Vererbung von Werten innerhalb einer Zeitreihe 88
4.3.5 Interpolation von Werten innerhalb einer Zeitreihe 90
4.3.6 Maßeinheitenkonvertierung 93
4.3.7 Hierarchische Strukturen im RES 95
4.3.8 Datenmodell 96
4.3.9 Schnittstelle zu Rechenmodulen 104
4.3.10 Vorteile eines standardisierten Datenbanksystems 111
4.4 Die Berechnungsmodule 113
4.4.1 Architektur eines Berechnungsmoduls 114
4.4.2 *PlaNet-Flow*: Simulation der Flüsse des Energiesystems 116
4.4.3 *PlaNet-Cost*: Berechnung der Kosten des Energiesystems 123
4.4.4 Architektur des Solvers 133
4.5 Der Case-Manager zur Strukturierung von Modellrechnungen 136
4.5.1 Die Szenariotechnik 136
4.5.2 Komponenten eines Case 137
4.5.3 Quantifizierung von Szenarien und Strategien 138
4.5.4 Strukturierung eines Case 140
4.6 Ergebnisanalyse mit dem Analyst 143
4.6.1 Konzeption des Analyst 143
4.6.2 Objekte eines Reports 144
4.6.3 Funktionen zum Aufbau eines Reports 146
4.7 Multikriterielle Ergebnisbewertung 148
4.8 Dokumentation der Fallstudie 154
4.8.1 Modellierung des Energiesystems 154
4.8.2 Konzeption der Fallstudie 154
4.8.3 Gleichungsspezifikation 156
4.8.4 Daten 157
4.8.5 Modelläufe / Cases 157
4.8.6 Aktionsplan 158
4.9 Benutzeroberfläche 159

5 Fallstudie: Regionale Energieplanung in Madagascar 161
5.1 Beschreibung des untersuchten Energiesystems 161
5.2 Problemstellung 165
5.3 Zielsetzung der Fallstudie 166
5.4 Modellierung des Energiesystems 167

5.5 Szenarien 169
5.6 Untersuchte Maßnahmen und Strategien 170
5.7 Analysemethode 171
5.8 Datenerhebung und Aufbau eines Informationssystem 171
5.9 Ergebnisse der Modellrechnung 171
5.10 Bewertung und Maßnahmenkatalog 175
5.11 Durchführung und Monitoring 176

6 Zusammenfassung und Ausblick 177

Literaturverzeichnis 181

Anhang 191

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1: Die Energieumsetzungen auf der Erde 13
Abb. 3-2: Die Träger des Planungs- und Entscheidungsprozesses 22
Abb. 3-3: Die Phasen der strukturierten Energie- und Umweltplanung 24
Abb. 3-4: Blockdiagrammdarstellung des Systems Energie-Wirtschaft-Umwelt . 27
Abb. 3-5: Netzwerkdarstellung des Systems Energie-Wirtschaft (ohne Umwelt) 27
Abb. 3-6: Aufgaben eines DSS in der Energie- und Umweltplanung 35
Abb. 3-7: Der Prozeß der Modellierung 39
Abb. 3-8: Klassifizierung von Instrumenten nach dem Zweck der Modellbildung 49
Abb. 3-9: Systemdiagramm eines modularen Planungssystems 64
Abb. 4-1: Der modulare Aufbau von *PlaNet* 76
Abb. 4-2: Definition von Petri-Netz und Referenzenergiesystem 79
Abb. 4-3: Beispiel eines Referenzenergiesystems zur Raumwärmeerzeugung . . 80
Abb. 4-4: Das RES als Datenzugriffsschlüssel für *NetWork* 83
Abb. 4-5: Zeitliche und regionale Instanzen des RES 85
Abb. 4-6: Das Konzept der Zeitreihe in *NetWork* 86
Abb. 4-7: Übersetzung der Zeitpunkte in Periodennummern zur Modellierung . 87
Abb. 4-8: Vererbungsregeln in *NetWork* 88
Abb. 4-9: Der Interpolations-Algorithmus für Zeitreihen 90
Abb. 4-10: Beispiel eines hierarchischen Gliederungsbaums 95
Abb. 4-11: Das strukturierte Entity-Relationship-Diagramm von *NetWork* 98
Abb. 4-12: Beispiel für die Tabellenstruktur von *NetWork* 103
Abb. 4-13: Topologien verschiedener Energiesystemmodelle 106
Abb. 4-14: Gleichungssysteme verschiedener Energiesystemmodelle 107
Abb. 4-15: Trennung von Daten und Gleichungen in der Datenbank *NetWork* . 109
Abb. 4-16: Beispielschema der Modellschnittstelle von *NetWork* 110
Abb. 4-17: Die sechs Komponenten eines Rechenmoduls in *PlaNet* 114
Abb. 4-18: Prinzip des Gleichungssystem-Generators 115
Abb. 4-19: Parameter und Variable zur Berechnung der Flüsse im RES 116
Abb. 4-20: Flußberechnung für ein RES mit drei Prozessen 120
Abb. 4-21: Architektur des *PlaNet*-Solver 133
Abb. 4-22: Matrixdarstellung eines *PlaNet-Flow* Gleichungssystems 135
Abb. 4-23: Die Szenariotechnik zur Strukturierung der Systemberechnung 138
Abb. 4-24: Der Entscheidungsbaum einer Case-Familie 142
Abb. 4-25: Definition eines zeitabhängigen Reports mit horizontaler Zeitachse . 145
Abb. 4-26: Beispiel einer hierarchischen Bewertungsstruktur 149
Abb. 4-27: Beispiel für die Berechnung der Gesamtbewertung mit AHP 153
Abb. 4-28: Dokumentation der Komponenten einer Fallstudie 155
Abb. 4-29: Die Maske des *PlaNet-Navigators* als Beispiel für ein GUI 159
Abb. 5-1: Endenergiebilanz des Nordwesten Madagascars 1990 nach Sektoren 161

Abb. 5-2: Zusammensetzung des Pro-Kopf-Endenergieverbrauchs der Haushalte 162
Abb. 5-3: Systemvergleich Technikkette Holz / Holzkohle zum Kochen 163
Abb. 5-4: Energiebilanz "Kochen" der städtischen und ländlichen Haushalte . 164
Abb. 5-5: Referenzenergiesystem für die Erzeugung von Kochwärme 168
Abb. 5-6: Entwicklung der Endenergienachfrage für verschiedene Szenarien . 172
Abb. 5-7: Auswirkung der Strategien auf die Endenergienachfrage der Haushalte 173
Abb. 5-8: Auswirkung der Strategien auf den Holzprimärenergieverbrauch . . 174
Abb. 5-9: Auswirkung der Strategien auf den Holzbestand im Jahr 2010 175
Abb. A-1: Zusammensetzung des nationalen BSP in Madagascar 194
Abb. A-2: Beispiel einer hierarchischen Bewertungsstruktur (AHP), Teil 1 . . . 195
Abb. A-3: Beispiel einer hierarchischen Bewertungsstruktur (AHP), Teil 2 . . . 196

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Anforderungen an das zu entwickelnde Planungsinstrument 10
Tabelle 3-1: Die Hauptsätze der Thermodynamik 12
Tabelle 3-2: Kategorien zur Beurteilung energiepolitischer Maßnahmen 29
Tabelle 3-3: Klassifizierung von Entscheidungsproblemen 33
Tabelle 3-4: Trends in der Entwicklung von Planungsinstrumenten 48
Tabelle 3-5: Kriterien zur Klassifizierung von Planungsinstrumenten 51
Tabelle 3-6: Planungsinstrumente für die Energie- und Umweltplanung 52
Tabelle 3-7: Übersicht Energiewirtschaftsmodelle 71
Tabelle 4-1: Merkmale der Datenbank *NetWork* 82
Tabelle 4-2: Der Daten-Zugriffsschlüssel in *NetWork* 84
Tabelle 4-3: Funktionsweise des Vererbungs-Algorithmus 89
Tabelle 4-4: Funktionsweise des Interpolationsalgorithmus 91
Tabelle 4-5: Maßeinheitenkonvertierung in *NetWork* 94
Tabelle 4-6: Relationale Tabellen in *NetWork* 99
Tabelle 4-7: Hierarchie der Multiuser-Zugriffsrechte in *PlaNet* 102
Tabelle 4-8: Variable, Parameter und Gleichungstypen des Moduls *PlaNet-Flow* 117
Tabelle 4-9: Notwendige Gleichungsspezifikationen für *PlaNet-Flow* 118
Tabelle 4-10: Gleichungssystem für ein RES mit drei Prozessen (Lösungsweg) . . 121
Tabelle 4-11: Parameter und Parameter des Moduls *PlaNet-Cost* (Teil 1) 131
Tabelle 4-12: Parameter und Parameter des Moduls *PlaNet-Cost* (Teil 2) 132
Tabelle 4-13: Gleichungssystem für ein RES mit drei Prozessen (nach Typ sortiert) 135
Tabelle 4-14: Strukturierung von Szenarien und Strategien 139
Tabelle 4-15: Bildung von Cases für einen Berechnungslauf 141
Tabelle 4-16: Die Bewertungsskala des Analytical Hierarchy Process 149
Tabelle 5-1: Zeitliche, räumliche und sektorale Strukturierung der Analyse 167
Tabelle 5-2: Strategietabelle für die Modellierung der Maßnahmen 170
Tabelle A-1: Demographische Hypothesen der Fallstudie 191
Tabelle A-2: Energiebilanz Nordwesten Madagascar 1990 192
Tabelle A-3: Wirtschaftliche Hypothesen der Fallstudie 193

Abkürzungsverzeichnis

AI	Artificial Intelligence
AHP	Analytical Hierarchy Process
ANL	Argonne National Laboratory
ASEAN	Association of South East Asian Nations (Brunei, Indonesia, Malaysia, Philippines, Singapore, Thailand)
BNL	Brookhaven National Laboratory
BSP	Bruttosozialprodukt
CEA	Commissariat pour L'Energie Atomique
CGE	Computable General Equilibrium
DBMS	Database Management System
DECADES	Databases and Methodologies for Comparative Assessment of Different Energy Sources for Electricity Generation
DP	Dynamic programming
DSM	Demand Side Management
DSS	Decision Support System
EFOM	Energy Flows Optimization Model
EC	European Commission
EU	Europäische Union
EM	Environmental Manual
ENERPLAN	UNDTCD's energy planning model
ENPEP	Energy and Power Evaluation Program
ESCAP	Economic and Social Commission for Asia and the Pacific
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
ETB	Energy Toolbox
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EUS	Entscheidungsunterstützendes System
ETSAP	Energy Technology Systems Analysis Project
GEM	General Equilibrium Modeling
GTZ	Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit mbH
GUI	Grafical User Interface
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency
IEJE	Institut Economique et Juridique d'Energie
IEPE	Institute of Energy Policy and Economics
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
IBRD	International Bank for Reconstruction and Development
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
INEP	Integrated National Energy Planning

IRP	Integrated Resource Planning
KI	Künstliche Intelligenz
LEAP	Long-Range Energy Alternatives Planning model
LP	Linear programming
MAED	Model for the Analysis of Energy Demand
MARKAL	Market Allocation Model
MEDEE	Modèle d'Evaluation de la Demande en Energie
MESAP	Modular Energy System Analysis and Planning
MESSAGE	Model for Energy Supply Systems and Their General Environmental Impact
MIP	Mixed Integer Programming
MIS	Management Information System
MSS	Management Support System
NEA	Nuclear Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OIS	Operational Information System
OLADE	Organizacion Latinoamericana de Energia (Latin Americain Energy Organization)
OPEC	Organization of Petroleum Exporting Countries
RDBMS	Relationales Datenbankmanagementsystem
RES	Reference Energy System
SADCC	Southern African Development Coordination Conference (Angola, Botswana, Lesotho, Malawi, Mozambique, Namibia, Swaziland, Tanzania, Zambia, Zimbabwe)
SEI-B	Stockholm Environment Institute, Bosten Center
SEP	Sonderenergieprogramm
SQL	Structured Query Language
TEESE	TERI Energy Economy Simulation Model
TERI	Tata Energy Research Institute
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
UNDP	United Nations Development Program
UNDTCD	United Nations Department of Technical Cooperation for Development
WASP	Wien Automatic System Planning
WEC	World Energy Congress
WMO	World Meteorological Organisation
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
XPS	Expert Systems
ZOPP	Zielorientierte Projektplanung

Glossar

Analyseperiode
Die Analyseperiode definiert den in einem Report dargestellten Zeitbereich. Sie gilt für alle Tabellen und Grafiken eines Reports. Die Stützstellen der Analyseperiode müssen nicht mit den Stützstellen der Modellierungsperiode übereinstimmen.

Attribut
Ein Attribut ist ein Element des Datenzugriffsschlüssels von *NetWork*. Es beschreibt den Informationsgehalt bzw. die Bedeutung einer Zeitreihe.

Basisjahr oder Referenzjahr
Das Basisjahr ist das erste Jahr der Modellierungsperiode. Hier endet der historische Zeitraum und es beginnt die Zukunftsanalyse. Alle ökonomischen Werte beziehen sich auf dieses Jahr.

Bilanzierungsperiode
Die Bilanzierungsperiode beschreibt die zeitliche Auflösung der Modellierung. In der Regel ist die Bilanzierungsperiode ein Jahr, d.h. es werden Jahreswerte berechnet.

"Bottom-up" Modellierung
Das untersuchte Energie- und Umweltsystem wird detailliert und technik-orientiert abgebildet. Daher heißen diese Modelle auch "process-engineering" Modelle. Aus der detaillierten Abbildung werden durch Aggregation Aussagen über das Gesamtsystemverhalten gewonnen.

Case
Ein Case ist ein vollständiger Modelldatensatz, für den eine Modellrechnung durchgeführt wird. Ein Case entspricht einem Rechenlauf. Er besteht aus Szenarien und Strategien, die festlegen, welche Hypothesen für die verschiedenen Systemparameter verwendet werden.

Elastizität
Veränderung einer abhängigen Variablen als Reaktion auf die Veränderung der unabhängigen Variablen. Die Einkommenselastizität und die Preiselastizität der Nachfrage beschreiben die Veränderung der Produktnachfrage als Reaktion auf eine Veränderung des Einkommens der Konsumenten bzw. des Preises des Produktes. Die Preiselastizität des Angebots beschreibt die Veränderung des Produktangebots als Reaktion auf eine Veränderung des Produktpreises.

Endenergie
Energieinhalt aller Energieträger, die der Verbraucher bezieht, um seine Endverbrauchertechnologien zu betreiben. Sie beinhaltet nicht die Transport-, Verteilungs- und Umwandlungsverluste sowie den Eigenverbrauch des Energiesektors.

Energiedienstleistung
Das aus dem Einsatz von Nutzenergie und anderen Faktoren befriedigte Bedürfnis des Verbrauchers (angenehm temperierter Raum, Information, Beförderung).

Energiesystem
Ein Energiesystem umfaßt die zur Erzeugung energetischer Güter und zur Erbringung von Energiedienstleistungen dienende technische und ökonomische Ausstattung einer geographischen Region, eines Wirtschaftssektors oder eines einzelnen Unternehmens. Es beinhaltet die Gewinnung von Primärenergieträgern, die Umwandlungsstufen des Brennstoffkreislaufes, die Speicherung, den Transport und den Handel mit Endenergieträgern, die Verflechtungen der Wirtschaftssektoren und das sozio-ökonomische Verhalten der Akteure, sowie die Umwelt als Ressource für Rohstoffe und Auffangbecken von Schadstoffdepositionen.

Formales Modell
Ein formales Modell (auch mathematisches Modell genannt) beschreibt ein Realmodell mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus. Die mathematische Beschreibung dient dazu, das Realmodell zu quantifizieren und zu berechnen.

Hypothese
Eine Hypothese ist die Annahme einer bestimmten zeitlichen Entwicklung für einen Systemparameter in der Zukunft. Für die zukünftige Entwicklung eines Systemparameters können mehrere verschiedene Annahmen getroffen werden.

Indikator
Indikatoren sind durch Modellrechnungen quantifizierbare Systemgrößen, die zur Festlegung der Kriterienausprägungen verwendet werden können, wie z. B. der Barwert der Systemkosten, der Investitionsbedarf, die CO_2-Emissionen, der Primärenergieverbrauch, etc.

Komponenten einer Fallstudie
Komponenten einer Fallstudie umfassen die untersuchten Probleme, die angestrebten Ziele, die gewählten Szenarien und die analysierten Strategien.

Kriterium
Ein Kriterium ist eine Bedingung, anhand der eine Entscheidung oder Bewertung durchgeführt werden kann. Ein Kriterium kann quantitativ oder qualitativ sein. Kriterien sind Aspekte, die zur Bewertung der Modelläufe herangezogen werden können wie z. B. Kosten, Umweltverträglichkeit, Ressourcenverbrauch, Versorgungssicherheit, Flexibilität (Fähigkeit, das System anpassen zu können), politische Akzeptanz, Nachhaltigkeit, Risiko.

Maßnahme
Eine Maßnahme ist ein gezielter Eingriff in das System, der sich in der Regel auf einen Energieträger oder eine Technologie in einem bestimmten Sektor bezieht. Mehrere Maßnahmen können zu Strategien zusammengefaßt werden. Eine Maßnahme wird im Modell durch Hypothesen für exogen vorgegebene Strategieparameter quantifiziert.

Modell
Synonym zu Realmodell. Ein Realmodell ist eine vereinfachte und abstrahierte Darstellung des realen Systems.

Modellierungsperiode
Die Modellierungsperiode ist der Zeitraum in der Zukunft, der von der strukturierten Zukunftsanalyse untersucht werden soll.

Nutzenergie
Die Energie, die von der Endverbrauchertechnologie produziert wird und zur Bereitstellung der gewünschten Energiedienstleistung benötigt wird.

Planung
Planung ist die gedankliche Erfassung eines zu gestaltenden Systems. Sie beschreibt und analysiert die Gesamtheit aller materiellen Objekte (Objektssystem) und ideeller Vorstellungen (Wertesystem). Innerhalb der festgelegten Systemgrenzen werden alle systembestimmenden Elemente zusammen mit ihren Eigenschaften und wechselseitigen Beziehungen erfaßt. Die Energie- und Umweltplanung liefert die Entscheidungsgrundlage für eine rationale Energie- und Umweltpolitik. Sie untersucht die Strukturen und das dynamische Verhalten von Energiesystemen, zeigt Grenzsituationen auf und erforscht Steuermöglichkeiten. Durch einen systematischen Vergleich der energiepolitischen Strategien ermöglicht es die Planung, trotz unbekannter Zukunft schon heute bessere Entscheidungen für morgen treffen zu können.

Planungsinstrument
Ein Planungsinstrument ist ein Computerprogramm, das den mathematischen Algorithmus, der zur Beschreibung eines Realmodells verwendet wird, auf einem Computer berechnet. Das Planungsinstrument ist das Werkzeug, mit dem der Modellierer seine systemanalytischen Analysen durchführt.

Primärenergie
Energieinhalt von Energieträgern, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurden (z. B. Steinkohle, Erdgas, Rohöl).

Realmodell
Ein Realmodell ist eine vereinfachte und abstrahierte Darstellung des realen Systems.

Referenzcase
Der Referenzcase (Referenzfall, Referenzszenario) beschreibt die am wahrscheinlichste Entwicklung des Energiesystems für den Fall, daß die Trends der Vergangenheit unverändert anhalten und keine gezielten Veränderungseingriffe in das System vorgenommen werden. Daher auch oft als "Business As Usual" Case bezeichnet.

Referenzenergiesystem
Das Referenzenergiesystem (RES) ist eine modellhafte Darstellung eines Energie- und Umweltsystems, das alle Materialströme und deren Umwandlungsprozesse in einem Netzwerkdarstellung abbildet.

Referenzhypothese
Die Referenzhypothese beschreibt die zeitliche Entwicklung eines Systemparameters für den Referenzcase.

Retrieval
Retrieval bedeutet das Wiederauffinden von Informationen in einer Datenbank nach vorgegebenen Suchkriterien.

Sekundärenergie
Energieinhalt von Energieträgern, die aus der Umwandlung von Primärenergieträgern oder anderen Sekundärenergieträgern gewonnen wurden (z. B. Mineralölprodukte).

Sensitivitätsanalyse
Die Sensitivitätsanalyse variiert einzeln die unabhängigen Variablen (explanatory variables, Systemparameter) eines Modells, um die Auswirkungen auf die abhängigen Variablen (explained variables) zu untersuchen. Zur Ableitung statistischer Aussagen über das Systemverhalten (z. B. mit der Monte Carlo Methode) können auch Gruppen von unabhängigen Variablen gleichzeitig variiert werden.

Strategie
Strategien enthalten die Beschreibung für ein Vorgehen, das dazu führen soll, ein System in Abhängigkeit seines Zustandes durch eine vorgegebene Abfolge von Handlungen in einen gewünschten Zielzustand zu bringen. Strategien sind Entscheidungen über alternative Aktionskurse und bestehen aus einer Kombination von aufeinander abgestimmten Maßnahmen.

Strategieparameter
Ein strategischer Parameter ist ein Systemparameter, der vom Entscheidungsträger beeinflußt werden kann. Maßnahmen werden im Modell durch strategische Parameter beschrieben.

Stützjahre
Stützjahre sind diejenigen Bilanzierungsperioden innerhalb der Modellierungsperiode, die vom Planungsinstrument explizit berechnet werden sollen.

System
Unter einem System wird eine abgegrenzte Menge von Elementen verstanden, die durch gegenseitige Relationen (Wirkungsverknüpfungen) miteinander verknüpft sind. Diese Beziehungen legen die Struktur des Systems fest. Die Gesamtheit aller anderen Systeme, die mit diesem System in Wechselwirkung stehen, wird als Umwelt des Systems bezeichnet. Wechselwirkungen des Systems mit der Umwelt sind der Austausch von Materie, Energie oder Information. Ein System kann zweckmäßigerweise in Subsysteme unterteilt werden, wobei sich die Aufgliederung an der Autonomie der Teilbereiche orientiert.

Systemelement
Eine Systemelement ist ein Objekt innerhalb eines Systems.

Systemparameter
Ein Systemparameter ist eine Größe des Gleichungssystems, die vor der Berechnung des Systems festgesetzt wird und für die Berechnung als konstant angenommen wird. Für die Simulation eines Referenzenergiesystems sind dies z. B. die Marktanteile, die Nutzungsgrade, die Kostenfaktoren, die Nachfrage, die Ressourcen, die Preise, die wirtschaftlichen Aktivitäten und die demographische Größen. Die Systemparameter werden in Szenarioparameter und strategische Parameter unterteilt.

Systemvariable
Eine Systemvariable ist eine Größe des Gleichungssystems, welche in einem bestimmten Definitionsbereich unterschiedliche Werte annehmen kann und vom Planungsinstrument berechnet wird. Man unterscheidet exogene Variable (unabhängige Variable, explanatory Variable), die durch Identitäten mit Systemparametern bestimmt werden, und endogene Variable (abhängige Variable, explained variable), die durch Modellgleichungen berechnet werden. Welche Systemvariablen exogen oder endogen sind, hängt davon ab, was das Modell berechnen soll. Bei der Berechnung der Materialbilanz in einem RES sind die Materialflüsse endogene Systemvariable, die Nachfrage ist eine exogene Systemvariable. Dagegen sind bei der Berechnung der Kosten die Materialflüsse exogen und die Kostenströme endogen.

Szenario
Ein Szenario beschreibt die Entwicklung der sozio-ökonomischen Randbedingungen für ein untersuchtes Energiesystem, die nicht durch den Entscheidungsträger beeinflußt werden können. Ein Szenario läßt sich in Szenarioelemente für einzelne Bereiche untergliedern, wie z. B. die Entwicklung der Energiemärkte, des Nutzenergiebedarfs, der Verfügbarkeit neuer Technologien oder physikalische Umweltbeschränkungen. Ein Szenario besteht dabei aus einer systematischen, konsistenten und plausiblen Kombination von Annahmen (Hypothesen) für die betroffenen exogen vorzugebenden Szenarioparameter.

Szenarioparameter
Ein Szenarioparameter ist ein exogen vorgegebener Systemparameter, der nicht vom Entscheidungsträger beeinflußt werden kann. Szenarioparameter dienen in der Modellierung zur quantitativen Beschreibung von Szenarien und Szenarioelementen.

Szenariotrend
Ein Szenariotrend beschreibt die zeitliche Entwicklung eines Ausschnitts der sozio-ökonomischen Randbedingungen des Energiesystems, wie z. B. Weltenergiepreise, Demographie, Wirtschaftswachstum, Nutzenergiebedarfsentwicklung.

"Top-down" Modellierung
Der top-down-Modellierungsansatz beginnt mit einer hochaggregierten verallgemeinernden Darstellung des Systems, die dann regional und funktional disaggregiert wird.

Wichtungen
Wichtungen erlauben bei mehreren Kriterien eine zusammenfassende Beurteilung. Dazu wird die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien untereinander festgelegt.

Zeitreihe
Eine Zeitreihe besteht aus Wertepaaren mit einem Zeitbezug und der dazugehörigen Ausprägung. Systemvariable und Systemparameter werden numerisch als Zeitreihe beschrieben, denn sie besitzen eine zeitliche Entwicklung. Diese setzt sich aus einer historischen Entwicklung und Zukunftswerten zusammen. Für die Zukunftswerte können innerhalb einer Zeitreihe mehrere Annahmen (Hypothesen) getroffen werden.

Kurzfassung

Energiepolitische Entscheidungen werden in einem Spannungsfeld getroffen, das von Komplexität, Unsicherheit, Langfristigkeit und Kapitalintensität gekennzeichnet ist. Strategische Planung unterstützt diesen Entscheidungsprozeß durch ein systematisches und zukunftsbezogenes Durchdenken von Zielen, Maßnahmen, Mitteln und Wegen zur Erreichung einer wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Energieversorgung. Eine solche Analyse ist nur mit Hilfe von Energiemodellen möglich, deren Methoden heute ausgereift sind, die im Bereich der Datenverwaltung und Entscheidungsunterstützung jedoch erhebliche Defizite besitzen. Diese Arbeit gibt einen Überblick über aktuelle entscheidungsunterstützende Planungsinstrumente und stellt das neue Instrument *PlaNet* zur computerbasierten Entscheidungsunterstützung für die strategische Energie- und Umweltplanung vor.

Das Planungsinstrument *PlaNet* unterstützt das methodische Konzept der strukturierten Planung von der Definition der Problemstellung über die Modellierung bis hin zur Erfolgskontrolle. Die Daten stehen im Mittelpunkt des Planungsprozesses und werden in einer relationalen Datenbank zentral verwaltet. Energiesysteme werden in *PlaNet* mit dem Konzept des Referenzenergiesystems (RES) modelliert, einer Netzwerkdarstellung der Topologie der Energieflüsse. Durch die Trennung von Topologie des Energiesystems, Datenverwaltung und mathematischer Struktur des Modells konnte zum erstenmal eine standardisierte Datenstruktur für Energiesystemmodelle entwickelt werden. Die Datenbank ist dabei als Informationssystem angelegt, so daß Daten schnell und einfach wiedergefunden, aktualisiert und mit kommerziellen Softwarepaketen ausgetauscht werden können. Simulationsmodule berechnen Energie-, Schadstoff- und Kapazitätszsbilanzen für beliebige Energiesysteme und ermitteln anhand der Investitionskosten, Brennstoffkosten, fixen und variablen Betriebskosten die über den Beobachtungszeitraum abdiskontierten Gesamtkosten des Energiesystems. Um Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Planung zu erhöhen und eine regelmäßige Aktualisierung der Modellierung zu erleichtern, ermöglicht *PlaNet* die umfangreiche Dokumentation der Modellierungsarbeiten. Dies umfaßt die Struktur des Energiesystems (RES), die Spezifikation des mathematischen Gleichungssystems, die Vorgehensweise (Probleme, Ziele, Szenarien und Maßnahmen), die Herkunft der Daten, sowie die Analyse und Bewertung der Modelläufe.

PlaNet ist modular aufgebaut und integriert unter einer einheitlichen Bedienoberfläche ein Datenbanksystem, Simulationsmodule sowie entscheidungsunterstützende Werkzeuge für Szenariomanagement, Datenanalyse und multikriterielle Bewertung. *PlaNet* unterstützt den Gedanken der strukturierten Planung und Systemanalyse in allen wichtigen Aspekten und ist damit ein ideales Werkzeug für die strategische Analyse und die Erfolgskontrolle im Bereich der Energie- und Umweltplanung. Die Standardisierung der Datenschnittstelle für Energiesystemmodelle schafft eine vielversprechende Basis für zahlreiche methodische Erweiterungen und die langfristige Harmonisierung unterschiedlicher Planungsansätze.

Abstract

Decision making in energy and environmental planning is characterized by complexity, uncertainty, long term impacts and capital intensity. Strategic planning supports decision making by offering a systematic way of analyzing, evaluating and shaping future energy systems. It consists of setting goals and identifying strategies to improve the economic and environmental potentials for producing energy commodities and services. A systematic analysis of the strategic decisions necessitates the use of large energy models. These planning models have reached a tremendous diversity and quality of methodological approaches but they are lacking convergence in information management.

This thesis describes the state of the art of decision support systems for energy planning and introduces a computer based planning procedure based on systems analysis, decision support and information management theory. Following the methodological approach of structured planning a specification for the new planning tool *PlaNet* is derived covering data management, modelling flexibility, transparency, decision support and user friendliness.

The methodological approach for a comprehensive analysis is based on systems engineering and assists all phases of decision making and structured planning. *PlaNet* integrates an energy system model, a user friendly interface, a central database management system and several decision support tools for scenario management, data analysis and multicriteria evaluation. Energy systems are described as a network of commodities and transformations using the “Reference Energy System (RES)” accounting framework. The separation of the energy system topology from the data management and the mathematical structure of a model allowed for the first time a standardized formulation of the relational data interface. Different energy system models can now exchange input data, assumptions and results and may share the same data entry and analysis tools thus allowing a tighter integration of existing and new modelling methodologies.

The module *PlaNet-Flow* simulates the energy system and calculates energy and emission balances. *PlaNet-Cost* makes a detailed cost analysis and determines the installed capacities, the annual investment costs, fuel costs, fixed and variable operating costs for each technology and the specific production costs for all commodities. In addition it computes the total energy system costs discounted over the modelling period.

To increase the transparency of the modellers work, *PlaNet* allows for a detailed documentation of the data sources, the structure of the modelled energy system (RES), the mathematical specification of the model, the analyzed problems, goals, objectives, scenarios and strategies, as well as the evaluation of the model runs. This broad approach which supports all phases of structured planning makes *PlaNet* an ideal tool for strategical analysis and monitoring in the field of energy and environment. In addition its standardized data interface offers the unique possibility for the integration of energy system simulation with the various other existing mathematical optimization approaches for modelling.

1 Einleitung

Die Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energieträger hat in diesem Jahrhundert zu erheblichen Umweltproblemen geführt, deren Komplexität in den letzten 40 Jahren ständig zugenommen hat. In den fünfziger Jahren waren die Probleme auf die direkte Umgebung von Energieerzeugungs- und Produktionsanlagen begrenzt. In der Nähe von Kohlekraftwerken, Gasanstalten, Stahlwerken, chemischen und industriellen Anlagen konnte ein hoher Grad an Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzung festgestellt werden. In den sechziger Jahren bekamen die Umweltprobleme einen regionalen Charakter, wie z. B. die Luftverschmutzung im Ruhrgebiet oder der "Smog" in London. Die zwei "Ölkrisen" und das beginnende "Waldsterben" durch den "sauren Regen" in den siebziger Jahren machten eine nationale Energie- und Umweltpolitik notwendig. Heute wird der Treibhauseffekt weltweit diskutiert und verlangt nach globalen Lösungsstrategien. Dabei steht die Nutzung fossiler Brennstoffe in der Energieversorgung und im Verkehr im Vordergrund, denn der Großteil der anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen stammt aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Doch auch andere Energieträger stehen im Kreuzfeuer der Kritik. Die Nutzung der Kernenergie ist seit der Katastrophe von Tschernobyl 1986 sehr umstritten, da die langfristigen Risiken einer Verstrahlung durch Unfälle oder durch den erhöhten Umsatz radioaktiver Stoffe nur schwer abgeschätzt werden können und in der Bevölkerung kontovers diskutiert werden. Auch regenerative Energieträger sind nicht unproblematisch. Landflächen lassen sich beispielsweise nicht beliebig dicht mit Solar- oder Windkraftanlagen bebauen. Auch die vollständige Nutzung des vorhandenen Wasserkraftpotentials würde zu erheblichen Eingriffen in die natürlichen Kreisläufe des Ökosystems führen. Beim Bau des Assuan Staudamms in Ägypten beispielsweise führte die Sedimentablagerung neben einer Verschlammung des Staubeckens zu einem Wegfall der natürlichen Düngung, was durch künstliche Düngemittel ausgeglichen werden mußte. Die starke Bewässerung und der Wegfall der regelmäßigen Überschwemmungen führte zu einer Versalzung der Böden und ermöglichte die Ausbreitung von Krankheiten, Seuchen und Ungezieferplagen. Bauwerke und Kulturdenkmäler wurden durch das steigende Grundwasser bedroht und die große Oberfläche des Sees führte zu hohen Wasserverlusten durch Verdunstung. Auch die Staudämme am Sambezi in Moçambique (Cabora Bassa) und Sambia/Zimbabwe (Karibadamm) sowie die Stauanlagen des Kongo bei Matadi in Zaïre, Itaipu in Brasilien oder ganz aktuell der Drei-Schluchten-Damm am YangTse-Fluß in China sind heute wegen der Eingriffe in das Ökosystem stark umstritten.

Energiepolitisches Handeln ist eingebettet in ein komplexes Spannungsfeld aus wirtschaftlichen und politischen Interessen sowie aus technischen und ökologischen Randbedingungen. "Die zentralen Herausforderungen sind dabei die Schaffung humaner Lebensbedingungen für eine wachsende Weltbevölkerung, die Vermeidung nicht tolerierbarer Umweltveränderungen, die Sicherung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit und ein Übergang auf Wirtschafts- und Produktionssysteme, die eine nachhaltige Entwicklung ermöglichen und die natürlichen Lebensgrundlagen nicht zerstören" /1/. "The essential goal of sustai-

nable strategies is to provide the energy services required for supporting economic growth and improving quality of life, especially in developing countries, while minimizing the health and environmental impacts of human activities" /2/. Ziel einer erfolgreichen Energieplanung ist es, eine sichere, diversifizierte, wirtschaftliche, nachhaltige, umwelt- und sozialverträgliche Energieversorgung zu schaffen, die die Umweltqualität und Ressourcen auch für zukünftige Generationen erhält.

Die Komplexität der Entscheidungsproblematik hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Wo früher regionale Strategien ausreichten, werden heute internationale Verpflichtungen eingegangen und langfristige politische Ziele festgesetzt. Z. B. wurden die maximalen transnationalen Schadstoffströme in den Protokollen von Helsinki (1985, SO_2) und Sofia (1988, NO_x) begrenzt. Politische Vorsorgemaßnahmen gegen die durch den Treibhauseffekt verursachten Klimaänderungen werden diskutiert. So fordern Klimatologen eine weltweite Reduzierung der durch anthropogene Aktivitäten erzeugten CO_2-Emissionen. Die Enquête-Komission des Deutschen Bundestages empfahl 1990 eine Senkung der CO_2-Emissionen für die alten Bundesländer um 80% bis zum Jahr 2050. Bereits 1988 wurde in Toronto die Reduzierung der weltweiten CO_2-Emissionen um 20% bis zum Jahr 2005 (bzw. 50% bis 2050) beschlossen. Die von allen Ländern auf dem Umweltgipfel von Rio (1992) unterzeichnete Klimarahmenkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre konnte in Berlin (1995) jedoch nicht in Protokolle mit konkreten Minderungszielen umgesetzt werden.

Rein technisch gesehen stehen viele Möglichkeiten zur Begrenzung des Treibhauseffekts zur Verfügung. So läßt sich z. B. eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen erzielen, indem fossile Energieträger durch die nicht CO_2 emittierende Energiequellen Wind, Sonne oder Kernenergie sowie durch den weniger CO_2 emittierenden Brennstoff Erdgas ersetzt werden. Auch die Senkung des Endenergieverbrauchs durch rationelle Energieverwendung oder durch Reduzierung der Energiedienstleistungen verringert wirksam die Schadstoffemissionen. Heute diskutierte Maßnahmen sind die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieressourcen, die Verschärfung der Wärmedämmungsverordnung, die Festlegung von Flottenverbräuchen für Kraftfahrzeuge und die Einführung von Energiesteuern oder CO_2-Steuern zur Beeinflussung des Verbraucherverhaltens. Schließlich können Rückhalte- und Entsorgungstechnologien die Freisetzung der CO_2-Emissionen mindern. Nicht alles was technisch machbar ist, läßt sich wirtschaftlich durchführen oder ist gar effizient im Sinne der Nutzung knapper volkswirtschaftlicher Ressourcen. Viele technisch realisierbare Möglichkeiten sind entweder zu teuer, schwierig umzusetzen, unpopulär, nicht wirkungsvoll genug oder noch nicht genügend ausgereift.

Energieversorgungsstrukturen lassen sich wegen der dafür erforderlichen langen Entwicklungs- und Umstellungszeiten nur langsam verändern. Einmal getroffene Entscheidungen beeinflussen über Jahrzehnte den Energieverbrauch, binden langfristig hohe Investitionssummen und lassen sich später nur schwer korrigieren. Hinzu kommt, daß solche Entscheidungen von anderen politischen und gesellschaftlichen Zielen beeinflußt werden, wie das Beispiel des "Jahrhundertvertrags" zur Sicherung des deutschen Kohlebergbaus oder die Diskussion um

den Ausstieg aus der Kernenergie zeigt. Die Schwierigkeiten bestehen darin, genau herauszufinden, welche Lösungsstrategien überhaupt möglich sind, welche davon gesellschaftspolitisch durchsetzbar sind und welche Strategien die zur Verfügung stehenden finanziellen Ressourcen optimal nutzen, also "kosteneffizient" sind.

In diesem Spannungsfeld von Komplexität, Unwägbarkeit, Langfristigkeit und Kapitalintensität soll der Entscheidungsträger heute kurzfristig Entscheidungen treffen. Ziel einer Energie- und Umweltplanung ist daher die Beratung der Entscheidungsträger in strategischen energiepolitischen Fragen. Die zentrale planerische Aufgabenstellung ist es, zeitlich und kostenmäßig "optimale" Entscheidungspfade zu finden, die den besten Zielerreichungsgrad aufweisen und die gleichzeitig "robust" sind. Dazu werden die Alternativen systematisch miteinander verglichen und bewertet, um eine objektive Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Im Vordergrund steht dabei der rationelle Einsatz der volkswirtschaftlichen Ressourcen zur Bereitstellung von bestimmten Energiedienstleistungen. Die Energie- und Umweltplanung stellt gesicherte Fakten und Erfahrungswerte zusammen, evaluiert Alternativen, quantifiziert Auswirkungen politischer Entscheidungen und bewertet die entstehenden Umweltauswirkungen hinsichtlich der gesteckten Ziele. Sie wird daher auch "systematische Zukunftsanalyse" /3/ genannt, weil sie weit in die Zukunft reichende Entwicklungen eines Energiesystems hinsichtlich der Gestaltungs- und Beeinflussungsmöglichkeiten untersucht, Handlungsnotwendigkeiten und Spielräume aufzeigt, Rückschlüsse auf heute zu treffende Entscheidungen zieht und damit einen systematischen Vergleich alternativer Zukunftspfade anhand festgelegter Kriterien ermöglicht. Unter einem Energiesystem versteht man dabei die zur Erzeugung von Gütern und zur Erbringung von Energiedienstleistungen dienende technische und ökonomische Ausstattung einer geographischen Region.

Die zukünftige Entwicklung des heutigen Energiesystems kann nicht vorausgesagt werden. Die Trends der Vergangenheit können nicht normativ fortgeschrieben werden. Statt dessen wird mit Hilfe der Szenariotechnik eine Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen aufgespannt. Hierbei bestimmen die Szenarien den Rahmen, in dem die Handlungsalternativen systematisch verglichen werden. Im Vordergrund steht dabei die Identifizierung "robuster" Entscheidungen. Robuste Entscheidungen zeichnen sich dadurch aus, daß sie für einen weiten Unsicherheitsbereich der Rahmenbedingungen richtig sind und deshalb einer genauen Kenntnis der Zukunft nicht bedürfen. Der Grad der Robustheit soll dem Entscheidungsträger die Risiken seiner Entscheidung bewußt machen. "Die systematische Zukunftsanalyse kann dabei weder Patentrezepte liefern, noch kann sie dem Entscheidungsträger die eigentliche Entscheidung, das Abwägen von Nutzen und Risiko, abnehmen. Sie kann aber dazu beitragen, die Entscheidungen auf eine rationalere Basis zu stellen und Vorsorge bezüglich der Ungewißheit der Zukunft zu treffen" /3/.

Da mit realen Energiesystemen keine Experimente durchgeführt werden können, verwendet der Planer für die systematische Zukunftsanalyse ein vereinfachtes Abbild der Realität. Dieses abstrakte "Modell" realer Energiesysteme enthält alle problemrelevanten Komponenten, ihre Wechselwirkungen untereinander, ihre Struktur und ihre spezielle Verhal-

tensweisen. Der Planer kann an einem solchen Modell Erkenntnisse über das Realsystemverhalten gewinnen, Bandbreiten möglicher Spielräume beurteilen und verschiedene Handlungsalternativen sowie zukünftige Entwicklungspfade untersuchen, um somit die Konsequenzen einer Entscheidung sowie die Erreichbarkeit der energiepolitischen Zielsetzungen erkennen zu können.

Die Komplexität einer solchen Aufgabenstellung erfordert den Einsatz computergestützter Planungsinstrumente, um die Vielzahl der notwendigen Berechnungen in einem vernünftigen Zeitrahmen durchführen zu können. Ziel dieser Arbeit ist es, ein computergestütztes Instrument für die strategische Energie- und Umweltplanung im Sinne einer oben beschriebenen Entscheidungsunterstützung zu entwickeln. In Kapitel 2 wird die Problemstellung und die Zielsetzung der Arbeit beschrieben. In Kapitel 3 wird ein Überblick über den Stand der Technik für entscheidungsunterstützende Systeme gegeben, wobei zuerst die Energieumsetzungen auf der Erde dargestellt werden, um die Bedeutung der thermodynamischen Naturgesetze für das Entscheidungsproblem aufzuzeigen. Anschließend werden die entscheidungstheoretischen Grundlagen und die Vorgehensweise bei der Energie- und Umweltplanung erarbeitet sowie der Grundgedanke entscheidungsunterstützender Systeme erläutert. Im Anschluß daran werden verschiedene Verfahren zur Modellierung von Energiesystemen beschrieben und die Entwicklung und der heute erreichte Stand der Planungsinstrumente dargestellt. Das Kapitel schließt mit einer Liste von Bewertungskriterien für die Funktionalität von Planungsinstrumenten und faßt die Schwachstellen heutiger Instrumente zusammen. In Kapitel 4 wird das in dieser Arbeit entwickelte entscheidungsunterstützende System *PlaNet* beschrieben. Es besteht aus dem Informationssystem *NetWork*, den Modulen *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* zur Berechnung der Material- und Kostenbilanz eines Energiesystems, den Modulen für Dateneingabe, Szenariomanagement, sowie Analyse und Verarbeitung der Ergebnisse. Ein weiteres Unterkapitel befaßt sich mit der multikriteriellen Bewertung von Handlungsalternativen. In Kapitel 5 wird anhand einer Fallstudie gezeigt, wie das System für die regionale Energieplanung in Madagascar eingesetzt wurde. Anschließend werden in Kapitel 6 die Fähigkeiten von *PlaNet* zur Unterstützung strategischer Entscheidungen zusammengefaßt und mögliche Weiterentwicklungen diskutiert.

2 Problemstellung und Zielsetzung

2.1 Problemstellung

Zur Unterstützung von Entscheidungen in Energiewirtschaft und Energiepolitik werden heute Planungsinstrumente mit leistungsfähigen Informationssystemen, einfach zu bedienenden Dialogkomponenten, tragfähigen, validierten Analyseverfahren und Planungskomponenten benötigt. Gängige Planungsinstrumente können heute schon auf eine beachtliche Vielfalt von Planungsmethoden zurückgreifen. Grundlegende Defizite sind jedoch die mangelnde Transparenz bei der Informationsverwaltung, eingeschränkte Fähigkeiten zur Entscheidungsunterstützung und Schwächen bei der Benutzerfreundlichkeit.

2.1.1 Informationsverwaltung

Die Defizite im Bereich der Informationsverwaltung sind deshalb besonders gravierend, weil die Datenverwaltung mit steigender Komplexität der Fragestellungen und zunehmender Größe der Systeme für die Planung immer wichtiger wird. Während Datenbankmanagementsysteme in Informatik und Wirtschaft schon lange und erfolgreich als Informationssysteme eingesetzt werden, verwenden viele Planungsinstrumente immer noch einfache Textdateien zur Datenverwaltung. Die Informationen werden mit einem Texteditor in einem genau festgelegten Format eingegeben, das streng eingehalten werden muß, da kleinste Abweichungen zu Programmabstürzen oder fehlerhaften Berechnungen führen. Hilfsmittel zur Überprüfung der Korrektheit des Datenformates oder der Vollständigkeit des Datensatzes stehen bisher nicht zur Verfügung. Die Datenstruktur folgt dem Informationsfluß durch das Computerprogramm und ist nicht nach inhaltlichen Gesichtspunkten gegliedert. Die Dateneingabe ist daher für den Benutzer unübersichtlich, umständlich und fehleranfällig.

Die heutige Situation auf dem Gebiet der Planungsinstrumente ist geprägt von einer starken Heterogenität unübersichtlicher Datenformate. Das Fehlen einer allgemeinen, standardisierten Datenschnittstelle führt zu einer Datenabschirmung: nur die Planungsinstrumente selbst sind in der Lage, auf ihre komplizierten Datenstrukturen zuzugreifen. Solch eine "Datenabschottung" behindert die ökonomisch sinnvolle Mehrfachnutzung von Daten und den Aufbau zentraler Datenpools, weil die Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Fallstudien nur manuell vorgenommen werden kann. Die Pflege der Daten wird dadurch zu einen großen Kostenfaktor. Auch die Koppelung und Integration unterschiedlicher Planungsinstrumente zur Untersuchung eines Energiesystems mit verschiedenen methodischen Ansätzen wird dadurch behindert. So lassen sich z. B. die Auswirkungen vorgegebenener Strategien mit Simulationsmodellen explorieren, während sich die bei vorgegebenen Restriktionen notwendigen Strukturveränderungen desselben Energiesystems mit Optimierungsmodellen ermitteln lassen. Obwohl die Daten sich in beiden Fällen überschneiden, können die Planungsinstrumente wegen der unterschiedlichen Datenformate nicht mit dem gleichen Datensatz arbeiten.

Instrumente werden oft auch sequentiell kombiniert, indem z. B. die Energienachfrage simuliert und der Ausbau der Energieversorgung optimiert wird. Die für eine automatische Kommunikation von Daten und Ergebnissen notwendige Koppelung unterschiedlicher Planungsinstrumente scheitert wie ihr paralleler Einsatz in der Praxis an den unterschiedlichen Datenformaten der beteiligten Instrumente - an der "Datenabschottung".

Die methodische Weiterentwicklung wird durch die fehlende Standardisierung der Datenschnittstelle behindert. Die enge Verflechtung von Daten- und Programmstruktur erlaubt keinen modularen Programmaufbau. Dieser konzeptionelle Mangel führt bei vielen Planungsinstrumenten zu unübersichtlichen und schwer zu wartenden Programmstrukturen. Deshalb erfordern methodische Erweiterungen häufig die komplette Neuprogrammierung, da eine baukastenartige Architektur nicht möglich ist. Mehrfachprogrammierung, Programmruinen und hohe Kosten für Modellerweiterungen sind die Folge.

Viele Datenbanken erfüllen zudem nicht die Anforderungen an Informationssysteme bezüglich Vollständigkeit der Daten und Retrievalmöglichkeiten. Sie enthalten nur berechnungsrelevante Informationen. Deshalb können zusätzliche vom Planer benötigte Informationen, wie allgemeine statistische Daten, Planungsziele, historische Daten, o. ä., nicht gespeichert werden. Durch das komplizierte Datenformat sind die Informationen schwer zugänglich, denn nur geübte Modellierer können die Informationen interpretieren. Weiterhin gibt es keine Retrievalfunktionen für eine schnelle, flexible, einfache und gezielte Informationssuche.

2.1.2 Entscheidungsunterstützung

Viele existierende Instrumente unterstützen den Planungsprozeß nur unvollständig, weil sie sich auf die Berechnung des modellierten Systems beschränken. Deshalb können Probleme, Ziele, Maßnahmen, Strategien, Bewertungsindikatoren und damit die gesamte inhaltliche Vorgehensweise bei der Analyse nicht dokumentiert werden. Die Szenarioannahmen werden dadurch außerordentlich intransparent, wodurch die "Glaubwürdigkeit" der Modellergebnisse leidet. Außerdem fehlen Mechanismen, um Redundanzen und damit Inkonsistenzen in den Datensätzen verschiedener Szenarien zu vermeiden. Erschwerend ist auch, daß sich viele Instrumente im Bereich der Ergebnisanalyse auf tabellarische Berichte und einfache Standardgrafiken beschränken. Der Planer ist dadurch gezwungen, für die Analyse auf andere Hilfsmittel zurückzugreifen. Dieses ist nicht nur umständlich und langwierig, sondern auch schwer zu automatisieren. Wird ein Szenario korrigiert, muß infolgedessen der gesamte Auswertungsprozeß manuell wiederholt werden, um die Tabellen und Grafiken zu aktualisieren.

Weil die Strukturierungshilfen mit den Informationsmengen überfordert sind, wird es immer schwieriger, entscheidungsrelevante Informationen herauszufiltern und systematisch gegeneinander zu stellen. Außerdem fehlen formalisierte Bewertungsschemata für eine transparente und nachvollziehbare Beurteilung alternativer Strategien. Unterschiedliche Zielsetzungen und Präferenzen, Kriterien und Gewichtungsfaktoren können bei der Bewertung nicht dokumentiert werden.

Das Ergebnis der Planung wird in der Regel in einem Aktionsplan dokumentiert, der alle beschlossenen Einzelmaßnahmen und Strategien sowie die Zielindikatoren enthält, mit denen der Erfolg einer Maßnahme überprüft werden kann. Zur Erstellung und Dokumentation dieses Aktionsplan stehen allerdings keine Hilfsmittel zur Verfügung. Die heutigen Planungsinstrumente sind deshalb auch nicht für die notwendige, regelmäßige Überprüfung und Erfolgskontrolle des Aktionsplans ausgelegt, denn die Datenbasis einer Fallstudie läßt sich nicht wie in einem Informationssystem chronologisch weiterführen. Eine Wiederholung der Modelläufe für eine neue Modellierungsperiode zur Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahmen anhand aktualisierter Daten und neuester Trends ist nur mit hohem Aufwand möglich.

2.1.3 Benutzerfreundlichkeit

Die Benutzerfreundlichkeit vieler Planungsinstrumente ist weit entfernt von heute gängigen Standards. Es gibt keine grafische Benutzeroberfläche zur Dateneingabe und zur Programmsteuerung. Somit wird die Modellierung durch lange Einarbeitungszeiten und umständliche Bedienerführung sehr kostenintensiv und zeitaufwendig. Da jedes Instrument seine eigene "Philosophie" und sein eigenes Datenformat besitzt, kann sich kein übertragbarer Lerneffekt einstellen. Der Modellierer muß jedesmal aufs neue alle Einzelheiten der Dateneingabe lernen. Es gibt viele Möglichkeiten, bei der Dateneingabe formale Fehler zu machen, aber keine Hilfestellungen, Fehler im Datenformat zu identifizieren oder einen Datensatz auf seine Vollständigkeit und Korrektheit hin zu überprüfen. Die Bedienung der Instrumente erfordert daher ein hohes Maß an Erfahrung im Umgang mit EDV-Systemen. Die Handbücher sind oft unvollständig, Hilfefunktionen stehen nicht zur Verfügung. Der Planer muß unnötig viel Zeit aufwenden, um formale Regeln zu lernen, anstatt strategische Problemlösungen zu erarbeiten.

Arbeiten zur Verbesserung von Planungsinstrumenten für Energie- und Umweltsysteme können von den Fortschritten im Bereich der Informationsverwaltung, der Entscheidungstheorie und des benutzerfreundlichen Software-Designs profitieren. Der Einsatz moderner Datenbankmanagementsysteme würde Inkonsistenzen durch redundante Datenhaltung vermeiden und die Wiederverwendbarkeit aufwendig erhobener Informationen erhöhen. Eine Standardisierung der Datenschnittstelle würde, wie schon in anderen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften und der Informatik, zu einer Vereinheitlichung und Integration der Methoden führen und somit die Weiterentwicklung der Planungsinstrumente rationeller gestalten. Die aus dem Bereich der betriebswirtschaftlichen Planung gewonnenen entscheidungstheoretischen Modelle zur Strategie- und Entscheidungsunterstützung könnten die planerischen Kapazitäten für die Energie- und Umweltplanung verbessern. Eine höhere Transparenz der Vorgehensweise bei der Modellierung würde ebenfalls die Akzeptanz für die gewonnenen Planungsergebnisse fördern.

2.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein EDV-gestütztes entscheidungsunterstützendes System (Decision Support System, DSS) für die strategische Energie- und Umweltplanung auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene zu entwickeln. Dieses Instrument soll erprobte Planungsmethoden aus dem Bereich der Systemanalyse einsetzen und alle Phasen des systemanalytischen Planungszyklus unterstützen. Das System soll weiterhin eine moderne Informationsverwaltung und eine Dialogkomponente mit hoher Benutzerfreundlichkeit besitzen. Ferner soll es die inhaltlichen Annahmen und strategischen Entscheidungen des Modellierers dokumentieren und die Planungsarbeit und Modellierungsergebnisse transparent machen.

2.2.1 Informationverwaltung

Die effiziente Verwaltung großer Datenmengen ist eine zentrale Aufgabe der Energie- und Umweltplanung. Daher wird die Entwicklung einer standardisierte Datenbank für Energiesysteme angestrebt, die eine einfache, übersichtliche, redundanzfreie und konsistente Datenverwaltung ermöglicht, die Wiederverwendbarkeit der Daten verbessert und als Plattform für den Datenaustausch zwischen verschiedenen Fallstudien und Planungsinstrumenten dient.

Die Datenstruktur der zu entwickelnden Datenbank ist methodenunabhängig, um dieselbe Datenbank für unterschiedliche Planungsinstrumente einsetzen zu können. Die Informationen zu dem untersuchten Energiesystem werden nur inhaltlich strukturiert. Die Datenbank besitzt weiterhin eine flexible zeitliche und räumliche Aggregation und kann das Energiesystem in Struktur und Detaillierungsgrad an die Problemstellung angepaßt abbilden.

Die Datenbank ist so anzulegen, daß sie zwei Aufgaben erfüllen kann. Erstens muß sie alle Daten speichern können, die von den Planungsinstrumenten zur Modellierung benötigt werden. Dieses umfaßt sowohl exogen vorgegebene Daten als auch berechnete Ergebnisse. Dabei soll die Datenredundanz zwischen Szenarien auf ein Minimum reduziert werden. Zweitens soll die Datenbank als Informationssystem für beliebige Fallstudien nutzbar sein und alle Informationen, die während einer Fallstudie anfallen, speichern und dokumentieren können, d. h. auch solche Informationen, die nicht für die Berechnung verwendet werden. Zusätzlich werden komfortable Retrievalfunktionen angestrebt, die ein einfaches und schnelles Wiederauffinden der gespeicherten Daten ermöglichen. Bei der Entwicklung der Datenbank werden die modernsten Erkenntnisse aus der Informatik berücksichtigt.

Ein modulares Konzept für den Aufbau des Planungsinstruments und die einheitliche Schnittstelle zur standardisierten Datenbank sollen die Integrationsmöglichkeiten und die Vereinheitlichung von Planungsmethoden fördern, die methodische Weiterentwicklung vereinfachen und die Ausbaufähigkeit des Systems gewährleisten. Durch die Harmonisierung des Softwaredesigns wird die Teamarbeit bei der Weiterentwicklung von Planungsinstrumenten gefördert.

2.2.2 Entscheidungsunterstützung

Ein wesentlicher Aspekt der Entscheidungsunterstützung ist es, alle Phasen des Energieplanungsprozesses methodisch zu unterstützen. Dies beginnt mit der Eingrenzung des Problembereiches und der Aufstellung der Zielkriterien, umfaßt die Berechnung des modellierten Systems und endet bei der Erstellung des Aktionsplans sowie der Durchführung der Erfolgskontrolle. Es wird angestrebt, den Planungsprozeß übersichtlich zu strukturieren und den Planer dabei zu unterstützen, Argumente für die Entscheidungsfindung zu erarbeiten. Der systematische Vergleich von energiepolitischen Strategien soll sowohl Maßnahmen auf der Energiebedarfs- als auch auf der Energieversorgungsseite umfassen und wirtschaftliche, technische, soziale und umweltpolitische Kriterien bei der Bewertung berücksichtigen können.

Als Berechnungsmodule kommen validierte Methoden zur Simulation von Energiesystemen zur Anwendung, die ein hohes Maß an Flexibilität bezüglich der räumlichen, zeitlichen und sektoralen Auflösung des untersuchten Energiesystems aufweisen. Weiterhin wird ein Verfahren zur übersichtlichen Strukturierung von Szenarien implementiert und die Dokumentation der Vorgehensweise des Planers in der Fallstudie gefördert. Dies umfaßt neben der Beschreibung der Modellstruktur und der Szenarien auch die Dokumentation der Probleme, Zielsetzungen, Bewertungsindikatoren und der untersuchten Maßnahmen.

Durch die Entwicklung flexibler Auswerte- und Darstellungsmöglichkeiten wird der Planer wirksam dabei unterstützt, die berechneten Ergebnisse zu analysieren und an die Entscheidungsträger zu vermitteln. Eine transparente Bewertungssystematik soll unterschiedliche Kriterien und Zielfunktionen verschiedener Entscheidungsträger oder Interessengruppen berücksichtigen können. Das entscheidungsunterstützende System soll den Planer als operatives Arbeitswerkzeug in allen Phasen begleiten und die Kontinuität bei der Planung fördern.

2.2.3 Benutzerfreundlichkeit

Die zu erstellende graphische Benutzeroberfläche soll so gestaltet werden, daß eine einfache Handhabung des Planungsinstruments und eine schnelle Einarbeitung gewährleistet wird. Außerdem muß sie in der Lage sein, die Arbeitsvorgänge übersichtlich zu strukturieren und transparent darzustellen. Das Planungsinstrument soll gut dokumentiert sein und ein kontextsensitives Hilfesystem besitzen. Die dazu notwendigen Berechnungsmodule müssen einen Prüfalgorithmus enthalten, der Fehler, Inkonsistenzen und Unvollständigkeiten im Datensatz erkennen kann. Schon während der Dateneingabe müssen daher Plausibilitätskontrollen unbeabsichtigte Fehler entdecken können, um den Zeitaufwand zur Erstellung eines lauffähigen Datensatzes zu reduzieren.

Wesentliches Ziel bei der Entwicklung des entscheidungsunterstützenden Systems muß vorrangig die Steigerung der Effizienz und Transparenz bei der Planung sein. Tabelle 2-1 faßt die an das zu entwickelnde Planungsinstrument gestellten Anforderungen noch einmal zusammen. Unabdingbar ist eine konsistente und standardisierte zentrale Datenverwaltung für

verschiedene Modelle, eine übersichtliche Strukturierung des Planungsprozesses, die Unterstützung aller seiner Phasen, eine erweiterte Entscheidungsunterstützung und eine einfache Bedienung, die jeweils den Planer in die Lage versetzen müssen, noch schneller als bisher seine inhaltlichen und konzeptionellen Vorstellungen zu realisieren, um daraus plausible und stichhaltige Schlußfolgerungen ableiten zu können.

Tabelle 2-1: Anforderungen an das zu entwickelnde Planungsinstrument

Anforderungen an die Informationsverwaltung

1. Standardisierung der Datenschnittstelle
   - zur Strukturierung der Informationsflut
   - zur einfacheren Wiederverwendbarkeit der Daten
   - zur besseren Kopplung unterschiedlicher Planungsinstrumente
   - zur Integration und Harmonisierung der methodischen Weiterentwicklung
   - damit verschiedene Modelle dieselben Daten verwenden können
2. Doppelte Nutzungsmöglichkeit der Datenverwaltung
   - als Datenbank für Planungsinstrumente
   - als Informationssystem für Fallstudien
3. Verringerung der Redundanz der verwalteten Daten

Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung

1. Unterstützung aller Phasen des Planungsprozesses durch geeignete Module
2. Anwendung bewährter Berechnungsmethoden aus der Systemanalyse
3. Dokumentation der strategischen Vorgehensweise bei der Fallstudie
4. Szenariotechnik mit verringerter Datenredundanz
5. Flexible, vom Benutzer anpaßbare Analysemöglichkeiten
6. Transparente, multikriterielle Ergebnisbewertung
7. Kontinuitätsgedanken bei der Planung unterstützen

Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit

1. Einfach handhabbare graphische Benutzeroberfläche
2. Übersichtliche Strukturierung des Planungsprozesses
3. Leicht zu erlernende Bedienung
4. Übersichtliche Datenverwaltung
5. Kontextsensitives Online-Hilfesystem und ausführliche Handbücher
6. Fehlerfrüherkennung durch Plausibilitätskontrollen bei der Dateneingabe
7. Modellspezifische Konsistenzprüfungen für den gesamten Datensatz

3 Planung und Entscheidungsfindung

In diesem Kapitel werden Aufgaben, Ziele und Vorgehensweise bei der Energie- und Umweltplanung beschrieben. Zuerst wird die Bedeutung der thermodynamischen Naturgesetze für das Entscheidungsproblem aufgezeigt. Dann wird der Entscheidungsprozeß untersucht und der systemanalytische Planungsansatz erläutert. Anschließend werden die Grundlagen von entscheidungsunterstützenden Systemen veranschaulicht, und eine Klassifizierung heutiger Planungsinstrumente durchgeführt. Anhand einer Bewertung des Leistungsumfangs der Planungsinstrumente werden Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt.

3.1 Die Thermodynamik als Randbedingung für die Energieplanung

3.1.1 Die thermodynamischen Haupsätze

Das Verfahren der Energie- und Umweltplanung beruht in erster Linie auf einer ganzheitlichen Bilanzierung und systematischen Analyse der umgesetzten Energie- und Stoffströme eines Energiesystems. Daher haben die thermodynamischen Hauptsätze eine grundlegende Bedeutung. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik, der *Energieerhaltungssatz*, besagt, daß sich die Gesamtenergie eines geschlossenen Systems nicht ändert, d. h. daß Energie niemals verloren geht, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden kann. Sadi Carnot (1796 - 1832) hat schon im Jahre 1824 in seiner Veröffentlichung "Réflexions sur la puissance motrice du feu" die Wärme als eine Substanz betrachtet, die sich nicht erzeugen oder zerstören läßt. Je nach Temperatur, bei der die Wärme auftritt, bringt sie jedoch ein unterschiedliches Maß an *Arbeitsfähigkeit* mit. Den Übergang von Wärme aus einem Reservoir höherer Temperatur in ein Reservoir tieferer Temperatur und die dabei gewinnbare Arbeit vergleicht Carnot mit dem Übergang von Wasser aus einem höher gelegenen in ein tiefer gelegenes Bassin. Wärme, Arbeit und Bewegungsenergie sind für ihn nur die Äußerung einer einzigen Größe, der *Energie* /4/. Die Arbeitsfähigkeit (Exergie) ist ein Maß für die *verfügbare Energie* und entspricht dem Anteil der Energie, der sich in andere Energieformen umwandeln läßt, um z. B. nützliche Arbeiten zu verrichten. Bei Wärme entspricht dies dem Anteil, der über der Umgebungstemperatur liegt. Die Wärme bei Umgebungstemperatur (Anergie) läßt sich nicht in andere Formen umwandeln und ist somit *nicht verfügbare Energie*.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, 1865 von Rudolf Clausius formuliert, besagt, daß die Entropie eines abgeschlossenen Systems niemals abnehmen, wohl aber zunehmen kann. Beim Ablauf von reversiblen Prozessen bleibt die Entropie konstant, bei irreversiblen Prozessen nimmt sie zu. Die vorhandene Energie strebt einem Zustand geringerer Ordnung zu, indem Exergie durch Dissipation in gleichmäßig verteilte Wärmeenergie übergeht, bis nur noch Anergie bei Umgebungstemperatur vorhanden ist. Dabei nimmt die Entropie zu. Die beiden Ergänzungen zu den Hauptsätzen besagen, daß Energie und Entropie eines Systems keine negativen Werte annehmen können, d. h., daß sie einen absoluten Nullpunkt haben.

Tabelle 3-1: Die Hauptsätze der Thermodynamik

1. Hauptsatz:	Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Energie erfüllt einen Erhaltungssatz. Sie bleibt in abgeschlossenen Systemen konstant.
Ergänzung:	Die Energie eines Systems kann keine negative Werte annehmen. Sie hat einen absoluten Nullpunkt.
2. Hauptsatz:	Entropie kann in einem abgeschlossenem System zwar zunehmen aber nicht abnehmen.
Ergänzung:	Die Entropie eines Systems kann keine negativen Werte annehmen. Sie hat einen absoluten Nullpunkt. (3. Hauptsatz)

Technische Prozesse machen die Exergie von Energieträgern nutzbar. Ein Kohlekraftwerk z. B. wandelt die Verbrennungswärme von Kohle in Dampf, den Dampf in mechanische Bewegungsenergie und diese schließlich in elektrische Energie um. Durch Irreversibilitäten wie z. B. Reibung oder Wärmeleitung wird bei jeder dieser Umwandlungen die Exergie des Systems gemindert und Entropie erzeugt. Dabei kann nur derjenige Anteil an Wärme in Arbeit umgewandelt werden, der oberhalb der Umgebungstemperatur T_0 liegt. Der maximale Wirkungsgrad (Carnot Wirkungsgrad) einer idealen, d. h. reversiblen Wärmekraftmaschine, die aus einem Wärmereservoir der Temperatur T gespeist wird, lautet daher:

$$\textit{Carnot-Wirkungsgrad}: \quad \eta = \frac{T - T_0}{T} \tag{3-1}$$

Der Carnot-Wirkungsgrad definiert die Grenze der rationellen Energieumsetzung bei Wärmekraftmaschinen. Wollte man Anergie in Exergie umwandeln, müßte der Vorgang der Dissipation von Wärme rückgängig gemacht und Entropie verringert werden, was nach dem 2. Hauptsatz in einem abgeschlossenen System unmöglich, in einem offenen System jedoch sehr wohl möglich ist. Die Entropie wird dabei über die Systemgrenzen herausgeführt und somit im System selbst reduziert. Im Gesamtsystem nimmt die Entropie durch solche Prozesse weiter zu. Maschinen, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind z. B. Wärmepumpe oder Kühlschrank. Aber auch technische Systeme wie unser Wirtschaftssystem sind offene Systeme, da sie durch einen Stoff- und Energieaustausch mit ihrer Umgebung verbunden sind.

3.1.2 Die Energieumsetzungen auf der Erde

Das Ökosystem der Erde ist kein abgeschlossenes System, da es durch Stoff- und Energieaustausch mit dem Erdinnern und dem Universum verbunden ist. Die Sonne ist dabei die wichtigste Energiequelle. Sie gibt Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab, die mit

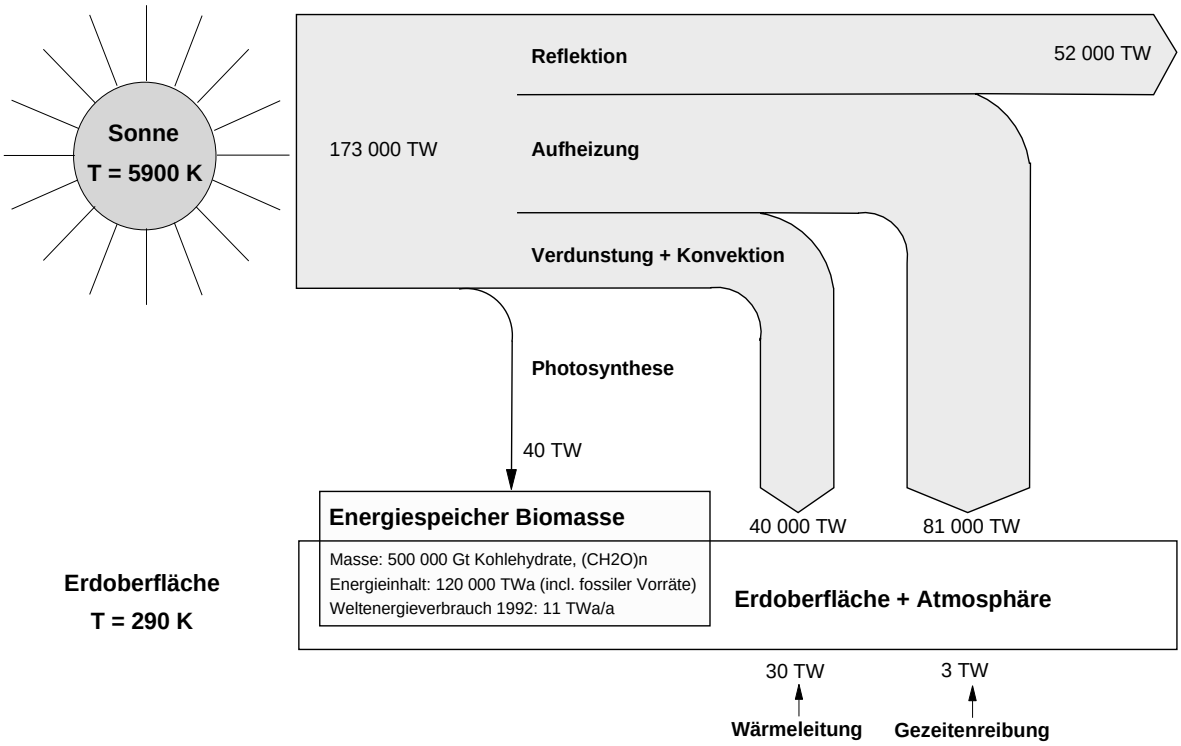


Abb. 3-1: Die Energieumsetzungen auf der Erde

einer Energiestromdichte von 1,36 kW/m^2 die Erde erreicht. Damit trifft, wie in Abb. 3-1 gezeigt, ein Wärmestrom von insgesamt 173 000 TW auf die Erde. Davon werden 30% von der Atmosphäre reflektiert, so daß an der Erdoberfläche an einem wolkenlosen Tag eine Wärmestrahlung von ca. 1,0 kW/m^2 gemessen werden kann, das entspricht einem Energiestrom von 121 000 TW. 67% dieses Wärmestroms (81 000 TW) werden durch direkte Aufheizung von Land, Wasser und Atmosphäre absorbiert. Eine Spektralanalyse der Energiestromdichte zeigt, daß Erde und Sonne sich wie "schwarze Körper" mit einer Temperatur von 290 K bzw. 5900 K verhalten. Die Erde transformiert den einfallenden Energiestrom und gibt die Wärme, die sie mit der Temperatur der Sonne (5900 K) aufgenommen hat mit der Temperatur der Erdoberfläche (290 K) zum größten Teil wieder ab. Weitere 40 000 TW (33%) werden zur Verdunstung von Wasser sowie zur Konvektion von Wasser und Luft verwendet. Nur 40 TW (0,03%) gehen durch Photosynthese in den Aufbau von Pflanzen und damit in die Biosphäre über. Der Wärmestrom aus dem Erdinnern ist vergleichsweise klein und beträgt 30 TW. Der Energiestrom infolge der Gezeitenreibung beträgt 3 TW /4/. Im Vergleich dazu betrug der Weltenergieverbrauch im Jahr 1992 insgesamt 11 TWa/a /5/.

Das System "Biosphäre" besitzt verschiedene Energiespeicher für solare Energie, wie z. B. den Wasserkreislauf mit Wolkenbildung, Flüssen und Meeren und die Biomasse, die durch Photosynthese der Planzen aufgebaut wird. Auch die Biomasse, die wegen Luftabschluß über Jahrmillionen nicht verbrannt wurde und heute die fossilen Energieressourcen (Kohle, Erdgas, Erdöl) bildet, ist ein Speicher, der Sonnenenergie langfristig akkumuliert. Allerdings sind diese Speichergrößen verglichen mit dem von der Sonne kommenden Energiestrom klein.

Da Energie aber weder erzeugt noch vernichtet werden kann, geht es bei allen Fragen der Energieplanung nicht um die Produktion oder den Verbrauch von Energie, sondern lediglich darum, die auf der Erde verfügbaren Energievorräte und -ströme in für den Menschen nutzbare Energieformen umzuwandeln, bevor sie durch Dissipation zu einem Niedertemperaturwärmestrom "degradiert" werden. Die Aufgabe der dazu eingesetzten Energiewandlungssysteme ist es, die Energie mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad in die gewünschte Form zu transformieren. Der Wirkungsgrad läßt sich dabei durch geschickte Konstruktion optimieren. So ist der Wirkungsgrad bei Wärmekraftmaschinen seit dem vorigen Jahrhundert um ungefähr den Faktor 4 angestiegen und liegt momentan für moderne Kraftwerke bei ca. 50%.

Die Wertigkeit verschiedener Energiequellen hat sich im letzten Jahrhundert stetig verschoben. Holz wurde durch Kohle ersetzt, danach gewannen Wasserkraft, Erdöl, Erdgas und zuletzt die Kernenergie zunehmend an Wichtigkeit. Der größte Teil der Energie wird heute aus dem Speicher der fossilen Brennstoffe (Kohle, Gas, Öl) gewonnen, der auf der Erde mit Hilfe der Sonne und der Photosynthese in Millionen von Jahren aufgebaut wurde. Da der Abbau dieser Vorräte sehr viel schneller erfolgt als ihr Aufbau, ist eine Erschöpfung abzusehen. Anders ist die Situation bei der Kernenergie. Sie wird durch die Spaltung schwerer Atomkerne (wie z. B. Uran 235) bzw. bei der Fusion leichter Atomkerne (Wasserstoff zu Helium) freigesetzt und beruht daher ebenfalls auf endlichen Vorräten, die bei der Entstehung der Erde angelegt wurden. Allerdings stellt der in den Weltmeeren enthaltene Wasserstoff ein im Vergleich zum Weltenergieverbrauch nahezu unerschöpfliches Energiereservoir dar.

Der direkt auf die Erde treffende Sonnenenergiestrom wird zur Zeit wegen seiner fluktuierenden und relativ geringen Intensität technisch kaum genutzt. Eine Nutzung erfordert teure technische Systeme mit Speichern und Reservesystemen. Dasselbe gilt für die indirekte Sonnenenergienutzung durch Windenergieanlagen. Bei der Wasserkraftnutzung werden dagegen erfolgreich Staudämme als Speicher eingesetzt, um die Fluktuationen auszugleichen.

Für die Biosphäre dagegen ist der Sonnenenergiestrom die wesentliche Energiequelle, die mit dem Prozeß der Photosynthese gespeichert wird. Bei der Photosynthese handelt es sich um die Umkehrung der Verbrennung, wobei die Energie des Lichtes von den Pflanzen dazu verwendet wird, aus Wasser und Kohlendioxid pflanzliche Kohlenhydrate aufzubauen und gleichzeitig gasförmigen Sauerstoff zu bilden. Die Photosynthese kann durch folgende symbolische Reaktionsgleichung beschrieben werden:

$$(C\ H_2\ O)_n + n\ O_2 \rightleftharpoons n\ H_2\ O + n\ C\ O_2 \qquad (3\text{-}2)$$

Der freie Sauerstoff der Atmosphäre stammt nahezu ausschließlich aus der Photosynthese, denn ursprünglich enthielt die Atmosphäre der Erde keinen Sauerstoff. Die bloße Existenz eines hohen Anteils an freiem Sauerstoff zeigt somit, daß die Atmosphäre sich in einem Zustand höherer Ordnung befindet. Im Zustand des chemischen Gleichgewichts wäre aller Sauerstoff in der Form von Oxiden gebunden. Der freie Sauerstoff der Luft bildet zusammen mit den CH_2O-Gruppen der Biomasse und den fossilen Vorräten den oben erwähnten Energiespeicher. Wird dieser Speicher langsam und kontrolliert genutzt, funktioniert

er wie eine Batterie, die ständig nachgeladen wird. Geschieht dieses jedoch zu heftig, kann die Funktionsfähigkeit des Speichers beeinträchtigt werden - mit unabschätzbaren Folgen für die Zukunft des Ökosystems. Ein Maß für die Pufferfähigkeit des Speichers ist seine Größe im Vergleich zu dem jährlich umgesetzten Energiestrom. Über eine Abschätzung des gesamten freien Sauerstoffs in der Atmosphäre läßt sich die Speichergröße grob mit ca. 120 000 TWa bestimmen /4/, dem 3000fachen des jährlich durch Photosynthese erzeugten "Ladestroms" von 40 TWa und dem 11 000fachen des jährlichen "Entladestroms" von 11 TWa (Weltenergieverbrauch 1992). Der durch die Zivilisation umgesetzte Energiestrom ist also erheblich kleiner als der Speicherinhalt. Andererseits beträgt er schon 25% des über die Photosynthese erzeugten "Ladestroms". Ob ein "Entladestrom" in dieser Größenordnung die Struktur des Speichers verändert und seine Funktionsfähigkeit beeinträchtigt, ist unbekannt.

Energieströme an sich sind jedoch nicht die Ursache für Umweltprobleme. Die großen Umweltbelastungen werden fast ausschließlich durch die bei der Energiewandlung freigesetzten Stoffströme verursacht, also durch CO_2, SO_2, NO_x, Staub, Ruß, radioaktive Abfälle und durch weitere Stoffe, die im wesentlichen aus Verbrennungs- und Verdampfungsprozessen stammen. Dies wird besonders deutlich bei der solaren Strahlung, die einen großen Energiestrom für die Erde darstellt und der bei weitem größte Entropiegenerator ist. Da sie jedoch nicht an einen stofflichen Energieträger gebunden ist, resultieren daraus keine Umweltbelastungen im heutigen Sinn. Sollen bei der Planng alle Umweltbelastungen erfasst werden, müssen daher alle bei der Energiewandlung entstehenden Stoffströme bilanziert werden.

3.1.3 Die Dissipation der Materie

Nach der 1905 von Einstein formulierten Äquivalenz von Masse und Energie lassen sich die Anschauungen für Energie auf Materie übertragen. Analog zum zweiten Hauptsatz läßt sich der Begriff der *"Stoffentropie"* einführen, der einer Dissipation von *verfügbarer Materie* durch Stoffzerstreuung entspricht, denn auch verfügbare Materie disintegriert, löst sich in Staub auf und verteilt sich. Dieser Vorgang der *"Stoffdissipation"* läßt sich bis zu einem gewissen Grad durch optimierten Materialeinsatz (rationellere Stoffverwendung) bzw. durch Wiederverwertung und Recycling verlangsamen, ist jedoch nicht gänzlich zu vermeiden.

Alle Lebewesen erhalten ihren Ordnungszustand, indem sie der Entropiezunahme und der "Stoffdissipation" entgegenwirken. Im offenen System Biosphäre wird dies durch Zufuhr von Arbeitsfähigkeit und verfügbarer Materie erreicht. Die Entropie wird in lebenden Organismen reduziert während sie im Gesamtsystem durch irreversible Prozesse zunimmt. Diese physikalische Vorstellung läßt sich gut auf die vom Menschen geschaffenen materiellen und immateriellen Ordnungszustände übertragen, wie z. B. auf die Güter und Dienstleistungen einer Industriegesellschaft, die letztendlich auf Kosten einer Entropiezunahme und einer "Stoffdissipation" (Umweltverschmutzung) erzeugt werden. "Das Entwertungs- bzw. das Entropieprinzip und das Entwicklungsprinzip, d. h. der Aufbau von Ordnungen, sind untrennbar miteinander verknüpft und werden durch die Hauptsätze beschrieben" /6/.

3.1.4 Die Gestaltungsfähigkeit des Menschen

Um Arbeitsfähigkeit und verfügbare Materie nutzbringend zum Erreichen höherer Ordnungszustände einsetzen zu können, wird als weitere Ressource Wissen benötigt. So machte es erst der menschliche Erfindergeist möglich, die Energie des fließenden Wassers durch das Wasserrad nutzbar zu machen. Aber auch die Biosphäre verfügt über solche im Lauf von vielen Millionen Jahren gesammelte und in den Genen lebender Organismen gespeicherte Informationen, um die Sonnenenergie für den Aufbau höherer Ordnungszustände zu nutzen. Hierfür läßt sich der Begriff der Gestaltungsfähigkeit definieren /6/. Die Gestaltungsfähigkeit umfaßt Wissen, Information und Kreativität und ist für den Aufbau lebensnotwendiger Ordnungszustände unabdingbar. Die Gestaltungsfähigkeit ist neben Arbeitsfähigkeit und verfügbarer Materie die dritte begrenzte Ressource. Gestaltungsfähigkeit läßt sich jedoch nicht verbrauchen sondern kann im Gegenteil durch Wissenszuwachs noch vermehrt werden.

Die Gestaltungsfähigkeit ermöglicht es dem Menschen, die begrenzten Energie- und Materievorräte besser zu nutzen. Durch technische Maßnahmen können z. B. neue Energie- und Materiequellen erschlossen werden. Außerdem können lebensnotwendige Ordnungszustände mit weniger Energie- und Materieaufwand geschaffen werden, indem Wirkungsgrade von Anlagen verbessert werden (Maßnahmen zur rationellen Energie- und Stoffnutzung). Weiterhin kann die Stoffentwertung durch organisatorische Maßnahmen (Recycling) reduziert werden. Umweltschutzmaßnahmen helfen ebenfalls, die Belastungen zu reduzieren, indem die Dissipation von Abfallstoffströmen gegebenfalls durch Mehreinsatz an Arbeitsfähigkeit begrenzt wird.

Die Hauptsätze der Thermodynamik beschreiben einige wichtige Randbedingungen für die Erhaltung des menschlichen Lebens auf der Erde. Die wesentliche Aufgabe des Planers ist es, herauszufinden, wie die Interessen des Menschen mit diesen Naturgesetzen in Einklang gebracht werden können, ohne daß die Regenerations- und Assimilationsfähigkeit der natürlichen Stoffkreisläufe überschritten wird ("nachhaltige Nutzung"). Die verfügbaren Ressourcen sollten so gehandhabt werden, daß die Bedürfnisse zukünftiger Generationen nicht beeinträchtigt werden. Strategische energiepolitische Entscheidungen sind besonders deshalb von großer Tragweite, weil energietechnische Anlagen einerseits sehr teuer und andererseits sehr langlebig sind und gegebenenfalls die Umwelt stark belasten. Fehlentscheidungen können zu erheblicher Ressourcenverschwendung führen. Der Planung kommt daher die wesentliche Aufgabe zu, mögliche zukünftige Energie-, Umwelt-, Wirtschafts- und Sozialsysteme gedanklich zu analysieren und zu bewerten. Hinzu kommt, daß die Energiewirtschaft als eine Komponente der volkswirtschaftlichen Infrastruktur vielen exogenen Einflußfaktoren ausgesetzt ist, deren Entwicklung unbekannt ist. Diese vielfältigen Wechselwirkungen erfordern eine integrierte, systemanalytische Betrachtungsweise, um unter den zahlreichen Entscheidungsmöglichkeiten diejenigen Lösungen zu identifizieren, die die vorhandenen knappen Ressourcen Arbeitsfähigkeit (Energievorräte), verfügbare Materie (Rohstoffe), Gestaltungsfähigkeit (Kapital, Arbeitskraft) und Umwelt am effizientesten nutzen.

3.2 Das Konzept der strukturierten Energie- und Umweltplanung

3.2.1 Der systemanalytische Ansatz zur Planung von Energiesystemen

Ein *Energiesystem* umfaßt die zur Erzeugung von Energieträgern und zur Erbringung von Energiedienstleistungen dienenden technischen und ökonomischen Ausstattungen einer geographischen Region, eines Wirtschaftssektors oder eines einzelnen Unternehmens. Es beinhaltet die Gewinnung von Primärenergieträgern, die Umwandlungen im Brennstoffkreislauf, die Speicherung, den Transport und den Handel mit Energieträgern, die Verflechtungen der Wirtschaftssektoren, sowie die Umwelt als Ressource für Rohstoffe und als Auffangbecken von Schadstoffdepositionen. Energiesysteme sind technisch-ökonomische Systeme. Synonyme sind die Begriffe "Energiesektor" oder "Energiewirtschaft". Unter einem *System* allgemein wird hier eine *abgegrenzte Menge* von *Elementen* verstanden, die durch gegenseitige *Relationen* miteinander verknüpft sind. Diese Beziehungen legen die *Struktur* des Systems fest. Die Gesamtheit aller anderen Systeme, die mit diesem System in Wechselwirkung stehen, wird als *Umwelt* des Systems bezeichnet. Solche Wechselwirkungen mit der Umwelt sind der Austausch von Materie, Energie oder Information. Ein System kann bei Bedarf in *Subsysteme* unterteilt werden, wobei sich die Aufgliederung an der Autonomie der Teilbereiche orientiert.

Planung ist die gedankliche Erfassung eines zu gestaltenden Systems. Sie beschreibt und analysiert die Gesamtheit aller materiellen Objekte (Objektssystem) und ideeller Vorstellungen (Wertesystem). Innerhalb der festgelegten Systemgrenzen werden alle systembestimmenden Elemente zusammen mit ihren Eigenschaften und wechselseitigen Beziehungen erfaßt. "Planung ist eine der elementarsten Leistungen des menschlichen Geistes. Planung gibt Perspektiven, durchdringt und entwirft Zukunft. Sie gibt der Gegenwart zeitliche Tiefe. Planung kann ad hoc und unbedacht sein, sie kann aber auch bis an die Grenzen gehen, die menschlichem Denkvermögen gesetzt sind. Immer jedoch ist sie unvollständig, nur Ausschnitte können erfaßt und in die Zukunft projeziert werden. Zu den Grundfragen der Planung gehört die Erfassung des zu planenden Gegenstandes und der dazugehörigen Wertvorstellungen sowie die Gestaltung des Prozesses, der die Erfassung bewerkstelligt. Grundfragen der Planung sind Fragen nach der Rationalität menschlichen Handelns" /7/.

Der systemanalytische Ansatz zur Planung von Energiesystemen wird insbesonders für solche Fragestellungen angewendet, die eine ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems erfordern. Um das zukünftige Energiesystem wirtschaftlich, umweltfreundlich und sozialverträglich zu gestalten, erfaßt die Planung dabei die Wechselwirkungen zwischen Energiesystem und Wirtschaft, zwischen Energiebedarf und -versorgung, zwischen Energiesystem und Umwelt und berücksichtigt regionale Aspekte. Die Auswirkungen geplanter Strategien auf die volkswirtschaftlichen Ziele (Wirtschaftswachstum, Vollbeschäftigung, Preisstabilität, ausgeglichene Zahlungsbilanz und Umweltschutz) müssen quantifiziert werden, um erwünschte und unerwünschte Nebeneffekte erkennen zu können. Ziel der Planung ist es, die attraktivsten Strategien zu identifizieren, die die volkswirtschaftlichen Rahmenbedingungen erfüllen und

dabei die verfügbaren volkswirtschaftlichen Ressourcen so rationell wie möglich nutzen.

Die Energie- und Umweltplanung untersucht die Strukturen und das dynamische Verhalten von Energiesystemen, zeigt Grenzsituationen auf und erforscht Steuermöglichkeiten. Durch einen systematischen Vergleich der energiepolitischen Strategien ermöglicht es die Planung, schon heute bessere Entscheidungen für morgen treffen zu können, obwohl die Zukunft unbekannt ist. Planung liefert eine Entscheidungsgrundlage für eine rationale Energie- und Umweltpolitik und ist daher nicht mit Planwirtschaft gleichzusetzen, wie der Begriff es nahelegt. Statt die Entwicklung des Energiesektors verbindlich festzulegen, verfolgt Planung das Ziel, die Rahmenbedingungen einer markt- und wettbewerbsorientierten Energiewirtschaft bewußter zu gestalten. Planung ist zukunftsbezogen und entscheidungsorientiert. Um zielführend zu sein muß sie für die Entscheidungsträger transparent und nachvollziehbar sein. "The aim of systems analysis is to acquire deep understanding of the problems and to use it to help bring about improvements". "The analyst must be guided substantially by the knowledge of his craft" /8/. "Systems analysis is concerned with theorizing, choosing and acting. Hence, its character is threefold: descriptive (scientific), prescriptive (advisory), and persuasive (argumentative-interactive)". "Reliance on detailed procedures greatly increases the costs of decision-making, but it is also an unavoidable consequence of the cognitive and social complexity of today’s problems" /9/.

3.2.2 Akteure und Instrumente

Die Akteure, die das Energiesystem beeinflussen, sind der Staat mit seinen Ministerien, die staatlichen Planungsstellen, die Versorgungsunternehmen, die Investoren, die Industrie als Anlagenhersteller, die Eigenerzeuger von Energie, die Geldgeber (Banken, Geberinstitutionen, Entwicklungshilfeorganisationen) sowie die Verbraucher. Jeder dieser Akteure hat unterschiedliche Möglichkeiten, verändernd in das System einzugreifen. Der Staat kann technische Maßnahmen und Verhaltensänderungen nur indirekt über steuerliche, ordnungsrechtliche oder ausgabenpolitische Instrumente beeinflussen /10/, z. B. durch

- fiskalpolitische Instrumente: Emissionssteuern und Umweltabgaben proportional zur Umweltbelastung (CO_2-Steuer), Produktsteuern (Energiesteuer, Mineralölsteuer),
- ordnungsrechtliche Ge- und Verbote: Emissionsstandards, Prozeßnormen, Produktqualitätsnormen, Imissionsstandards, Rationierung, Verbote,
- ausgabenpolitische Instrumente: Subventionierung umweltpolitischer Maßnahmen, Förderung umweltfreundlicher Technologien, Forschungsförderung, Investitionssteuerung, Aufklärung und Öffentlichkeitsarbeit,
- Privatisierung von öffentlichen Gütern, Reglementierung des Handels, rechtliche Zulassung der Marktteilnehmer z. B. mit einer Umweltbörse für Emissionsrechte,
- freiwillige, rechtsgrundlagenfreie Kooperationslösungen.

In der BRD setzt der **Staat** verschiedene ordnungspolitische Instrumente zur Sicherung der Energieversorgung und zur Verbesserung der Umweltqualität ein. Das Bundesimmissions-

schutzgesetz ist Grundlage mehrerer Umweltstandards für energietechnische Anlagen (Großfeuerungs- und Kleinfeuerungsanlagenverordnung, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft). Im Verkehrsbereich existieren Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge sowie eine Kfz- und Mineralölsteuer. Die vertragliche Sicherung der heimischen Steinkohleförderung zur Stromerzeugung ("Jahrhundertvertrag") soll die Arbeitsplätze im Kohlebergbau sichern und die Abhängigkeit von ausländischen Energieimporten reduzieren. Die Preisbildung halbstaatlicher Monopole im Bereich der Gas- und Stromversorgung wird von staatlichen Aufsichtsbehörden überwacht. Forschungsprogramme und Subventionen fördern neue Technologien zur Nutzung regenerativer Energiequellen. Spezielle Budgets werden für die Finanzierung von Energieberatungsaktivitäten und von Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung bereitgestellt. Ganz aktuell wird heute im Rahmen der CO_2-Problematik über die Einführung von handelbaren Emissionsrechten oder einer allgemeinen Energie- oder CO_2-Steuer nachgedacht.

Vorrangige Aufgabe der **Versorgungsunternehmen** ist es, Energie zuverlässig und kostengünstig bereitzustellen. Deshalb beschränken sich viele Versorgungsunternehmen ausschließlich auf die Angebotsplanung ihrer leitungsgebundenen Produkte (Strom, Fernwärme, Gas). Die Einsatzplanung optimiert den Einsatz der Betriebsmittel, während die Ausbauplanung eine kostengünstige Erweiterung des Kraftwerkparks sicherstellt. Die Angebotsplanung wird heute zunehmend durch neue Konzepte des Demand Side Management (DSM) und der integrierten Ressourcenplanung (IRP) ergänzt, die die produzierte Dienstleistung in den Mittelpunkt der Planung stellt. Dabei werden auch solche nichttechnische Maßnahmen untersucht, die eine Verhaltensveränderung der Verbraucher zum Ziel haben.

Energieversorgungsunternehmen und Eigenerzeuger entscheiden wesentlich mit, in welche Technologien für Umwandlungs- und Verteilungssysteme investiert wird.

Die **Anlagenhersteller** arbeiten an der technischen und ökonomischen Optimierung einzelner Umwandlungstechnologien, um z. B. die energetischen Wirkungsgrade zu verbessern oder die Herstellung zu optimieren.

Die **Investoren** dagegen steuern den Einsatz des zur Verfügung stehenden Kapitals während **Geldgeber** Strategien zur Minimierung der Finanzierungskosten bestimmen.

Der **Verbraucher** entscheidet über die Nutzung der zur Verfügung stehenden Energieträger und beeinflußt durch seine Investitionsentscheidungen, welche Endbenutzertechnologien eingesetzt werden. Im volkswirtschaftlichen Sinn maximiert er seinen individuellen Nutzen, indem er so entscheidet, daß die von ihm nachgefragten Energiedienstleistungen am kostengünstigsten und bequemsten bereitstellt werden. Da er letztendlich auch von den Umweltauswirkungen des Energiesystems betroffen ist, berücksichtigt er neben den Kosten der Energieversorgung zunehmend auch den "Nutzen" einer unversehrten Umwelt. Viele Bürgerinitiativen und Interessensverbände vertreten deshalb heute gegenüber den anderen Akteuren den Wunsch der Verbraucher, eine lebenswerte Umwelt zu erhalten.

3.2.3 Der Prozeß der Entscheidungsfindung

Der Entscheidungsfindungsprozeß läßt sich in fünf Stufen unterteilen /11/. Die erste Stufe ist die Erkennung eines entscheidungsbedürftigen Problems, was in der Regel zu einer Entscheidungsanregung führt. In der zweiten Stufe folgt die Analyse des Entscheidungsproblems und daraus resultierend die Fixierung der Entscheidungsaufgabe. Die dritte Stufe konzentriert sich auf die informatorische Fundierung der Entscheidungsaufgabe und hat zum Ziel, die verschiedenen Handlungsalternativen zu vergleichen, um belastbare Bewertungen zu ermöglichen. Die vierte Stufe bewertet die Zielwirksamkeit der zulässigen Alternativen. In der fünften Stufe wird dann die Entscheidung getroffen. Der Prozeß der Entscheidungsfindung soll hier kurz erläutert, und die Aufgaben des Energie- und Umweltplaners in den verschiedenen Stufen des Entscheidungsprozesses anhand einiger Aspekte der schon in der Einleitung erwähnten Problematik des Treibhauseffektes verdeutlicht werden.

Die erste Stufe des Entscheidungsprozesses ist mit dem Erkennen der Treibhausproblematik eingeleitet. Diese Erkenntnis führt zur Stufe 2, der Fixierung der Entscheidungsaufgabe. Hierzu werden in der Regel Planer (Experten, Wissenschaftler) eingeschaltet, deren erste Aufgabe es ist, das Problem einzugrenzen, um sodann festzustellen, welche Maßnahmen und Strategien überhaupt zur Verfügung stehen. Ein wichtiger Schritt ist es, mit den beteiligten Interessengruppen einen Konsens bei der Zielsetzung zu erarbeiten und verbindliche, von allen akzeptierte Zielindikatoren festzulegen. Die vorherrschenden gesellschaftspolitischen Zielsetzungen bilden dazu den Rahmen, wobei für Energiesysteme die wichtigsten Ziele Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Sozialverträglichkeit und Umweltverträglichkeit sind.

Wie schwierig diese Aufgabe sein kann, läßt sich am Beispiel des Treibhauseffekts verdeutlichen, wo unterschiedliche Präferenzen der beteiligten Interessengruppen die Festlegung von Indikatoren für die Zielerreichung verhinderten. Eine allgemeine Einigung 1988 in Toronto darüber, die weltweiten CO_2-Emissionen um 50% bis zum Jahr 2050 zu reduzieren, wurde relativ einfach erreicht. Schwierig wurde es, als es darum ging, die Reduktionsziele für einzelne Länder festzulegen. Die folgende Diskussion darüber, wie die Lasten der Emissionsminderung gerecht und kosteneffizient verteilt werden sollen, hat bis heute noch zu keinem Ergebnis geführt. Insbesonders die Festlegung eines Indikators für die Zielerreichung erweist sich als sehr problematisch. Nimmt man die gesamten CO_2-Emissionen eines Landes als Indikator, werden Länder mit bereits niedrigen CO_2-Emissionen benachteiligt, da ihre bisher durchgeführten Maßnahmen nicht belohnt würden. Solch eine Pauschalregelung würde auch die globalen Gesamtkosten unnötig in die Höhe treiben, denn in Ländern mit höheren CO_2-Emissionen sind weit größere Reduktionen mit den gleichen spezifischen Minderungskosten erreichbar als in Ländern mit niedrigen Emissionen. Nimmt man die Pro-Kopf-CO_2-Emissionen als Indikator, wären die Entwicklungsländer benachteiligt, da sie heute pro Kopf viel geringere Treibhausgasemissionen als die Industrieländer haben. Während in den meisten Industrieländern versucht wird, den fossilen Energieverbrauch wirksam zu senken, um zu einer spürbaren Reduktion der CO_2-Emissionen zu kommen, erscheint dieses den Entwick-

lungsländern inakzeptabel. Hier ist, bedingt durch die Bemühungen, die Industrialisierung voranzutreiben und den Lebensstandard zu verbessern, eher mit einem steigenden Energieverbrauch zu rechnen, der dann wahrscheinlich durch fossile Energieträger gedeckt werden muß.

Die zentrale Aufgabenstellung bei der informatorischen Fundierung (Stufe 3) ist es, die alternativen Entscheidungsmöglichkeiten systematisch miteinander zu vergleichen, um die erfolgversprechendsten herauszufinden. Der Vergleich muß im Kontext des Gesamtsystems stattfinden und soll für die Entscheidungsträger und die betroffenen Interessengruppen transparent und nachvollziehbar sein. Um eine konsistente Beschreibung des untersuchten Systems zu erreichen und die zur Verfügung stehenden Fakten möglichst vollständig und neutral in einen Systemzusammenhang stellen zu können, wird der Planer in der Regel die Technik der Modellierung einsetzen. Zur Analyse des Treibhauseffekts kommen dabei globale und nationale Energiesystemmodelle sowie Modelle der Erdatmosphäre zum Einsatz.

Um die Zielwirksamkeit der analysierten Entscheidungsmöglichkeiten realistisch beurteilen zu können (Stufe 4), stellt sich die Frage nach dem Wertesystem, d. h. nach der Festlegung der Bewertungskriterien und ihrer Gewichtung. Als Indikator für die Wirtschaftlichkeit können z. B. die Gesamtkosten des Energiesystems oder die spezifischen CO_2-Minderungskosten herangezogen werden. Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit können der Verbrauch von Energie und Ressourcen oder die verursachten Emissionen verwendet werden. Sozialverträglichkeit kann durch eine Risikobewertung für die Gefährdung des menschlichen Lebens und die seiner Gesundheit ausgedrückt werden. Hinzu kommen Indikatoren für Nebenwirkungen, wie z. B. Beschäftigungseffekte oder Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit. Besonders schwierig ist es, Indikatoren für nicht-objektivierbare Kriterien festzulegen, wie z. B. die "gesellschaftliche Akzeptanz". Die öffentliche Meinung, die hier der Gradmesser für eine Bewertung wäre, läßt sich nur schwer bestimmen und unterliegt schnellen und unwägbaren Veränderungen. Da sie aber die Prioritäten und Zeitkonstanten für den Entscheidungsprozeß maßgeblich beeinflußt, wird sie in der Regel zumindest qualitativ berücksichtigt.

Bei der Beurteilung einzelner Maßnahmen können Zielkonflikte entstehen. Ein Zielkonflikt liegt z. B. vor, wenn verschiedene Indikatoren widersprüchliche Bewertungen liefern, wenn also eine kostengünstige Lösung nicht umweltfreundlich ist oder die Versorgungssicherheit gefährdet. In diesem Fall stellt sich die Frage, ob Umweltfreundlichkeit, Versorgungssicherheit oder Wirtschaftlichkeit das wichtigere Bewertungskriterium ist. Daher ist es für den Entscheidungsprozeß außerordentlich wichtig, daß alle daran Beteiligten offen legen, welches Gewicht sie den einzelnen Kriterien zukommen lassen. Diese Gewichtung ist notgedrungen zielgruppenspezifisch. So werden z. B. bei der Bewertung von Atomkraftwerken die Kriterien Kosten und Sicherheit ("Restrisiko") von Energieversorgungsunternehmen ganz sicher anders gewichtet als von ökologischen Aktionsgemeinschaften. Die Aufgabe des Energieplaners besteht daher auch darin, neben den Kriterien auch ihre Gewichtung herauszuarbeiten.

Auf der fünften Stufe vermittelt der Planer den Entscheidungsträgern die Ergebnisse des Systemvergleichs und führt sie zu einer Entscheidung. Im Falle eines Zielkonfliktes ist es seine primäre Aufgabe, diese Widersprüche durch Kompromisse so auszugleichen, daß kein Einzelziel außer acht gelassen wird. Dabei kommt es sehr darauf an, die Präferenzen der einzelnen Beteiligten so zu aggregieren, daß die Gruppe insgesamt zu einer gemeinsamen Beurteilung gelangen kann. Dieser interaktive Verhandlungsprozeß dient in erster Linie dazu, die Wertesysteme der einzelnen Beteiligten offen zu legen. Der Planer spielt dabei nicht selten die Rolle eines Schlichters.

Am Planungs- und Entscheidungsprozeß sind vier Gruppen beteiligt: der Planer, die Entscheidungsträger, die verschiedenen Interessenvertreter und die Betroffenen. Abb. 3-2 zeigt die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Akteuren, die in der institutionellen Organisationsstruktur eines Planungsprojekts berücksichtigt werden müssen /12/.

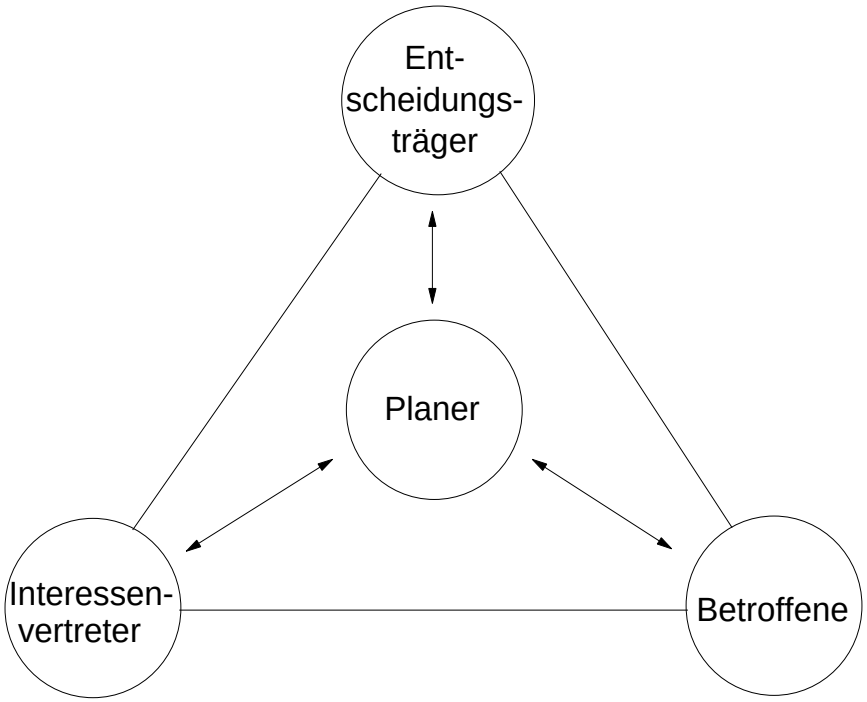


Abb. 3-2: Die Träger des Planungs- und Entscheidungsprozesses

Der *Planer* (oder das Planungsteam) ist für die strukturelle Gestaltung und den Fortgang der Planung verantwortlich. Er spielt die Rolle des neutralen Beraters, Experten oder Vermittlers und ist das Bindeglied für die Kommunikation zwischen den Akteuren. Er beschreibt die Probleme, entwickelt Vorschläge für Lösungsstrategien, modelliert das untersuchte Energiesystem, quantifiziert die Auswirkungen der alternativen Lösungstrategien, analysiert die Fakten anhand der verschiedenen Bewertungskriterien und trägt so zu einer verbesserten Transparenz der Argumente bei. Letztendlich gibt er eine Empfehlung ab, wobei sich spätestens dann die Frage nach der Neutralität des Planers stellt. "It is sometimes argued that an analyst should be completely neutral with respect to the findings of his work, and that persuasion - or even

presenting recommendations - is unethical. Experience does not support this view" /8/. "The question is not, whether analysts should use persuasion in proposing new policy ideas, but what forms of persuasion may be used effectively and without violating basic principles of proffesional ethics" /9/. "Most analyses should (conceptually) be done in two stages: a first stage to find out what one wants to recommend, and a second stage that generates the kind of information that makes the recommendations convincing even to a hostile and disbelieving, but intelligent audience" /13/. Die *Entscheidungsträger* liefern die zur Planung notwendigen Zielvorgaben, bewerten die Planungsergebnisse und treffen unter Berücksichtigung aller Interessen die Entscheidung. Die *Interessenvertreter* vertreten Gruppen, die bei der Gestaltung der Zukunft aktiv und verantwortlich mitwirken wollen, wie z. B. Wirtschaftsverbände, Gewerkschaften oder engagierte Bürger. Die Einbeziehung von Interessenvertretern erhöht die Glaubwürdigkeit der Analyse und steigert die Akzeptanz der Ergebnisse, Schlußfolgerungen und Entscheidungen. Die *Betroffenen* sind genaugenommen zwei Personengruppen. Die erste Gruppe setzt die Entscheidungen um und die zweite Gruppe wird letztendlich von dieser Umsetzung betroffen. Die Akzeptanz beider Gruppen für die getroffene Entscheidung ist nötig, um sie erfolgreich umzusetzen. Vetreter dieser drei Gruppen werden in der sogenannten *Referenzgruppe* zusammengefaßt, in der gemeinsam die Vorgaben für die Planung diskutiert und festlegt werden.

Zur Vorbereitung einer rationalen Entscheidung wird das Energiesystem mit seinen Objekten und Relationen beschrieben und die Alternativen im Rahmen der Wertesysteme der beteiligten Gruppen evaluiert. In der Entscheidungstheorie gibt es dazu verschiedene Ansätze. Die deskriptive Entscheidungstheorie beschreibt das Verhalten von Entscheidungsträgern, wobei bei Individualentscheidungen die psychologischen und bei Gruppenentscheidungen die gruppendynamischen und andere soziologischen Aspekte aufgedeckt werden. Die präskriptive Entscheidungstheorie schreibt ein Procedere vor, mit dessen Hilfe man zu einer Lösung gelangt. Dabei wird nicht - wie in der normativen Theorie - ein Entscheidungsmodell mit seinem Objekt- und Wertesystem vorgegeben, sondern das Entscheidungsproblem entwickelt sich erst in einem evolutorischen Prozeß durch die Erforschung und Modellierung des Objekt- und Wertesystems. Dabei sollten die Planer und Entscheidungsträger das psychologische Entscheidungsverhalten der Betroffenen berücksichtigen /7/.

Was bedeutet Rationalität im Entscheidungs- und Planungsprozeß? Rationalität liegt vor, wenn der Entscheidungsträger im Einvernehmen mit dem Planer die ihm durch den Entscheidungsprozeß gegebenen Möglichkeiten ausgeschöpft hat, d. h., wenn er ein Zufriedenheitsniveau erreicht hat, das ihm in Anbetracht der verfügbaren Ressourcen nicht mehr verbesserungsfähig erscheint /7/. Die Arbeit des Planers ist somit handlungsorientiert und wird von der Idee der Planung und der Führung geleitet. Der Planungsprozeß ist eine iterative Abfolge einzelner Phasen, die vom Planer strukturiert und gesteuert wird. Dabei wird vom Planer Fairness und Aufrichtigkeit erwartet, da er den Entscheidungsträger durch den Entscheidungsprozeß lenkt und ihn "zu seinem Wohl" gewisser Entscheidungsfreiheiten beraubt. Im nächsten Kapitel werden die Phasen des strukturierten Planungsprozesses vorgestellt.

3.3 Die Phasen des strukturierten Planungsprozesses

Zur Durchführung einer systematischen Zukunftsanalyse werden die fünf Stufen der Entscheidungsfindung in zehn Planungsphasen strukturiert, die in Abb. 3-3 dargestellt sind und in den folgenden Kapiteln erläutert werden (siehe auch das Konzept der "Structured Analysis Procedure (SAP)" in /14/). Die strukturierte Planung beginnt mit der Identifizierung, Strukturierung und möglichst quantitativen Formulierung der Probleme basierend auf einer Analyse des Ist-Zustandes, gefolgt von der Festlegung der Ziele und der Bewertungskriterien. Der Gegenstand der Planung wird durch eine Beschreibung des Energiesystems und der Systemgrenzen festgelegt. Die Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Rahmenbedingungen des Energiesystems werden als Szenarien formuliert. Dann wird eine Liste der Maßnahmen und Strategien angelegt, die durch die Planung untersucht und bewertet werden sollen. Damit ist die Entscheidungsaufgabe fixiert. Für die informatorische Fundierung werden nun geeignete Analysemethoden und ein zweckmäßiges Planungsinstrument zur Modellierung des Energiesystems ausgewählt. Der Aufbau der Informationsbasis über den Ist-Zustand und die historische Entwicklung von Energiebedarf, -versorgung und Umwelt bildet die Grundlage für die Modellierung, in der die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen quantifiziert werden. Die daraus resultierenden Modellergebnisse liefern die Basis für die Zielwirksamkeitsanalyse der untersuchten Handlungsalternativen. Dabei unterstützt ein einheitliches Bewertungsschema den Entscheidungsträger bei der Konsensfindung und macht die Entscheidung transparent und nachvollziehbar. Die auf die Entscheidung folgende Umsetzungsphase muß von einer regelmäßigen Erfolgskontrolle begleitet werden, um Fehlentwicklungen frühzeitig erkennen zu

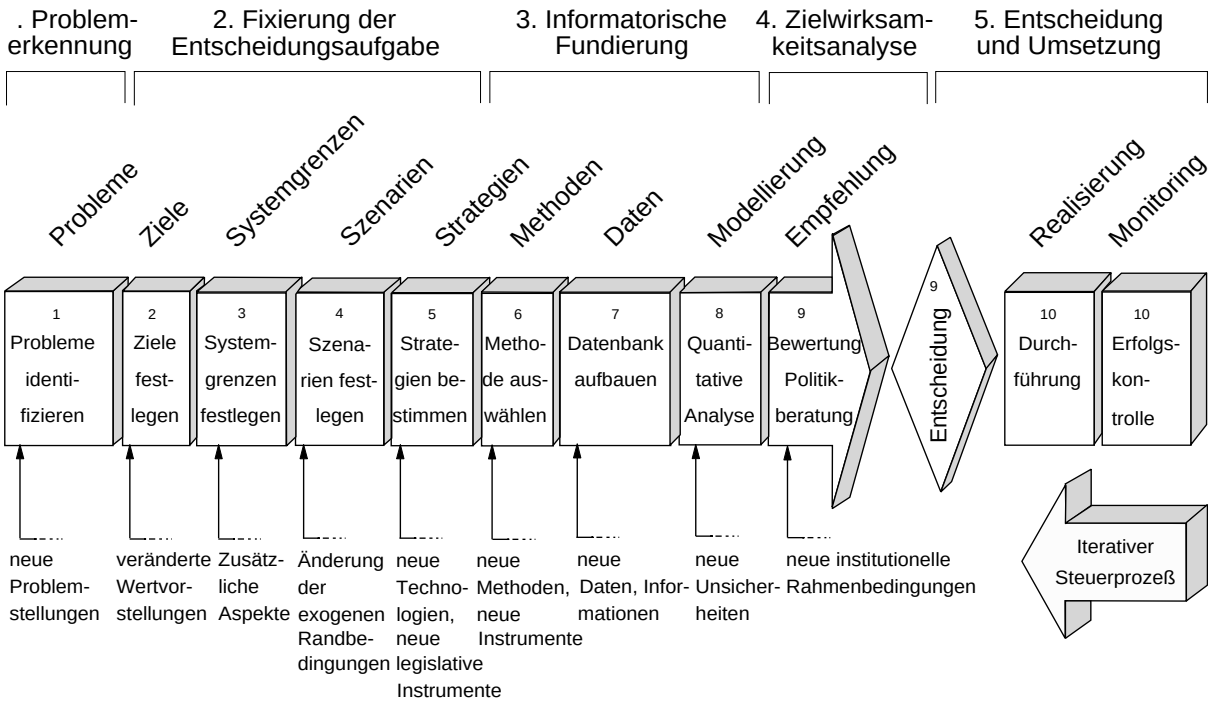


Abb. 3-3: Die Phasen der strukturierten Energie- und Umweltplanung

können und schnelle Reaktionen auf sich verändernde Rahmenbedingungen zu ermöglichen.

Die Phasen der Planung bilden einen iterativen Prozeß, der nach der Entscheidung keineswegs abgeschlossen ist. Abb. 3-3 zeigt, welche Ereignisse den Planungszyklus in eine neue Iteration steuern. Die Planungsergebnisse müssen stets dann überprüft werden, wenn

- neue Problemstellungen auftauchen,
- gesellschaftliche Zielsetzungen sich verändern,
- zusätzliche Aspekte des Problems berücksichtigt werden sollen,
- sich wesentliche Randbedingungen ändern,
- neue Maßnahmen zur Verfügung stehen,
- neue Analysemethoden eingesetzt werden können,
- neue Daten die Entscheidungsgrundlage verändern,
- neue Unsicherheiten auftauchen, oder
- neue politische, soziale oder institutionelle Rahmenbedingungen gesetzt werden.

3.3.1 Problembeschreibung

Die Entwicklung zielgerichteter Lösungsstrategien erfordert eine genaue, möglichst auch quantitativ formulierte Beschreibung der Energie- und Umweltprobleme. Für die Erarbeitung und Strukturierung der Problemformulierung ist es sinnvoll, neben den Entscheidungsträgern auch die durch das Problem betroffenen Gruppen mit einzubeziehen. Die Problemanalyse wird oft dadurch erschwert, daß Beteiligte oder Verantwortliche eine intensive Diskussion als überflüssig ansehen, da die Probleme für sie "auf der Hand liegen". Oft wird die Diskussion auch als unangenehm empfunden, weil sensible Themen berührt werden. Die genaue Beschreibung der Problematik grenzt die Aufgabenstellung ein und sensibilisiert alle am Entscheidungsprozeß beteiligten Personen für Probleme und Lösungsmöglichkeiten.

3.3.2 Festlegung der Ziele

Die Festlegung der angestrebten Ziele bestimmt, in welcher Art und Weise die Probleme gelöst werden müssen. Ziele sollten präzise formuliert sein und von den zu untersuchenden Maßnahmen klar abgegrenzt werden. Bei der Ermittlung der Zielsetzungen kommt erschwerend hinzu, daß Ziele von vielfältigen politischen und wirtschaftlichen Interessenlagen abhängen. Um die Akzeptanz für die Planung zu erhöhen, müssen bei der Zielfestsetzung alle betroffenen Interessengruppen berücksichtigt werden, auch wenn die Ziele sehr unterschiedlich sind. Damit später die Qualität der Problemlösung bewertet und die Zielerreichung für alle Handlungsalternativen objektiv gemessen werden kann, müssen zusammen mit den Beteiligten quantifizierbare Bewertungskriterien (Zielindikatoren) für jedes einzelne Ziel festgelegt werden. Je sorgfältiger und klarer dabei die Probleme und Ziele zu Beginn einer Planungsstudie mit den Entscheidungsträgern abgestimmt werden, desto größer sind die Chancen, zielführende und für alle Beteiligten akzeptierbare Lösungen zu entwickeln.

3.3.3 Beschreibung des Energiesystems und der Rahmenbedingungen

Eine konsistente Beschreibung der Komponenten des Energiesystems ist die Voraussetzung für jede systemanalytische Planung. Für diese Beschreibung wird zunächst ein Blockdiagramm wie in Abb. 3-4 verwendet, das die Struktur der problemrelevanten Komponenten des Energiesystems aufzeigt /15/. In Abb. 3-5 wird das Blockdiagramm durch Hinzufügen der Energieströme und -umwandlungen zu einer hierarchischen Netzwerkdarstellung erweitert. Die Umweltschadstoffe der einzelnen Umwandlungstechnologien (wie z. B. CO_2, SO_2, NO_x) sind allerdings in Abb. 3-5 der Übersichtlichkeit wegen weggelassen. Das gezeigte Netzwerkdiagramm wird "Referenzenergiesystem (RES)" genannt und beschreibt alle technischen und wirtschaftlichen Komponenten, Güterflüsse und Umwandlungsprozesse, die in der Analyse berücksichtigt werden sollen. Das Konzept des RES als Modellbildungsschema für Energie- und Umweltsysteme wurde in den siebziger Jahren vom *MARKAL*-Entwicklungsteam in Brookhaven (USA) entwickelt /16//17//18//19/ und hat sich in vielen Anwendungsstudien bewährt. Mit dem Konzept des Referenzenergiesystems ist der Planer in der Lage, komplexe Systeme vollständig und eindeutig zu beschreiben. Das Energiesystem kann auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene mit dem gleichen Schema beschrieben werden, wobei lediglich die Auflösung der Systemdarstellung der Fragestellung angepaßt werden muß.

Das RES legt Struktur und Detaillierung des untersuchten Systems fest und ermöglicht es, Maßnahmen und Eingriffe in das System eindeutig zu lokalisieren. Optionen, die nicht im RES dargestellt sind, können in der Analyse allerdings nicht berücksichtigt werden. Mit dem RES werden automatisch die Systemgrenzen des Energiesystems festgelegt, innerhalb derer die Güterumsätze und der Ressourcenverzehr untersucht werden. Der Austausch über die Systemgrenzen hinweg wird durch die Bewertung von Im- und Exporten berücksichtigt. In Abb. 3-5 wird rechts der makroökonomische Teil des Energiessystems dargestellt. Dort werden die verschiedenen Sektoren der Volkswirtschaft und ihre Wechselwirkungen untereinander, sowie das Verbraucherverhalten abgebildet. Links davon werden die aufgrund der wirtschaftlichen Aktivitäten nachgefragten Dienstleistungen, sowie der Bedarf an Nutzenergie und Endenergie dargestellt. Hier können Maßnahmen zur rationellen Energieanwendung, Substitution von Endbenutzertechnologien, sowie die Auswirkungen von Steuern, Subventionen und legislativen Umweltschutzverordnungen analysiert werden. In der linken Hälfte des RES wird das Versorgungssystem dargestellt. Erkennbar sind hier die Subsysteme zur Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der Energieträger. In diesem Bereich können Substitutionsmöglichkeiten von Brennstoffen und von alternativen Umwandlungstechnologien untersucht werden. Für einzelne Subsysteme können hier zusätzlich optimale Ausbaupfade identifiziert oder Investitions- und Betriebsplanungen durchgeführt werden.

Die Rahmenbedingungen für die Modellierung werden durch die regionale Gliederung und den Zeithorizont der Analyse (Modellierungsperiode) festgelegt.

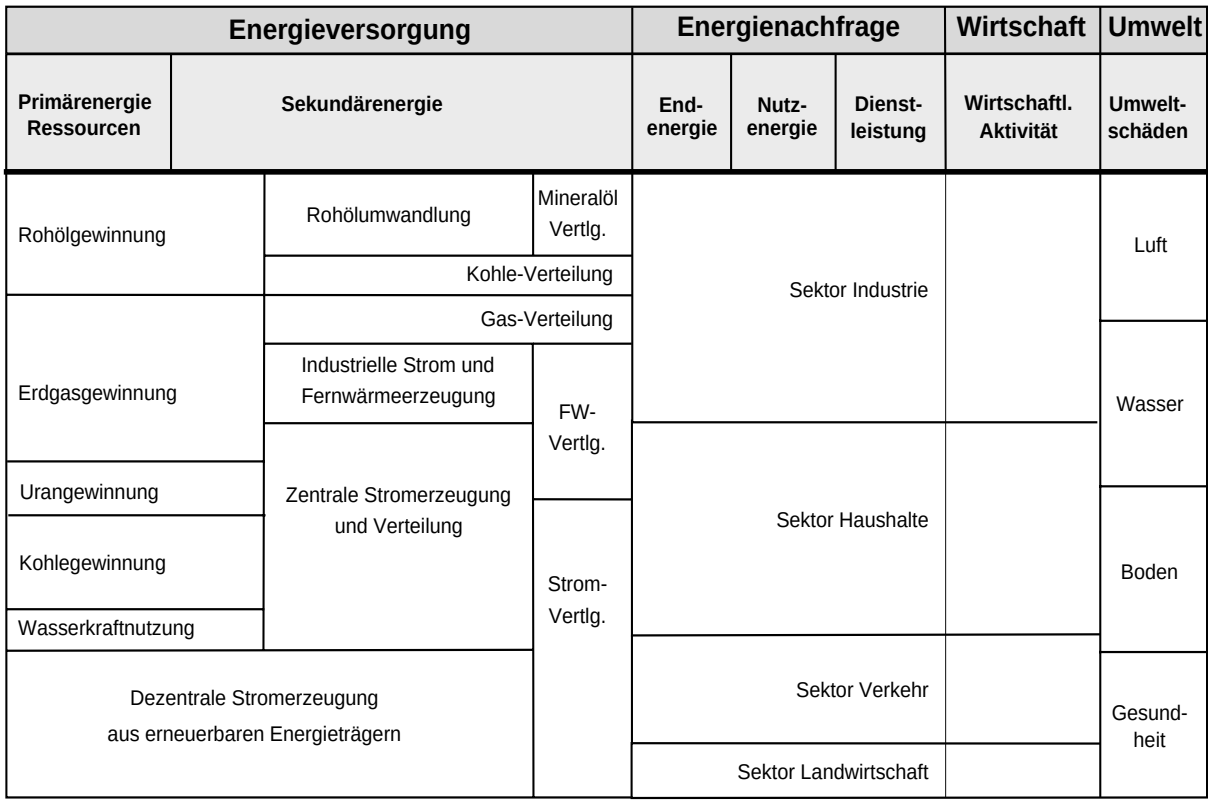


Abb. 3-4: Blockdiagrammdarstellung des Systems Energie-Wirtschaft-Umwelt

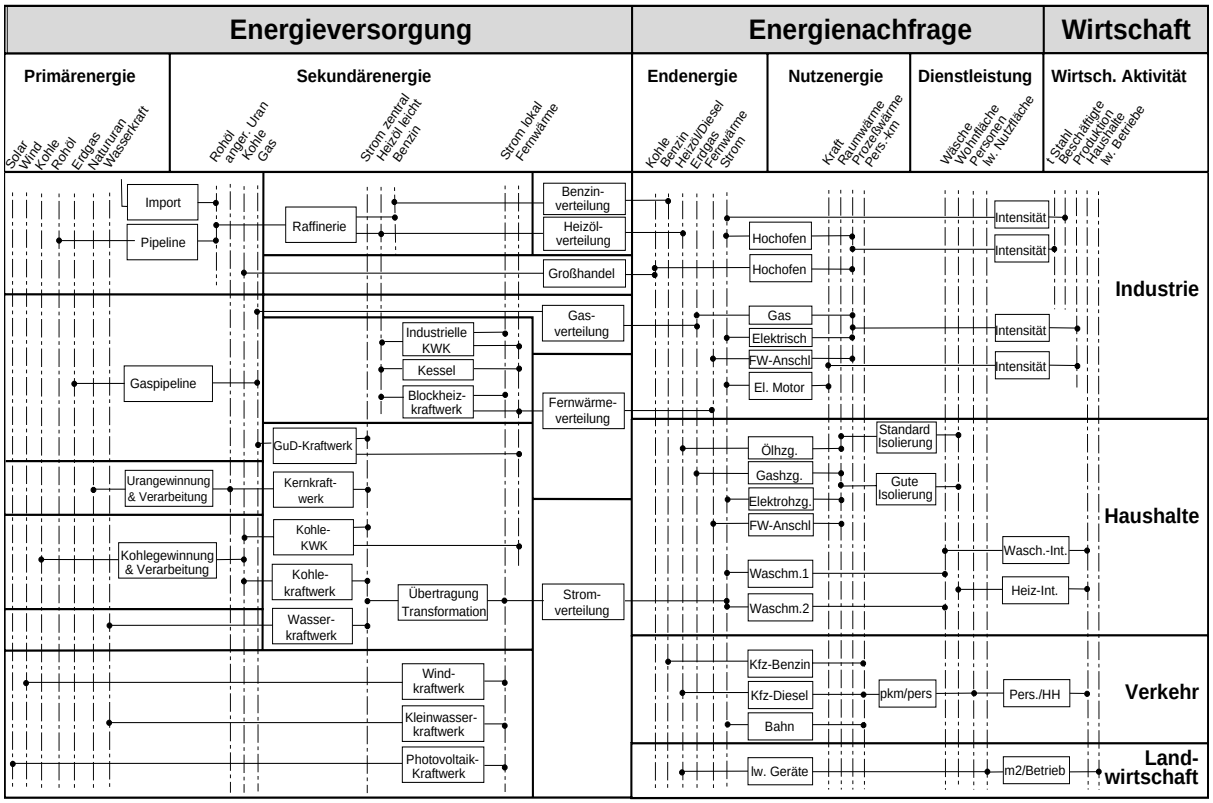


Abb. 3-5: Netzwerkdarstellung des Systems Energie-Wirtschaft (ohne Umwelt)

3.3.4 Festlegung der Szenarien

Ein Szenario beschreibt nach dem in dieser Arbeit definierten Sprachgebrauch die zukünftige Entwicklung derjenigen "exogenen" Größen des Energiesystems, die der Entscheidungsträger nicht beeinflussen kann, also die Rahmenannahmen. Da die zukünftige Entwicklung der exogenen Einflußgrößen unbekannt ist, wird ein Spektrum von Szenarien erstellt. Szenarien legen das Umfeld fest, in dem verschiedene Lösungsstrategien modelliert und beurteilt werden. Welche Einflußgrößen als exogen angesehen werden, hängt von der Fragestellung der Studie ab. In regionalen Untersuchungen ist die Entwicklung der Wirtschaft oder der Brennstoffpreise vom Entscheidungsträger nicht beeinflußbar. Bei nationalen Studien, die z. B. die Wechselwirkungen zwischen Energiepreisen und Wirtschaftsentwicklung oder zwischen Energiepreisen und Nachfrage untersuchen, ist dies sehr wohl der Fall.

3.3.5 Festlegung der zu untersuchenden Maßnahmen und Strategien

Eine Maßnahme ist ein gezielter Eingriff in das Energiesystem, um die in der Fallstudie gesteckten Zielsetzungen zu erreichen. Man unterscheidet zwischen technischen und nichttechnischen Maßnahmen. Technische Maßnahmen verändern die technische Struktur des Energiesystems und beeinflussen den Ressourcenverbrauch und die Systemkosten. Sie betreffen in der Regel einen Energieträger, einen Schadstoff oder eine Technologie. Nichttechnische Maßnahmen zielen auf eine Verhaltensänderung der Verbraucher und Produzenten, die durch eine Änderung der rechtlichen, sozialen oder ökonomischen Rahmenbedingungen herbeigeführt werden kann. Maßnahmen können zu energie- und umweltpolitischen Strategien gebündelt werden. Strategien sind "Entscheidungen über alternative Aktionskurse" /20/ zur Überwindung der untersuchten Probleme.

In der Praxis ist es nicht möglich, alle denkbaren Maßnahmen durch Modellrechnungen detailliert zu untersuchen. Die daher notwendige Auswahl ist zusammen mit den Mitgliedern der Referenzgruppe zu treffen. In Tabelle 3-2 sind Beurteilungskategorien zusammengefaßt, die die notwendige Vorauswahl unterstützen. Um wenig erfolgversprechende Maßnahmen auszugrenzen, wird überprüft, ob es institutionelle Barrieren oder Markthemmnisse gibt, die die Einführung der Maßnahme erschweren könnten. Durch eine Bestimmung der Akteure und Zielgruppen wird geprüft, ob der Entscheidungsträger überhaupt die erforderliche Verfügungsgewalt oder Kompetenz hat, die Maßnahmen umzusetzen. Weiterhin können Maßnahmen, deren Kosten und Nutzen sich nicht genau bestimmen lassen und die eine lange Amortisationszeit haben, zurückgestellt werden, da sich für solche Maßnahmen kaum Unterstützung finden läßt. Maßnahmen, die andere positive Nebeneffekte wie z. B. Beschäftigungseffekte besitzen, haben größere Chancen, politisch und finanziell unterstützt zu werden. Von Bedeutung ist auch, ob Maßnahmen populär oder prestigeträchtig sind oder einen hohen erzieherischen Wert haben. Solche Maßnahmen werden oft auch dann unterstützt, wenn sie nach anderen Kriterien nicht so attraktiv sind /21/.

Tabelle 3-2: Kategorien zur Beurteilung energiepolitischer Maßnahmen

- Angestrebtes Ziel
- Akteure und Zielgruppe
- Kompetenzen und Verfügungsgewalt der Akteure
- Energie- und Umwelteffekte, bzw. Nutzen:
  - Energieeinsparungspotential
  - Minderungspotential von Umweltschäden
  - andere positive Nebeneffekte (Arbeitsplätze, erzieherischer Wert)
- Zeitraum der Implementierung
- Direkte und organisatorische Kosten, Amortisationszeit, Nutzen
- Instrumente zur Einführung der Maßnahme
- Barrieren und Hemmnisse
- Unterstützende Aktivitäten

3.3.6 Auswahl der Methode für die Modellierung

Ziel dieser Phase ist es, ein Planungsinstrument mit einer für die multidisziplinäre Analyse geeigneten mathematischen Methode auszuwählen. Das Instrument soll es ermöglichen, die Auswirkungen energiepolitischer Strategien auf Energiesystem, Wirtschaft und Umwelt in einem vernünftigen Zeitrahmen zu berechnen. Planungsinstrumente sind für bestimmte Fragestellungen spezialisiert. Sie unterscheiden sich in der Aggregation des modellierten Energiessystems, sowie in der zeitlichen und räumlichen Auflösung. Auch gibt es Instrumente für unterschiedliche Fragestellungen, von der Investitionsberechnung von Einzelprojekten bis hin zur Analyse von ganzen Energiesystemen.

Deshalb bestimmen Fragestellung und Zielsetzung sowie die Verfügbarkeit der Daten darüber, welches Instrument und damit welche Methode am besten für die Analyse geeignet ist. Z. B. ist die Methode der *Optimierung* besonders geeignet, "least cost" Strategien zu identifizieren, die das Systemverhalten bei vorgegebenen Randbedingungen analysieren, um z. B. den kostenoptimalen Ausbau eines Versorgungssystems zu ermitteln. Dagegen lassen sich Energiebedarfsanalysen oder exploratorische Analysen vorgegebener Strategien einfacher mit der Methode der *Simulation* durchführen. Bei der Auswahl eines Instruments spielt nicht nur dessen Kompatibilität mit den Fragestellungen eine Rolle, sondern auch dessen Kompatibilität mit dem Zeit- und Kostenrahmen der Fallstudie. Da Planungsinstrumente unterschiedlich aufwendig im Preis, in den Anforderungen an Computer-Hardware und an die Kenntnisse der Anwender sind, beeinflußt nicht zuletzt die Verfügbarkeit von finanziellen Mitteln und wissenschaftlichem Personal die Auswahl.

3.3.7 Datenerhebung und Aufbau des Informationssystems

Ziel dieser Phase ist die Dokumentation der historischen Trends und der aktuellen Situation des augenblicklich existierenden Energie- und Umweltsystems sowie die Erstellung der Datengrundlage für die Modellierung des zukünftigen Energiesystems. Da Probleme, Ziele, Systembeschreibung sowie die zu untersuchenden Maßnahmen feststehen, kann die Datenerhebung sehr gezielt erfolgen. Alle relevanten technischen, wirtschaftlichen und sozioökonomischen Daten über das untersuchte System werden in einem Informationssystem zusammengeführt und verwaltet. Das Informationssystem bildet den Grundstock für die kontinuierliche Aktualisierung der Planung. Es sollte nicht auf die für die Modellierung notwendigen Daten beschränkt sein, sondern beliebige Informationen zu dem System verwalten können.

Eine unvollständige Datenlage ist kein Grund, die Modellierung aufzuschieben. Der iterative Ansatz der Planung ermöglicht die schrittweise Verfeinerung der Analyse. Fehlende Informationen werden zunächst abgeschätzt. Die ersten, noch ungenauen Ergebnisse der Modellierung grenzen die Bereiche ein, in denen abgeschätzte Informationen konsolidiert und vertieft werden müssen. Die dadurch erreichte Verbesserung der Datenbasis steigert wiederum die Zuverlässigkeit der Modellierungsergebnisse. Dieser wechselseitige Prozeß aus Verbesserung der Datenbasis und Präzisierung der Analyse erlaubt eine enge Verzahnung von Datenerhebung und Modellierung und eine gezielte Verbesserung der planerischen Aussagen.

An dieser Stelle des Planungszyklus sollte noch einmal geprüft werden, ob neue Probleme oder Erkenntnisse aufgetaucht sind, die in der Analyse berücksichtigt werden müssen.

3.3.8 Modellierung und systematische Zukunftsanalyse

Ziel dieser Phase ist es, die Auswirkungen der untersuchten Strategien systematisch zu quantifizieren und einen objektiven Vergleichsmaßstab für eine Bewertung zu schaffen. Dies geschieht mit Hilfe von Modellierungsrechnungen, die die Grenzen des technisch machbaren und zeitlich umsetzbaren aufzeigen und belastbare Aussagen über wirtschaftliche Aktivitäten, Energiebedarf, Energieversorgung, Umweltschäden, Ressourcen und Kosten ermöglichen.

Vergleichsmaßstab zur Bewertung einer Strategie ist der Referenzfall, der die am wahrscheinlichste Entwicklung des Energiesystems beschreibt. In diesem Fall wird angenommen, daß die Trends der Vergangenheit unverändert anhalten und keine gezielten Veränderungseingriffe in das System vorgenommen werden (daher wird er oft auch "Business As Usual" genannt). Da die Zukunft des Energiesystems unbekannt ist, lassen sich die Konsequenzen einer Entscheidung bzw. einer gewählten Strategie nie exakt, sondern immer nur in gewissen Bandbreiten quantifizieren. Insbesonders muß untersucht werden, wie sich eine Veränderung der Rahmenbedingungen auf die Bewertung auswirkt. Diese systematische Zukunftsanalyse mit Hilfe der Szenariotechnik ermöglicht es, "robuste" Strategien zu identifizieren, die sich dadurch auszeichen, daß sie auch für veränderte Ausgangssituationen zu positiven Ergebnissen führen.

In der systematischen Zukunftsanalyse wird der Unsicherheitsbereich der zukünftigen Entwicklung in der Regel durch mehrere Szenarien aufgespannt, die gegenüber dem Referenzszenario z. B. eine optimistische und eine pessimistische Entwicklung der Rahmenbedingungen beschreiben. Um die Wirksamkeit einer Strategie für den gesamten Unsicherheitsbereich zu überprüfen, wird die Strategie mit den verschiedenen Szenarien zu "Fällen" kombiniert, die dann jeweils mit dem Planungsinstrument berechnet werden. Aus den Berechnungsergebnissen werden dann die Bewertungskriterien ermittelt. Der Effekt einer Strategie wird als Abweichung der Zielkriterien gegenüber dem Referenzszenario beschrieben. Bei mehreren Zielkriterien wird anhand der Gewichtungen eine Gesamtbewertung vorgenommen. Das Modelleigenverhalten wird durch systematische Parametervariationen, die Sensitivitätsanalyse, untersucht.

3.3.9 Entscheidung

Die Entscheidungsfindung beginnt mit der Bewertung der einzelnen möglichen Handlungsstrategien anhand der Analyseergebnisse, sowie einer Empfehlung. Dabei wird mit Hilfe verschiedener Szenarien aufgezeigt, wie sich Unsicherheiten in der zukünftigen Entwicklung der Rahmenbedingungen auf die Bewertung der Strategien auswirken. "Robuste" Strategien liefern gute Bewertungen für alle Szenarien. In der folgenden Diskussion berät der Planer den Entscheidungsträger bei der Suche nach einem tragfähigen Kompromiß im Konsens mit allen beteiligten Interessenvertretern. Oft muß er dabei zusätzliche Argumente zur Überzeugung der Beteiligten bereitstellen, denn "the psychological effect of purely rational argument may not be strong enough to overcome the inertia of long-established patterns of thinking - even after the need for change has become clear. Furthermore, the impact of rational arguments may operate too slow to bring about timely change" /9/. Der Entscheidungsträger bewertet die Ergebnisse der Analyse und der Diskussion und beschließt die auszuführenden Maßnahmen zur Lösung des Problems. Entscheidung und Realisierungskonzept der identifizierten Strategien werden in einem Aktionsplan dokumentiert. Geeignete Instrumente zur Initiierung der Maßnahmen sowie zur Erfolgskontrolle werden ebenfalls im Aktionsplan operationalisiert.

3.3.10 Durchführung und Erfolgskontrolle

Die Durchführung implementiert die Entscheidung, die Erfolgskontrolle überprüft die Wirkungen der Entscheidung. Sie umfaßt in erster Linie eine regelmäßige Aktualisierung des Informationssystems, anhand der sich die Tauglichkeit des Aktionsplans beurteilen läßt. Für den Fall, daß einzelne Maßnahmen nicht den gewünschten Erfolg bringen, sich Rahmenbedingungen unerwartet geändert haben oder neue Fragestellungen beantwortet werden müssen, sind die Modellberechnungen für ein verschobenes Zeitfenster zu wiederholen. Deuten sich bei dieser Wiederholung des Planungsprozesses gravierende Verschiebungen in der Bewertung der Einzelmaßnahmen an, muß der Aktionsplan an die neue Situation angepaßt werden.

3.4 Entscheidungsunterstützende Systeme

In diesem Kapitel wird der Begriff "Entscheidungsunterstützendes System" definiert, die Anforderungen an ein solches System beschrieben und seine Komponenten erläutert.

3.4.1 Definition des Begriffs "entscheidungsunterstützendes System"

Der Begriff Decision-Support-System (DSS), auf deutsch "entscheidungsunterstützendes System" wurde bereits 1971 definiert: "A DSS is a system to support managerial decision makers in unstructured or semistructured decision situations" /22/. Bis heute konnte sich keine einheitliche Definition des Begriffs durchsetzen. Die in der Literatur am weitesten verbreitete Definition ist: "Decision Support Systems (DSS) represent a point of view on the role of the computer in the management decisionmaking process. Decision support implies the use of computers to:

1. Assist managers in their decision process in semistructured tasks.
2. Support, rather than replace, managerial judgement.
3. Improve the effectiveness of decision making rather than its efficiency" /23/.

Decision-Support-Systeme (DSS) sind Softwaresysteme, die die Lösung komplexer Fragestellungen unterstützen, wenn der Problemlösungsprozeß sich nicht standardisieren oder automatisieren läßt. Fast jedes computerbasierte System von Datenbanken oder Informationssystemen bis hin zu komplexen mathematischen Modellen kann Entscheidungen unterstützen. Bei der Vielzahl der normativen und deskriptiven Modellierungsansätze in der Literatur zeichnet es sich jedoch ab, daß eine interaktive Einbeziehung des Planers als Benutzer des DSS immer wichtiger wird, um die vielfältigen Rückkopplungen, die sich aus Kommunikation und Verhandlungen zwischen den Beteiligten ergeben, in der strategischen Analyse berücksichtigen zu können. Eindimensionale Planungssysteme, die aus der Problemdefinition heraus Lösungen ableiten, können diesem iterativen Prozeß der stufenweisen Lösungsannäherung nicht gerecht werden. Diese Systeme führen die Analyse zwar effizient durch, sind aber oft nicht wirkungsvoll (effective), d. h. sie liefern nicht unbedingt zielführende Problemlösungen. Ein computergetütztes DSS ist dabei nicht nur ein Werkzeug für die Analyse sondern dient auch der verbesserten Kommunikation, erleichtert das Lernen und fördert das Experimentieren.

Diese Charakterisierung von entscheidungsunterstützenden Systemen hat sich im Lauf der Zeit nicht geändert, wie folgende Zitate zeigen: "A DSS is a model-based set of procedures for processing data and judgements to assist a manager in his decision making. It must be simple, robust, easy to control, adaptive, complete on important issues, and easy to communicate with", 1970 /24/. "A DSS is an extensible System, capable of supporting ad hoc data analysis and decision modelling, oriented towards future planning, and used at irregular, unplanned intervals", 1980 /25/. "A DSS is a computer-based information system used to support decision making activities in situations where it is not possible or not desirable to

have an automated system perform the entire decision process", 1982 /26/. "Ein entscheidungsunterstützendes System ist ein interaktives, EDV-gestütztes System, welches Dialoghilfen, Datenbanken und (meist mathematische) Methoden einsetzt und den Entscheidungsträger auf allen Stufen des Entscheidungsprozesses miteinbezieht", 1990 /11/. "DSS analysieren und unterstützen Entscheidungen durch eine formale Analyse der Handlungsalternativen, ihrem Abschneiden in Bezug auf Bewertungskriterien, Ziele und Rahmenbedingungen. Die entscheidungsunterstützenden Fähigkeiten (Funktionen) von DSS reichen von der einfachen Verwaltung und graphischen Darstellung von Informationen über Extrapolation, Informationsfilter und Mustererkennung, logische und regelbasierte Vergleiche bis hin zu komplexer Modellierung", 1990 /27/. Weitere Zitate finden sich in /28/, /29/, /30/ und /31/.

Allgemein werden drei in Tabelle 3-3 wiedergegebene Klassen von Entscheidungen unterschieden /21//22/: wohlstrukturierte, teilstrukturierte und schlechtstrukturierte Entscheidungen. Wohlstrukturierte Entscheidungen sind leicht verständlich und lassen sich automatisieren. Sie tauchen häufig bis regelmäßig als Entscheidungsproblem auf und fallen in den

Tabelle 3-3: Klassifizierung von Entscheidungsproblemen

Entscheidungsproblem	Aufgabenstellung	Häufigkeit	Unterstützungssystem
Schlechtstrukturiert	Krisenmanagement	selten, einmalig	Expertensystem (XPS)
Teilstrukturiert	Strategische Planung	unregelmäßig	Decision Support System (DSS)
Wohlstrukturiert	Taktisch-operative Planung	regelmäßig	Operational Information System (OIS)

Bereich der taktisch-operativen Planung. Im Vordergrund der Entscheidungsunterstützung steht die systematische Informationsbeschaffung und -verwaltung. Hier kommen Operational-Informations-Systeme (OIS) oder auch Management-Informations-Systeme (MIS) zum Einsatz, die den Entscheidungsträger mit operativen Informationen versorgen. Sie enthalten in der Regel "harte" (gemessene) Informationen über den aktuellen Stand des analysierten Systems und unterstützen ihn bei der Erfassung des Systemzustands und der Lenkung des Systems. Zum Einsatz kommen Datenbanksysteme, die Massendatenhaltung und schnellen Datenzugriff ermöglichen, gekoppelt mit Analysemodellen aus Statistik, Simulation und Optimierung. Anwendungsbeispiele sind Finanzbuchhaltung, Lagerverwaltung, Einsatzplanung.

Je unstrukturierter die Aufgabenstellungen werden, desto intensiver muß der Mensch in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden. Teilstrukturierte Probleme lassen sich in eine wohlstrukturierte und in eine schlechtstrukturierte Komponente aufteilen. Letztere läßt sich nicht mit standardisierten Verfahren aus der Systemanalyse lösen, da es wegen Unsicherheiten und subjektiven Bewertungselementen keinen objektiven Weg gibt, die beste

Lösung zu finden. Statt dessen bietet sich ein iterativer Kommunikationsprozeß an. Computersysteme werden dabei hier nicht eingesetzt, um das menschliche Urteilsvermögen zu ersetzen, sondern helfen, den gut strukturierten Anteil des Problems besser zu analysieren und transparenter zu machen. Dies ist das Haupteinsatzgebiet von Decision-Support-Systemen (DSS). Sie verbinden die Leistungsfähigkeit des Computers bei der Lösung wohlstrukturierter Probleme mit der Fähigkeit des Menschen, schlechtstrukturierte Probleme zu bewältigen /32/. Beispiele hierfür sind strategische Planungsaufgaben wie die Umstellung von Produktionsanlagen oder der Ausbau von Energieversorgungssystemen.

Es gibt verschiedene Klassen von Decision-Support-Systemen, die den Schwerpunkt ihrer Unterstützung auf unterschiedliche Bereiche des Entscheidungsprozesses legen. Management-Support-Systeme (MSS) unterstützen Managementaufgaben auf höheren Führungsebenen. Sie unterscheiden sich von den Management-Informations-Systemen (MIS) durch eine auf die strategische Planung hin ausgerichtete Informationsverdichtung. Mathematical-Planning-Systeme (MPS) dienen zur Modellierung des Objektsystems - also der wohlstrukturierten Komponente. Sie stellen Suchalgorithmen zur Ermittlung optimaler Entscheidungen zur Verfügung. Dabei werden mathematische Verfahren wie Linear Programming, Queuing Theory oder Netzplantechnik eingesetzt. Multi-Criteria-Decision-Support-Systeme (MCDSS) bilden das multikriterielle Wertesystem des Entscheidungsträgers ab und unterstützen die Entscheidungsfindung bei Mehrzielproblemen. Group Decision Support Systems (GDSS) unterstützen den dynamischen Prozeß, wenn verschiedene Gruppen an der Entscheidungsfindung und am Planungsprozeß beteiligt sind. Diese DSS können auch kombiniert werden.

Schlechtstrukturierte Probleme müssen vor allem im Top-Management gelöst werden. Diese Probleme sind einmalig, nicht vorhersehbar und entsprechen z. B. einem Krisenmanagement. Sie müssen häufig intuitiv gelöst werden und enthalten viele qualitative Komponenten. Lösungsansätze für diese Probleme werden im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) mit den sogenannten Expertensystemen (XPS) entwickelt. Expertensysteme unterstützen schwierige, nicht quantitativ formulierbare Teile des Planungsprozesses. Während DSS sich darauf beschränken, den Benutzer in den kreativen Phasen des Planungsprozesses zu unterstützen und sein Wissen interaktiv und strukturiert einzubinden, stellen Expertensysteme zusätzlich qualitatives Wissen anderer Experten zur Verfügung. Man spricht daher auch von wissensbasierten DSS. Dieses Wissen wird in Form von Regeln in "Methodendatenbanken" abgelegt. Das Wissen enthält dabei Fakten und kausale Zusammenhänge und kann auch verbal vorliegen. Der Inferenzoperator (Inference Engine) übernimmt den Dialog mit dem Benutzer und wendet das Wissen auf ein konkret vorliegendes Problem an, um eine Lösung zu generieren.

In dieser Arbeit soll ein DSS entwickelt werden, das ein Informationssystem mit mathematischen Modellen verbindet und die multikriterielle Entscheidungsfindung unterstützt.

3.4.2 Anforderungen an entscheidungsunterstützende Systeme

Im Prinzip kann jede einzelne Phase der Energie- und Umweltplanung durch ein DSS mit geeigneten Modulen unterstützt werden. Das DSS sollte dabei die Entscheidungsfindung nicht automatisieren, sondern helfen, Systemzusammenhänge übersichtlich darzustellen. Es sollte so flexibel sein, daß es an unterschiedlichste Fragestellungen angepasst werden kann.

In Abb. 3-6 werden die Phasen des Entscheidungsprozesses für die Energie- und Umweltplanung den jeweiligen Aufgaben eines DSS gegenübergestellt. In den ersten drei Phasen besteht die Aufgabe des DSS darin, das inhaltliche Konzept der Fallstudie sowie die Vorgehensweise und die Annahmen bei der Systemanalyse zu dokumentieren. Dieses umfaßt eine systematische Beschreibung der identifizierten Probleme, der festgelegten Zielsetzungen und ihrer Zielindikatoren, sowie des modellierten Energiesystems. In der vierten und fünften Phase werden die inhaltlichen und quantitativen Annahmen für Szenarien, Maßnahmen und Strategien verwaltet und dokumentiert. In der sechsten Phase bietet das DSS eine Auswahl bewährter mathematischer Analysemethoden für die problemadäquate Modellierung der Fragestellungen an. Die in der siebten Phase bei der Datenerhebung anfallenden Informationen werden mit dem Informationssystem des DSS konsistent verwaltet und strukturiert. Bei der systematischen Zukunftsanalyse mit Hilfe der Modellierung unterstützt das DSS in der achten Phase die Szenariotechnik und bietet Werkzeuge zur Verwaltung der Modelläufe, zur Analyse und Darstellung der Ergebnisse und zur Formalisierung subjektiver Bewertungseinflüsse. In der neunten Phase werden die Schlußfolgerungen der Analyse sowie die Entscheidung selbst inhaltlich dokumentiert. In der zehnten Phase ermöglicht das DSS, die Datenbasis der Model-

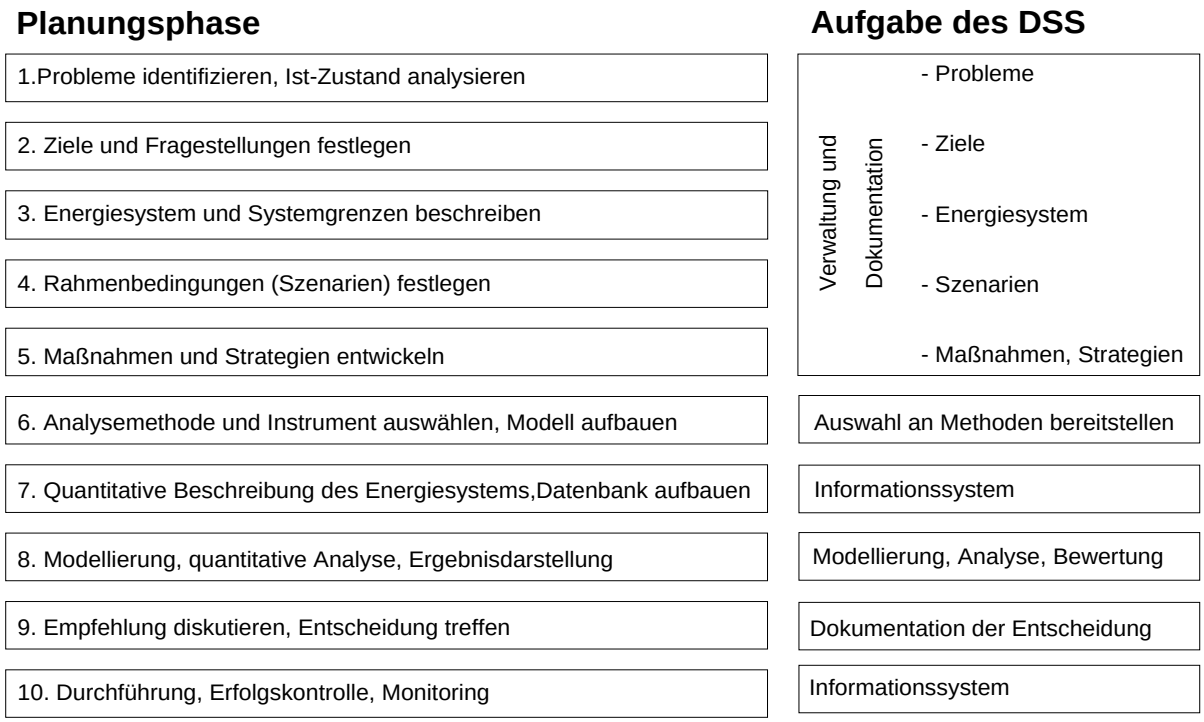


Abb. 3-6: Aufgaben eines DSS in der Energie- und Umweltplanung

lierung mit dem Informationssystem weiterzuführen, um eine kontinuierliche Erfolgskontrolle zu erleichtern und eine zeitlich verschobene Wiederholung der Rechenläufe zu ermöglichen.

Bei der Gestaltung eines computergestützten DSS sollten nicht nur die Informationen im Vordergrund stehen. Ackhoff /33/ wies schon 1967 darauf hin, daß "kein Mangel an Informationen herrsche, sondern Überfluß, daß sich ein Informationsbedarf a priori gar nicht bestimmen lasse und daß ein bloßes Bereitstellen von Informationen nicht genüge". Neben den Informationen selbst ist die Informationsverarbeitung zur Identifizierung einer Lösungsstrategie wichtig. Transparenz ist dabei das wesentlichste Qualitätsmerkmal einer Systemanalyse. Ohne Transparenz lassen sich Ergebnisse nicht mehr nachvollziehen und verifizieren und verlieren damit ihre Glaubwürdigkeit /8/. Das DSS sollte daher eine einfach durchführbare und adäquate Dokumentation der Vorgehensweise und der getroffenen Annahmen in jeder Phase des Planungsprozesses gewährleisten.

3.4.3 Komponenten eines entscheidungsunterstützenden Systems

Entscheidungsunterstützende Systeme bestehen aus einer Datenkomponente, einer Planungskomponente und einer Dialogkomponente.

Datenkomponente

Daten sind potentielle Informationen und daher die Grundlage jedes Planungsprozesses. Die Datenkomponente (Datenbank) ist das zentrale Element eines DSS. Sie ist das Informationssystem für die Analyse und ermöglicht es, historische Daten und Annahmen für zukünftige Entwicklungen zu verwalten, zu bearbeiten, zu strukturieren und zu dokumentieren. Das Informationssystem verwaltet ebenfalls Modellstruktur, -parameter und -ergebnisse sowie die gesamte inhaltliche Dokumentation der Fallstudie. Daten können aus unterschiedlichen Quellen stammen. Ein Informationssystem sollte daher eine Verbindung zu externen Informationsquellen sowie eine Schnittstelle für den Datenaustausch mit Modellen enthalten.

Planungskomponente

Die Planungskomponente ermöglicht es, alternative Strategien in Hinblick auf ihre Auswirkungen im Gesamtsystem zu untersuchen, sie systematisch miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Diese Komponente enthält dazu ein Modellsystem mit verschiedenen mathematischen Planungsmethoden wie z. B. statistische Zeitreihenanalyse, lineare und nichtlineare Simulation, Optimierung mit linearer und dynamischer Programmierung, makroökonomische Analyse, Umweltanalyse, etc. Diese Berechnungsmodule können z. B. eingesetzt werden zur Energiebedarfsanalyse, Energieversorgungsmodellierung, Ausbauplanung, Wirtschaftlichkeitsberechnung, Einsatzplanung von Energieversorgungssystemen, Ermittlung von Umweltschäden, Demand Side Management, ganzheitliche Bilanzierung, Technikkettenanalyse, etc.

Um einen systematischen Vergleich der Strategien durchzuführen, wird die Szenariotechnik eingesetzt. Die Planungskomponente muß daher in der Lage sein, Szenarien zu verwalten und zu dokumentieren, z. B. in Form von sogenannten Szenariotabellen. Um Unsicherheitsaspekte berücksichtigen zu können, sollte die Planungskomponente auch Werkzeuge zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen enthalten. Zur Bewertung der Strategien können multikriterielle Bewertungs- und Gewichtungsschemata eingesetzt werden.

Dialogkomponente

Die Dialogkomponente dient zur Benutzerführung und wird daher auch Benutzeroberfläche des DSS genannt. Die Benutzeroberfläche ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle und sollte einfach zu verstehen und zu benutzen sein. Sie sollte die Vorgehensweise bei dem strukturierten Planungsprozeß widerspiegeln. Mit Hilfe der Benutzeroberfläche werden die Wünsche des Benutzers in vom System ausführbare Kommandos umgesetzt, Daten eingegeben, Berechnungen konzipiert und gestartet und Ergebnisse angezeigt. Die Qualität des Dialogs zwischen System und Benutzer wird besonders von drei Aspekten geprägt: den Handlungs- und Eingabemöglichkeiten des Benutzers, den vorhandenen Präsentations- und Ausgabemöglichkeiten und dem erforderlichen Wissen, um das System bedienen zu können. Je weniger Detailwissen für die Benutzung des DSS erforderlich ist, d. h. je benutzerfreundlicher das System ist, desto weniger Fehler ergeben sich beim Dialog Mensch-Maschine und umso effizienter ist die Entscheidungsunterstützung.

Zu einer solchen Benutzeroberfläche gehören eine einheitliche Bildschirmgestaltung und Farbgebung, ein menügesteuerter Programmablauf, Mausunterstützung, Dateneingabe mit Hilfe von Bildschirmmasken und dynamischer Prüfung auf Eingabefehler, sowie ein kontextsensitives Hilfesystem.

Zur Darstellung der Modellergebnisse sollte das DSS ein flexibles grafisches Analysewerkzeug zur Verfügung stellen, das den Vergleich von Ergebnissen verschiedener Szenarien, die Darstellung der Korrelation zwischen Annahmen und Ergebnissen sowie die Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zuläßt. Ein Reportgenerator für Standardgrafiken, -tabellen und -berichte wäre ebenfalls wünschenswert.

3.5 Die Technik der Modellierung

"Planen, insbesonders strategisches Planen, ist Denken in alternativen Modellen und gleichzeitig ein Lernprozeß. Grundsätzlich erfolgen alle Entscheidungen, die der Mensch als denkendes, planendes Wesen trifft, auf der Basis von Modellen, wobei Modelle allgemein als abstrakte Abbildungen von etwas, für jemand und für einen bestimmten Zweck interpretiert werden können. Modelle lassen sich nach dem Grad ihrer Formalisierbarkeit in mentale, verbale und formale Modelle einteilen. Mentale Modelle sind subjektiv-abstrahierende Ausschnitte einer individuellen Weltsicht. Sie existieren nur im menschlichen Gehirn. Formale Modelle dagegen sind mit Hilfe von Formalismen gefundene Abbildungen. Sie sind intersubjektiv nachprüfbar. Dazwischen befinden sich verbale Modelle als explizite Beschreibungen. Dabei nimmt die Präzisierung realitätsbezogener Aussagen von den mentalen Modellen zu den formalen Modellen zu. Gleichzeitig gehen dabei Informationen über den betrachteten Realitätsausschnitt verloren" /34/.

Formale Modelle reduzieren die Komplexität realer Systeme und erlauben durch eine mathematische und logische Formalisierung eine Analyse dieser Systeme. Sie dienen zur Beobachtung, Beschreibung und Erklärung realer Systeme, mit denen keine Experimente durchgeführt werden können. Sie können zu dem Zweck der Prognose, der Steuerung oder der systematischen Zukunftsanalyse eingesetzt werden und dienen als Grundlage für die strukturierte Planung. Abb. 3-7 faßt den hier erläuterten Vorgang der Modellierung zusammen.

3.5.1 Ziel der Modellierung

Übergeordnetes Ziel der Modellierung im Rahmen der strategischen Planung ist es, ein Instrument zur systematischen und ganzheitlichen Analyse der langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten des Energiesystems unter Berücksichtigung seiner Wechselwirkungen mit Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt zu schaffen. Damit sollen längerfristig orientierte Leitbilder für die zukünftige Gestaltung des Energiesystems entworfen werden. Die Modellierung verfolgt zwei Teilziele:

1. **Erklärung, Diagnose, Prognose:**
   - Untersuchung der Struktureigenschaften und des dynamischen Verhaltens des Energiesystems: Energieangebot, Energienachfrage, Infrastruktur, Umweltauswirkungen,
   - Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Energiesystem, Wirtschaft und Umwelt,
   - Aufzeigen von Grenzsituationen, kritischen Zuständen und langfristigen Trends.
2. **Entscheidung, Optimierung, Steuerung:**
   - Überprüfung der Effizienz alternativer energiepolitischer Strategien im Gesamtkontext und Erstellung einer Rangfolge der Maßnahmen (policy analysis),
   - Optimierung von Investitionsstrategien, Projektevaluierung,
   - Untersuchung von Eingriffs- und Steuermöglichkeiten im Energiesektor zur Umsetzung energie- und umweltpolitischer Maßnahmen.

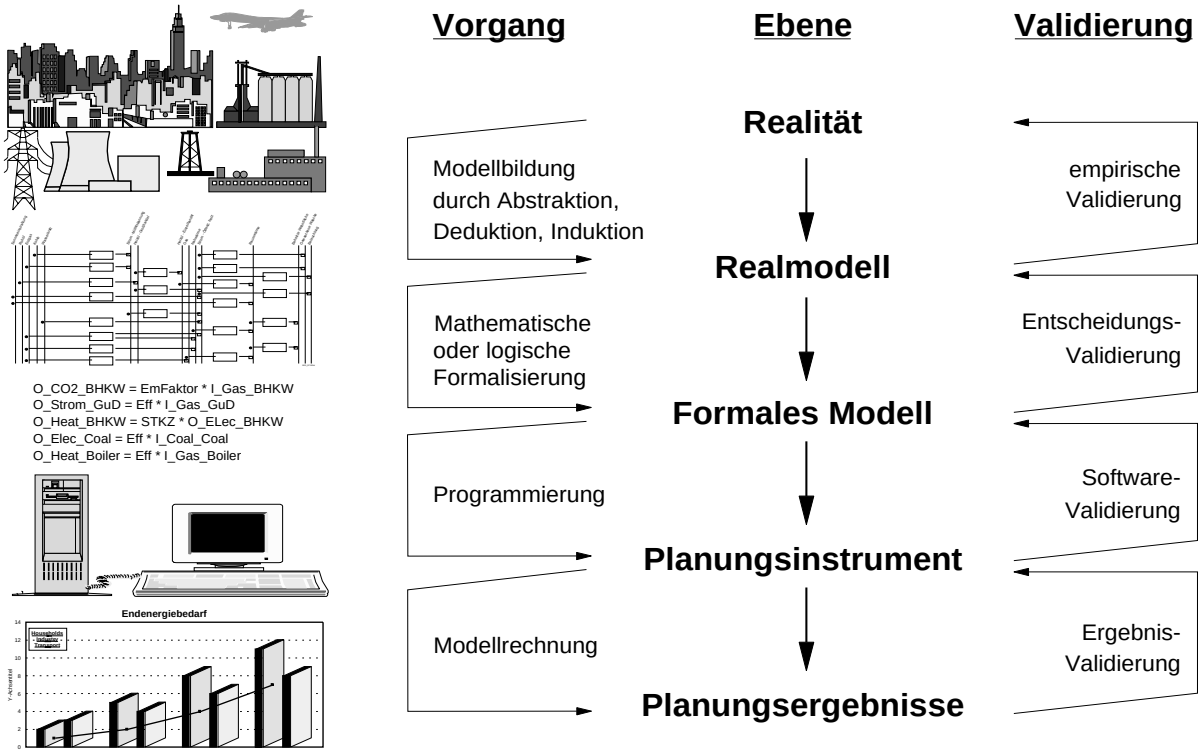


Abb. 3-7: Der Prozeß der Modellierung

3.5.2 Modellbildung

Ein *System* erfüllt eine bestimmte Funktion, d.h. es ist durch seinen Systemzweck definiert. Es besteht aus Systemelementen und Wirkungsverknüpfungen (Relationen). *Systemelemente* sind Objekte des untersuchten realen Systems. In Energiesystemen sind das z. B. die Umwandlungsprozesse, die Märkte, die Verbraucher, die Ressourcen oder die Preise. Die Wirkungszusammenhänge der Elemente untereinander und mit der Umgebung bestimmen die Struktur und die Funktion des Systems. Systemelemente lassen sich in der Regel hierarchisch zu Subsystemen gliedern.

Ein *Modell* im Sinne der Systemtheorie ist eine Abstraktion, also ein vereinfachtes Abbild des realen Systems, und wird deshalb *Realmodell* genannt. Es berücksichtigt nur wesentliche, für die Problemstellung relevante Systemelemente und Wechselwirkungen. Die vereinfachende Darstellung der Realität heißt *Modellbildung*. Ziel der Abstraktion ist es, den für die Lösung des Realproblems notwendigen Realitätsauschnitt zu identifizieren und alle entscheidungsrelevanten Aspekte herauszuarbeiten. Es geht nicht darum, den Wirklichkeitsausschnitt möglichst detailgetreu wiederzugeben, denn eine exakte Abbildung der Realität würde im Modell zum gleichen Komplexitätsgrad wie im realen System führen. Das Modell wäre damit ebensowenig operationalisierbar wie das System selbst. Die Frage nach den modellrelevanten Elementen und Beziehungen ist nur im Zusammenhang mit der Problemstellung und der Zielsetzung zu beantworten. Sie sind für Modellbildung und Aggregationsgrad der Modellgrößen bestimmend.

Die Modellbildung wird von folgenden Fragen nachhaltig beeinflußt:

- was sind die Ziele des Systems, welchen Zweck soll das Modell erfüllen,
- wie agiert das System, was ist ein Maß für die Leistung des Systems,
- wo sind die Grenzen des Systems, gibt es Einzelkomponenten, Subsysteme,
- was ist die Umgebung des Systems, wie beeinflußt die Umgebung das System,
- wer sind die Entscheidungsträger, die das System maßgeblich beeinflussen?

Die Modellbildung wird wie der gesamte Planungsprozeß iterativ durchgeführt. Dabei werden die dem Modell zugrunde liegenden Hypothesen über Wirkungszusammenhänge in der realen Welt überprüft und konsolidiert. Das Realmodell enthält aber nicht nur das untersuchte Objektsystem, sondern notwendigerweise auch Indikatoren für das dazugehörige Wertesystem, denn es muß in der Lage sein, die Zielsetzungen zu überprüfen /35/. Es gibt verschiedene Techniken und Verfahren, Realmodelle zu bilden, wobei für Energiesysteme in der Regel die Technik der prozeßanalytischen Netzwerkdarstellung gewählt wird.

3.5.3 Mathematische Modellbeschreibung

Um quantitative Aussagen zu ermöglichen, wird das Realmodell in einem zweiten Schritt mit Hilfe mathematischer Methoden formalisiert. Mit dem so gewonnenen *formalen Modell* lassen sich die Zielindikatoren quantifizieren, die für eine Bewertung der Lösungsstrategien relevant sind. Dieser Schritt entspricht einer Relaxation, denn das System wird vereinfacht, um zu einer formalen Lösbarkeit zu kommen. Das relaxierte formale Modell kann lediglich quantitative Ziele berücksichtigen, obwohl das Realmodell ursprünglich auch nichtquantitative Ziele einbezieht. Aus Gründen der besseren mathematischen Manipulierbarkeit sind methodische Vereinfachungen denkbar, wie z. B. die Linearisierung nichtlinearer Zusammenhänge, die Aggregation detaillierter Strukturen oder die statische Modellierung dynamischer Prozesse.

Formale Modelle bestehen aus Systemvariablen, Systemparametern, Gleichungen und Ungleichungen. Parameter stehen vor der Berechnung fest und sind im Modell unveränderlich, während Variable im Modell berechnet werden. Man unterscheidet exogene Variable (unabhängige Variable, explanatory Variable), die durch Identitäten mit Systemparametern bestimmt werden (exogene Vorgabegleichungen) und endogene Variable (abhängige Variable, explained variable), die durch Modellgleichungen berechnet werden. Bei Gleichungen unterscheidet man Funktionen (ökonomische, technische, institutionelle Funktionen, Verhaltensfunktionen, Zielfunktionen), Identitäten (Definitionsgleichungen), Gleichgewichtsbedingungen, Restriktionen und Definitionsbereiche für Variable.

Zur Formalisierung eines prozeßanalytischen netzwerkorientierten Realmodells stehen verschiedene mathematische Methoden zur Verfügung. Neben der Simulation durch algebraische Gleichungssysteme oder durch gekoppelte Differentialgleichungen wird häufig die Methode der Optimierung eingesetzt (lineare oder nichtlineare Programmierung, gemischtganzzahlige Programmierung, dynamische Programmierung), um die physikalischen Flüsse, die Kapazitäten der Technologien und die Kosten des Energiesystems berechnen zu können.

Simulationsmodelle berechnen das Netzwerk, indem die Marktanteile konkurrierender Technologien fest vorgegeben werden, d. h. sie können die Auswirkungen verschiedener vorgegebener Strategien exploratorisch untersuchen. Optimierungsmodelle dagegen sollen bei normativ vorgegebenen Randbedingungen die im Sinne der Zielfunktion günstigste Strategie ermitteln. D. h. sie sollen die Technologieanteile so berechnen, daß unter gegebenen Randbedingungen z. B. die Gesamtkosten oder eine andere Zielfunktion des Systems minimiert werden. Beide Ansätze berechnen schlußendlich die Energieflüsse im Netzwerk, jedoch mit unterschiedlichen Zielsetzungen und deshalb auch mit unterschiedlichen mathematischen Gleichungssystemen. Die Struktur des Realmodells, in diesem Fall die Netzwerkstruktur, sowie ein Großteil der Daten sind für beide Ansätze jedoch dieselben.

3.5.4 Programmierung

Die Fortschritte im Bereich der elektronischen Datenverarbeitung haben es möglich gemacht, komplexe und umfangreiche formale Modelle in computergestützte *Planungsinstrumente* umzusetzen. Planungsinstrumente sind Computerprogramme, die das schnelle und fehlerfreie Berechnen großer Gleichungssysteme ermöglichen. So können in kurzer Zeit verschiedene Varianten und Strategien berechnet und verglichen werden, was insbesonders für die Simulation von großer Wichtigkeit ist. Wie bereits erwähnt, bestehen formale Modelle aus Parametern, Variablen, Gleichungen und Ungleichungen. Die Werte der Parameter müssen vor der Lösung des Gleichungssystems vom Benutzer festgelegt werden. Die Berechnung bestimmt den Lösungswert der Variablen. Daher haben alle Planungsinstrumente eine ähnliche Architektur. Sie bestehen aus einer Datenbank zur Verwaltung der Parameter, einem Präprozessor (Matrixgenerator) zur Aufbereitung der Parameterdaten für die Berechnungen, einem Solver der das Gleichungssystem löst und einem Postprozessor, der die Ergebnisse und die berechneten Variablen der Computerberechnungen graphisch und tabellarisch aufbereitet.

3.5.5 Validierung

Die Validierung geht in vier Schritten vor sich. Im ersten Schritt wird das Realmodell daraufhin überprüft, ob der ausgewählte Realitätsausschnitt prinzipiell alle Komponenten enthält, die für die Lösung des Planungsproblems eine Rolle spielen. Dieses umfaßt auch die festgelegten Bewertungskriterien und die damit involvierten Wertvorstellungem. Dieser Vorgang wird *empirische Validierung* genannt. Der zweite Schritt validiert die mathematische Beschreibung des formalen Modells und prüft, ob das Verfahren die erwarteten Indikatoren liefert, die zur Beurteilung einer Entscheidung nötig sind. Dies ist die sogenannte *Entscheidungsvalidierung*. Im dritten Schritt der *Softwarevalidierung* wird überprüft, ob das Computerprogramm das mathematische Gleichungssystem korrekt berechnet. Der letzte Schritt ist die *Ergebnisvalidierung*, in dem die Konsistenz der Annahmen überprüft und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird.

3.5.6 Die Grenzen von formalen Energiemodellen

"Die Entwicklung mathematischer Modelle scheint ein besonders geeignetes Hilfsmittel für die Erarbeitung von Entscheidungshilfen zu sein, die im Prinzip der Vielzahl der zu berücksichtigenden Zusammenhänge und der inneren Verkettung der Probleme gerechter werden als andere z. B. intuitive oder isolierte disziplinäre Analysemethoden. Formal bringen mathematische Modelle zwei Vorteile mit sich:

1) Die Notwendigkeit der mathematischen Formulierung der Zusammenhänge und der Systemstruktur zwingt zu einer intensiven Beschäftigung mit den Problemen, was in der Regel ein besseres Problemverständnis zur Folge hat.
2) Mathematische Modelle bieten bessere Voraussetzungen, die zugrundeliegenden Hypothesen und die verwendeten Zusammenhänge zu diskutieren und die Auswirkungen veränderter Parameter aufzeigen zu können." /36/.

Operationalisierbare mathematische Modelle sind in der Lage, problemrelevante Zusammenhänge zu parametrisieren und in sich konsistent abzubilden. Die Veränderbarkeit einzelner Parameter oder Systemrelationen ermöglicht die Simulation von Handlungsalternativen zur Gestaltung des zukünftigen Energiesystems, zeigt deren Konsequenzen auf und erlaubt durch die "Ex-Ante-Analyse" eine systematische Bewertung. Modelle führen zu einem besseren Verständnis des Systemverhaltens und sind daher besonders geeignet, die Transparenz der Planung und Analyse energiepolitischer Maßnahmen zu erhöhen und damit die Entscheidungsfindung zu versachlichen. "Computer modeling allows to discover the connections between life experiences, theory, history, and current affairs" /37/.

Der Sinn und Zweck sowie die Grenzen der wissenschaftlichen Aussagefähigkeit von formalen Energiemodellen sollten jedoch nicht aus den Augen verloren werden. Modelle geben nicht alle Aspekte der Realität wieder und sind, wie schon gesagt, ein vereinfachtes Abbild der Realität. Daher erhält man ausschließlich Erkenntnisse über das Verhalten des Modells selbst, welches nicht unbedingt mit dem Verhalten der Wirklichkeit übereinstimmen muß. Der Gültigkeitsbereich der Modellergebnisse und die Übertragbarkeit auf die Realität sind entsprechend eingeschränkt. Modelle werden für bestimmte energiewirtschaftliche Fragestellungen konzipiert und sind nicht universell einsetzbar. Für jede Analyse gibt es andere, maßgeschneiderte Modelltechniken, die abhängig sind von der Zielsetzung, der angestrebten Differenziertheit und dem vorhandenen Datenmaterial. Während der Modellierung ist daher ein ständiger Überprüfungs- und Hinterfragungsprozeß notwendig, der die Übereinstimmung zwischen den modellierten Systemeigenschaften und der Realität kontrolliert und ihre Relevanz für die Fragestellung prüft. Aus diesem Grund sind Modelle selten endgültig, sie müssen ständig überprüft, neu angepaßt und verbessert werden.

Modelle beruhen immer auf subjektiv geprägten Beurteilungen und Annahmen. In einem Forschungsbericht zum International Energy Workshop 1983 /38/, dessen Ziel ein Vergleich der Prognosen über den Weltenergieverbrauch war, wird schon damals festgestellt, daß "long-term projections may be heavily influenced by current events. (..) Just as in

macroeconomic forecasting, there is a strong herd instinct that operates within the community of energy analysts". Besonders ein historischer Vergleich der Energiestudien vermittelt den Eindruck, daß die Untersuchungen hauptsächlich die Trends der letzten Jahre widerspiegeln und nicht zu grundsätzlich neuen Erkenntnissen kommen. Diese "konservative" Eigenschaft menschlicher Denkweise ist am deutlichsten in der empirischen Trendanalyse zu erkennen, deren Status-Quo-Projektionen nicht in der Lage sind, ungewöhnliche oder sprunghafte Entwicklungen, Strukturbrüche oder Krisen zu erklären. Energiemodelle überwinden diese Einschränkung mit Hilfe der Szenariotechnik, die es möglich macht, Strukturveränderungen besser zu analysieren. Leider können sich diese hypothetischen Szenarien nicht auf statistische Erkenntnisse stützen, da es kein Erfahrungswissen über die Auswirkungen solcher Ereignisse gibt. Szenarien sind lediglich in der Lage, Möglichkeiten der Entwicklung aufzuzeigen. Daraus abgeleitete Erkenntnisse können keine Prognosen sein, sondern sind nur im Zusammenhang mit den im Szenario getroffenen Annahmen gültig.

Nach /39/ und /40/ läßt sich die Kritik eines Modells in fünf Bereiche gliedern, die mit folgenden Fragen überprüft werden:

- **Kritik der Annahmen** (logische Kritik): Sind die Annahmen frei von Widersprüchen, ist die Unabhängigkeit und Vollständigkeit der Annahmen gewährleistet?
- **Kritik an der Realitätsnähe der Modellstruktur** (Strukturgültigkeit): Entspricht die Wirkungsstruktur des Modells der essentiellen Wirkungsstruktur des realen Systems?
- **Kritik an der Analyse** (Verhaltensgültigkeit): Ist die Deduktion der Ergebnisse aus den Annahmen korrekt? Zeigt das Modell das gleiche Verhalten wie das reale System?
- **Kritik an der Realitätsnähe der Ergebnisse** (Empirische Gültigkeit, Ex-Post-Analyse): Läßt sich mit den Ergebnissen die Wirklichkeit erklären? Entspricht sie den empirischen Erkenntnissen, die im realen System beobachtet werden?
- **Kritik an der Relevanz des Modells** (Anwendungsgültigkeit): Trägt das Modell zur Analyse des untersuchten Problems bei? Erfüllt es seinen Modellzweck?

Energiemodelle können menschliches Verhalten nicht vorhersagen, denn es gibt hier keine naturgesetzlichen Zusammenhänge. Die Zukunft kann nicht prognostiziert werden, denn sie wird durch unsere heutigen Entscheidungen, Aktionen und Unterlassungen ständig neu gestaltet. Ziel der Modellierung ist vielmehr, durch eine "systematische Zukunftsanalyse" ein besseres Systemverständnis zu erreichen und daraus rational begründbare Entscheidungshilfen abzuleiten. Das Energiemodell ist dabei das Labor. Modelle nehmen dem Planer die Entscheidungsfindung nicht ab, sondern unterstützen ihn nur. Sie liefern keine optimale Entscheidung, sondern helfen, optimale Entscheidungen zu finden.

3.6 Die historische Entwicklung von Energieplanungsinstrumenten

Dieses Kapitel gibt einen Rückblick auf die Entstehungsgeschichte der Energieplanungsinstrumente, wobei viele hier erwähnte Instrumente im nächsten Kapitel näher beschrieben werden.

3.6.1 Energiemasterpläne

Im 2. Weltkrieg wurden zum ersten Mal wissenschaftliche Methoden für planerische Aufgaben eingesetzt, um Probleme der Logistik zu optimieren. Die Übertragung dieser Methoden in die Betriebswirtschaft begründete die Fachrichtung des Operations Research. In den 60er Jahren wurden erstmals systemanalytische Methoden im Bereich der Energieplanung eingesetzt. Die Untersuchungen befaßten sich damals mit dem Versorgungssystem einzelner Energieträger. Mit hohem Aufwand wurden detaillierte Masterpläne für den Ausbau der Strom-, Mineralöl- und Erdgasversorgung erstellt. Im Vordergrund der Analysen standen die Versorgungssicherheit, die optimale Nutzung der vorhandenen Anlagen und der kostengünstigste Ausbau. Die Energienachfrage wurde mit Hilfe von Trendextrapolationen aus der Vergangenheit fortgeschrieben. Um der Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung gerecht zu werden, wurden verschiedene Szenarien angenommen. Ergebnisse, Schlußfolgerungen und Empfehlungen wurden in einem umfangreichen Masterplan festgehalten, der von nun an bei allen Entscheidungsfragen zu Rate gezogen wurde. Sobald sich die tatsächliche Entwicklung von den gerechneten Szenarien entfernte, wurde der ganze Masterplan jedoch hinfällig.

Heute sind die Experten sich einig, daß Energie- und Umweltplanung ein kontinuierlicher und kein einmaliger Prozeß ist. Sie haben erkannt, daß sich die Rahmenbedingungen so unvorhersehbar ändern können, daß dies in keiner einmaligen Planung berücksichtigt werden kann. Ein Beispiel dafür sind die Ölpreiskrisen 1973 und 1979, die durch eine drastische Beeinflussung von Preis und Angebot für Öl das Energiesystem stärker verändert haben, als je in einem Planungsszenario angenommen wurde. Mit dieser Erfahrung nahm die Fachwelt Abstand von der Vorstellung, daß durch Planung eine annähernde Vorhersage der Zukunft gemacht werden könne. Stattdessen wird die Planung heute als ein Werkzeug für die "systematische Zukunftsanalyse" angesehen, die es ermöglicht, mit dem Wissen von heute trotz einer ungewissen Zukunft bessere Entscheidungen für morgen treffen zu können.

Viele der damals entwickelten Planungsinstrumente werden heute noch verwendet. Ein Beispiel dafür ist *WASP* /41//42/, das 1972 von der Tenessee Valley Authority (TVA) in Zusammenarbeit mit dem Oak Ridge National Laboratory (ONL) in den USA im Auftrag der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) in Wien konzipiert wurde, um das wirtschaftliche Potential von Kernkraftwerken zu analysieren. *WASP* ermittelt die optimale Ausbauplanung des Stromerzeugungssektors und wurde von der IAEA bisher in fast jedem Land der Welt, das einen größeren Aus- oder Umbau der Elekrizitätsversorgung vorgenommen hat, eingesetzt, insbesonders auch in Entwicklungsländern.

3.6.2 Energiesystemmodelle

Die Ölpreiskrisen zeigten auf, daß eine isolierte Analyse einzelner Energieträger den Entscheidungsproblemen nicht mehr gerecht werden kann. Deshalb begann Mitte der 70er Jahre die Entwicklung von Energiesystemmodellen. Diese waren in der Lage, alle Energieträger und Technologien des Energieversorgungssystems und des Energienachfragesystems bis hin zur Nutzenergie abzubilden. Damit konnte jetzt sowohl die Substitution von Energieträgern untereinander als auch die Auswirkung von rationeller Energieanwendung untersucht werden.

Typische Planungsinstrumente dieser Generation sind *MESSAGE*, *EFOM* und *MARKAL*. *MESSAGE* /43//44/ wurde am Internationalen Institut für angewandte Systemanalyse (IIASA) in Wien entwickelt. *EFOM* /45/ wurde im Auftrag der Europäischen Gemeinschaft am Institut Economique et Juridique de l'Energie (IEJE) der Universität Grenoble und von der Firma Systems Europe SA in Brüssel erstellt, während *MARKAL* /46//47/ im Auftrag der International Energy Agency (IEA) vom Brookhaven National Laboratory (BNL) und der Kernforschungsanlage Jülich (KFA) programmiert wurde. *MARKAL* basiert auf dem Simulationsmodell ESNS (Energy Systems Network Simulator) des BNL und dem daraus entwickelten Optimierungsmodell BESOM (Brookhaven Energy System Optimization Model).

Ergänzend dazu wurden Energiebedarfsmodelle entwickelt, die aus einer sektoralen Disaggregation und Fortschreibung der wirtschaftlichen Aktivitäten den Bedarf an Nutzenergie bzw. Energiedienstleistung bestimmen. Nachfragemodelle sind nach den Kategorien des Operations Research Prognosemodelle /48/ und basieren auf Trendextrapolationen, Regressionsanalysen und ökonometrischen Ansätzen. Beispiele sind MAED /49/ von der IAEA Wien und MEDEE /50/ vom IEJE in Grenoble.

3.6.3 Modulare Planungssysteme

Um Umweltschädigungen und Auswirkungen auf die Volkswirtschaft besser untersuchen zu können, wurden Anfang der 80er Jahre Umwelt- und makroökonomische Modelle (IMPACT und MACRO-Modelle) mit Energiesystemmodellen iterativ gekoppelt. Mit diesen modularen Planungssystemen konnte der Einfluß der Energiesystemkosten auf die Volkswirtschaft und die Auswirkungen der volkswirtschaftlichen Aktivitäten auf den Energiebedarf untersucht werden. Die Umweltschäden wurden dabei national, regional und global erfaßt. Dadurch sollten Fehler durch nicht erkannte Rückkopplungsschleifen im Energiesystem vermieden werden, die den Nutzen einer Maßnahme zunichte machen können, wie z. B. die "Politik der langen Schornsteine" in den sechziger Jahren im Ruhrgebiet. Damals wurde eine Verbesserung der Luftqualität in Ballungsgebieten erreicht, die dann aber zu einer Verlagerung der Problematik und einer neuen Dimension des Problems, nämlich dem Waldsterben führte. Erst die "teure" Alternative der Rauchgasreinigung löste das Problem systemübergreifend.

Bekannt ist auch das IIASA Weltenergiemodell /51//52/, das aus mehreren iterativ gekoppelten Einzelmodellen besteht: MEDEE bestimmt für vorgegebene wirtschaftliche

und demographische Szenarien die Endenergienachfrage, untergliedert nach Verwendungszwecken, Sektoren und Energieträgern. *MESSAGE* ermittelt den optimalen Ausbau des Energieversorgungssystems zur Deckung dieser Nachfrage und bestimmt den Primärenergiebedarf unter Berücksichtigung einer preisabhängigen Technologiesubstitution sowie einer Vielzahl von Randbedingungen (Energieverfügbarkeit, Zubauraten, Produktionskapazitäten). Die zu minimierende Zielfunktion ist die Summe der diskontierten Kapital-, Betriebs-, Instandhaltungs- und Brennstoffkosten des Energiesystems. IMPACT ermittelt mit Hilfe von Input-Output-Tabellen den direkten und indirekten Bedarf an Kapital, Material, Land, Arbeitskräften, Dienstleistungen und Umweltbelastungen (CO_2, Abwärme). MACRO schließt den Kreis der Modelle und integriert den Kapitalbedarf für Energieinvestitionen in die Modellierung der Wirtschaft. Daraus sollte dann das verfügbare Investitionsvolumen und die wirtschaftlichen Aktivitäten für MEDEE abgeleitet werden. Unerwartete Schwierigkeiten bei der Kompatibilität der Aggregationsniveaus verhinderten jedoch die Koppelung mit MACRO.

3.6.4 Neueste Entwicklungen

Die rasante Entwicklung bei Computerhardware und Software in den 80er Jahren schuf die Basis für eine neue Generation von Planungsinstrumenten. Was zehn Jahre früher noch unmöglich erschien oder den Einsatz von teuren Mainframecomputern erforderte, wurde plötzlich auf kleinen, schnellen und kostengünstigen Arbeitsplatzrechnern realisierbar. Erweiterungen der Planungsinstrumente lassen sich auf verschiedenen Ebenen erkennen:

Erweiterung der Systemgrenzen: Energiesystemmodelle können heute neben der Energiebilanz zusätzlich auch Umweltschäden und ökonomische Effekte des gesamten Energiesystems berechnen. Auch die Auswirkungen vorgelagerter Prozesse des Systems können jetzt berücksichtigt werden, um Life Cycle Analysen und Ökobilanzen zu erstellen.

Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Methoden: Die Optimierung von Energiesystemen wird heute z. B. um das Verfahren der "multikriteriellen Optimierung" erweitert, das mehrere Zielfunktionen gleichzeitig erlaubt. Die "Stochastische Programmierung" und die "Fuzzy Mathematik" ermöglichen eine bessere Integration des Unsicherheitsaspektes. Mit der "nichtlinearen Optimierung" wird eine genauere Abbildung realer Prozesse erreicht.

Verstärkte Integration von ökonomisch- und technikorientierten Modellen: Um die Wechselwirkung von Energiesystem und Wirtschaft besser modellieren zu können, werden Energiesystemmodelle um makroökonomische Gleichungen für die Energiemärkte ergänzt oder mit "allgemeinen Gleichgewichtsmodellen" gekoppelt, um auf diese Weise die Preisabhängigkeit der Energienachfrage abbilden zu können und den Effekt dirigistischer Maßnahmen (Steuern oder Subventionen) abzuschätzen.

Erhöhung der zeitlichen und räumlichen Auflösung: Regenerative Energiesysteme werden im Stundenrythmus und mit hoher räumlicher Auflösung simuliert, um ihr Potential für die Energieversorgung bestimmen zu können /53/. Ganglinien von Angebot und Nachfrage werden berücksichtigt, um die Effekte von Speichertechnologien zu untersuchen, die

Auswirkungen einer Integration von Windgeneratoren oder Photovoltaikanlagen in das Verbundsystem zu bewerten /54/ oder das Potential der Koppelproduktion von Strom und Wärme aus Blockheizkraftwerken zu ermitteln.

Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit der Planungsinstrumente: Moderne Bedienoberflächen setzen heute vom Benutzer weniger Computerkenntnisse voraus und verkürzen die Einarbeitungszeit. Flexible grafische und tabellarische Darstellungswerkzeuge ermöglichen eine einfachere Analyse der Rechenergebnisse. Viele "alte" Modelle werden durch benutzerfreundliche Oberflächen zu neuem Leben erweckt, wie z. B. *MARKAL* mit dem *MARKAL* User Support System MUSS /55/ oder *WASP* mit dem vom Argonne National Laboratory entwickelten ENPEP /56/. Neue Planungsinstrumente, wie z. B. die in Deutschland vom BMFT geförderten *IKARUS*-Modelle /57/, werden von Anfang an mit grafischen Benutzeroberflächen ausgestattet.

Koppelung der Planungsinstrumente an Datenbankmanagementsysteme (DBMS): Datenbankmanagementsysteme machen die Informationsverwaltung einfacher, übersichtlicher, konsistenter und sicherer. Im *IKARUS*-Projekt wurden z. B. mit einem ORACLE-System zentrale Informationssysteme mit validierten Technologiedaten, Kostendaten und allgemeinen statistischen Daten realisiert, auf das die *IKARUS*-Modelle direkt zugreifen können. Das Anfang der 80er Jahre an der Universität Stuttgart entwickelte *MESAP* **M**icrocomputer based **E**nergy **S**ector **A**nalysis and **P**lanning /58/ ist an das Datenbanksystem RSYST gekoppelt, *MARKAL*-MUSS koppelt das *MARKAL*-Modell mit einer dBase-Datenbank.

Koppelung der Planungsinstrumente mit geographischen Informationssystemen: Um eine feinere Darstellung der räumlichen Dimensionen zu ermöglichen, werden die Emissionen von Luftschadstoffen im Kilometerraster ermittelt, mit Ausbreitungsmodellen die Verteilung dieser Emissionen und die daraus resultierenden Imissionen berechnet und die Ergebnisse in Form von Kartendarstellungen präsentiert. Die Entwicklung solcher Systeme begann in den 80er Jahren und wurde besonders am Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse IIASA /27/ und am IER weit vorangetrieben /59//60/.

Anpassung der Planungsinstrumente an die Anforderungen in der Dritten Welt: Ein besonderes Anliegen der Weltbank ist es, den strukturierten Planungsansatz in die Länder der Dritten Welt zu übertragen. So entstanden spezielle Instrumente für Entwicklungsländer wie das SUPER/OLADE-BID /61/ in Ecuador, die Energy Toolbox /62/, das LEAP-Modell /63/ und das oben erwähnte *MESAP*. Wichtigster Bestandteil dieser Systeme sind Module zur detaillierten Modellierung der Biomasse- und Landnutzung. Nachdem erst die Meinung vorherrschte, Entwicklungsländer bräuchten einfachere Modelle, hat sich heute die Ansicht durchgesetzt, daß es methodisch keine Unterschiede zwischen Energieplanung in der Ersten und der Dritten Welt gibt. Lediglich die Ziele und Rahmenbedingungen sowie der Detaillierungsgrad und die Schwerpunkte der Analyse unterscheiden sich. Heute werden *MESAP* und LEAP deshalb auch in Europa und den USA eingesetzt.

Tabelle 3-4 faßt die Trends in der Entwicklung der Planungsinstrumente zusammen. Wurden früher Versorgungssysteme für einzelne Energieträger analysiert, werden heute

wegen möglicher Substitutionseffekte alle Energieträger des Energiesystems berücksichtigt. Konnten sich viele Studien noch auf das Energiesystem und die Umwelt beschränken, stehen heute die volkswirtschaftlichen Auswirkungen von Energiesteuern und Subventionen im Vordergrund. Beschränkte man sich früher auf regionale Analysen, müssen heute lokale, regionale, nationale und globale Ebenen vernetzt werden, um z. B. Probleme wie den Treibhauseffekt zu begrenzen. Hier müssen globale Strategien regional verankert und lokal umgesetzt werden. Ökobilanzen berücksichtigen beim Vergleich verschiedener Systeme oder Produkte die Effekte vorgelagerter Prozesse und bilanzieren neben Energieverbrauch und Luftschadstoffemissionen einer Technologie auch flüssige und feste Schadstoffe, die während der Herstellung und der Entsorgung entstehen. Die zeitliche und räumliche Auflösung der Analysen ist feiner geworden. Stündliche Auflösungen werden verwendet, um Lastgänge oder saisonale Effekte zu berücksichtigen. Regionen werden nicht mehr als Punktquellen bilanziert sondern räumlich gerastert, um die Entstehung und Ausbreitung von Schadstoffen genauer untersuchen zu können. Es ist zu erwarten, daß die Anforderungen weiter steigen und es auch in Zukunft nötig sein wird, Methoden aus den Wirtschaftswissenschaften, den Ingenieurwissenschaften, der Soziologie, der Umweltforschung und der Informatik interdisziplinär zu verknüpfen.

Tabelle 3-4: Trends in der Entwicklung von Planungsinstrumenten

- Erweiterung der Systemgrenzen
  - ein Energieträger --> alle Energieträger
  - nur Energiesystem --> Energiesystem + Umwelt + Wirtschaft
  - lokal --> regional --> national --> global
  - Energie-Analyse --> Ökobilanz, Life Cycle Analysis
- Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Methoden
- Verstärkte Integration von ökonomisch- und technikorientierten Modellen
- Erhöhung der zeitlichen und räumlichen Auflösung
  - Jahre --> Jahreszeiten --> Tage --> Stunden
  - Punktmodelle --> Rastermodelle
- Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit
- Kopplung mit Datenbank Management Systemen (DBMS)
- Kopplung mit geographischen Informationssystemen (GIS)
- Anpassung an die Anforderungen der Dritten Welt

3.7 Planungsinstrumente zur Energie- und Umweltplanung

3.7.1 Klassifizierungsmöglichkeiten

Planungsinstrumente für die Energie- und Umweltplanung lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien klassifizieren. Bei der Modellbildung lassen sich grundsätzlich zwei Vorgehensweisen voneinander unterscheiden. Der *technische* oder *prozeßanalytische (process-engineering) Ansatz* bildet den Energiesektor technologieorientiert ab. Dies ermöglicht es, technische Umstrukturierungen des Energiesystems zu erfassen. Dagegen bietet sich der *ökonomische Ansatz* zur Beschreibung des Verhaltens wirtschaftlicher Subjekte an, mit dem die Aktivitäten eines volkswirtschaftlichen Systems konsistent aus Vergangenheitsdaten beschrieben werden können. Dies wird häufig zur Projektion von wirtschaftlichen Trends eingesetzt. In der Praxis werden beide Ansätze gemischt. Tabelle 3-5 zeigt eine Übersicht über weitere Klassifizierungskriterien.

Planungsinstrumente können nach dem Zweck der Modellbildung eingeteilt werden /64/. Abb. 3-8 zeigt, welche Bereiche der Volkswirtschaft und des Energiesektors abgedeckt werden. *Energieinformationssysteme* sind sozusagen Modelle einzelner Technologien und speichern neben Technologiedaten auch Energie- und volkswirtschaftliche Daten. *Makroökonomische Modelle* bilden die volkswirtschaftlichen Sektoren und ihre Verflechtung ab, wobei das Energiesystem stark vereinfacht als ein Wirtschaftssektor dargestellt wird. Sie ermöglichen eine konsistente Projektion der sektoralen wirtschaftlichen Aktivitäten. Der Aggregationsgrad makroökonomischer Modelle ist hoch, sie werden auch "top-down" Modelle

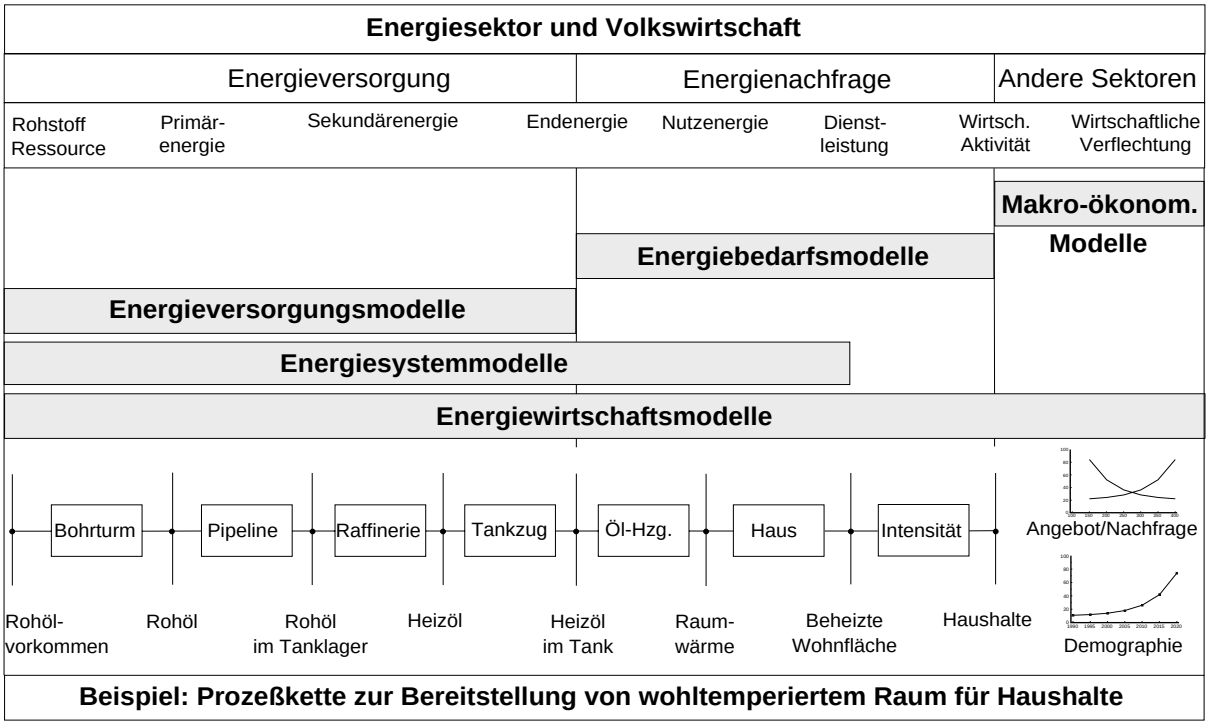


Abb. 3-8: Klassifizierung von Instrumenten nach dem Zweck der Modellbildung

genannt. *Energiebedarfsmodelle* analysieren die Determinanten und die Struktur des Energiebedarfs. Ausgehend von einer Projektion der wirtschaftlichen Aktivitäten wird der zukünftige sektorale Bedarf an Energiedienstleistung, Nutzenergie oder Endenergie ermittelt. Diese wesentlichen Steuergrößen des Energiesystems dienen als Input für Energieversorgungs- und Energiesystemmodelle. *Energieversorgungsmodelle* bilden einzelne Energieträger (single fuel), einzelne Erzeugungssektoren (single sector) oder die gesamte Energieangebotsseite von der Ressource bis zur Endenergie ab. *Energiesystemmodelle* erweitern diesen Ansatz bis zur Energiedienstleistung und bilden das gesamte Energiesystem unter Berücksichtigung der Endverbrauchertechnologien ab und können daher Auswirkungen von Veränderungen im Verbraucherverhalten untersuchen. Beide Modellkategorien ermitteln die Energieflüsse (Aktivitäten) und Technologiekapazitäten, die nötig sind, um den exogen vorgegebenen Energie- bzw. Dienstleistungsbedarf zu decken. Zusätzlich bestimmen sie die Kosten des Energiesystems. Durch die Integration aller Energieträger können sie Substitutionseffekte berücksichtigen. Energiesystemmodelle sind in der Regel sehr detailliert und werden auch "bottom-up" Modelle genannt. *Modulare Planungsinstrumente* kombinieren Instrumente aus allen bisher beschriebenen Kategorien. *Energiewirtschaftsmodelle* integrieren den technischen Modellierungsansatz des Energiesystems ("bottom-up") mit der makro-ökonomischen Darstellung der Volkswirtschaft ("top-down"). Nichtenergetische Produktions- und Konsumaktivitäten sowie Wechselwirkungen und Rückkopplungen zwischen Energiesystem, Volkswirtschaft, Verbrauchern und Umwelt können dabei konsistent in einem Modell untersucht werden.

Die strategischen Aspekte der Analyse eignen sich ebenfalls zur Klassifizierung von Planungsinstrumenten. Man unterscheidet kurz-, mittel- und langfristige Instrumente je nach Zeithorizont der Planung (<5 Jahre, 5 - 10 Jahre, >10 Jahre). Der geographische Horizont der Planung kann lokal, regional, national oder global sein. Die zeitliche Auflösung der Analyse wird durch die Dauer der Modellierungsperiode, die Anzahl der Stützjahre und die Länge einer Bilanzierungsperiode (in der Regel 1 Jahr) bestimmt. Die räumliche Auflösung kann Raster, Linien oder Punkte beschreiben. Zeit und Raum können diskret oder kontinuierlich abgebildet werden. Die sektorale Auflösung definiert, welche Wirtschafts- und Energiesektoren unterschieden werden.

Die Abbildung zeitlicher Zusammenhänge ist ein weiteres Klassifizierungskriterium. Statische Instrumente bilden das Energiesystem zu einem bestimmten Zeitpunkt ab. Quasidynamische Instrumente bilden zwar verschiedene Zeitperioden ab, besitzen jedoch keine über Zeitperioden hinweg definierte Funktionen. Die Gleichungen werden für jeden Zeitpunkt separat gelöst, wobei die Lösung für eine Periode Ausgangspunkt für die Lösung der nächsten Periode ist (time forward). Entscheidungen werden ohne Kenntnis der Zukunft getroffen (myopic, kurzsichtig). Dynamische Instrumente dagagen haben intertemporale Gleichungen zur Abbildung von Abhängigkeiten über Perioden hinweg. Alle Zeitperioden werden gleichzeitig gelöst. Deshalb sind in jeder Periode alle zukünftigen Zustandsgrößen und Restriktionen bekannt (perfect foresight).

Tabelle 3-5: Kriterien zur Klassifizierung von Planungsinstrumenten

Kriterium	**Ausprägung**
Zweck der Modellbildung	Energieinformationssystem Makroökonomisches Modell Energiebedarfsmodell Energieversorgungsmodell Energiesystemmodell Modulares Planungsinstrument Energie-Wirtschaftsmodell
Art der Modellierung	Bottom-Up Top-Down
Beschreibungsansatz	technisch, prozeßanalytisch ökonomisch technisch-ökonomisch
Strategische Aspekte der Analyse	Zeithorizont: kurz-, mittel-, langfristig Geographischer Horizont: lokal, regional, national, global Zeitliche Auflösung Räumliche Auflösung Sektorale Auflösung
Abbildung zeitlicher Zusammenhänge	statisch (ein Zeitpunkt) quasidynamisch (time forward, recursive, myopic) dynamisch (intertemporal, perfect foresight)
Mathematische Methode	Ökonometrie Input-Output-Analyse Accounting Simulation Lineare Programmierung LP Mehrkriterielle lineare Programmierung Gemischtganzzahlige Programmierung MIP Nichtlineare Programmierung NLP Dynamische Programmierung DP System Dynamics
Art der Gleichung	algebraische Gleichung Differentialgleichung
Typ der Funktion	linear nichtlinear
Behandlung von Unsicherheit	deterministisch stochastisch
Diskretisierung	diskrete Variable kontinuierliche Variable

Als mathematische Methoden unterscheidet man die Ökonometrie (ökonometrische Schätzfunktionen), die Input-Output-Analyse (Bilanzierung mit Input-Output Tabellen), die Simulation (algebraische Gleichungssysteme), die lineare Programmierung (LP, Optimierung einer linearen Zielfunktion unter linearen Nebenbedingungen mit Hilfe des Simplexalgorithmus), die gemischtganzzahlige Programmierung (Mixed Integer Programming MIP = LP mit

ganzzahligen Variablen), die nichtlineare Programmierung (NLP, Optimierung einer nichtlinearen Zielfunktion unter nichtlinearen Nebenbedingungen), die dynamische Programmierung (DP, sequentielle Lösung eines mehrstufigen Entscheidungsprozesses) und das Verfahren der System Dynamics (gekoppelte Differentialgleichungen). Weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der mathematischen Gleichungen: algebraische oder Differentialgleichungen, lineare oder nichtlineare Gleichungen, deterministische, stochastische, diskrete (ganzzahlige) oder kontinuierliche Variable. Tabelle 3-6 enthält die im nächsten Kapitel beschriebenen Planungsinstrumente, wobei in Klammern die entwickelnde Institution angegeben wird.

Tabelle 3-6: Planungsinstrumente für die Energie- und Umweltplanung

Energieinformationssysteme	CO2DB (IIASA) DECPAC (DECADES) IKARUS-Technikdatenbanken (KFA, BMFT) ENIS (IER)
Makroökonomische Modelle	MACRO (IIASA) HERMES (EU) MIS-IKARUS (KFA, BMFT)
Energiebedarfsmodelle	MEDEE (IEJE) MAED (IAEA, US-DOE) MADE (IKE)
Energieversorgungs- und Energiesystemmodelle	WASP (IAEA, US-DOE) MARKAL (ETSAP, IEA) EFOM-ENV (EU) MESSAGE (IIASA) E^3Net (IER) MIDAS (EU) POLES (EU) SAFIRE (EU) EM (World Bank, GTZ) BALANCE (IAEA, US-DOE) PlaNet (IER)
Modulare Planungsinstrumente	MESAP (IER) ENPEP (IAEA, US-DOE) ETB (ERL) LEAP (TELLUS) SUPER/OLADE-BID (OLADE-IDB) IKARUS (KFA, BMFT) ENERPLAN (UNDTCD) SESAM (Aalborg University)
Energiewirtschaftsmodelle	MARKAL-MACRO (BNL) MICRO-MELODIE (CEA) NEMS - National Energy Modelling System (DOE) PRIMES (EU) GEM-E^3 (EU), E3ME (EU) ETA-MACRO, GLOBAL 2100, GREEN, 12RT NEWAGE (IER)

3.7.2 Energieinformationssysteme

Energieinformationssysteme sind Datenbanken zur Verwaltung von statistischen und technischen Daten. Sie enthalten Module für statistische Auswertungen (z. B. Regressionsanalyse) und zur graphischen und tabellarischen Darstellung der Informationen. Einige Datenbanken bieten zusätzlich die Möglichkeit, Technologienvergleiche oder Technikkettenanalysen durchzuführen. Mit Informationssystemen können jedoch keine systemanalytischen Untersuchungen im Sinne einer strategischen Planung durchgeführt werden. Beispiele dafür sind:

CO2DB /65/, IIASA. Die *CO2DB*-Datenbank enthält qualitative und quantitative Technologiebeschreibungen sowie Informationen über Möglichkeiten zur Reduzierung von CO_2-Emissionen. Die Technologiedaten umfassen die physikalischen Flüsse, Leistungen, Kosten für Investitionen, Betrieb und Stillegung von Energieanlagen, Emissionsdaten, Arbeitskräfte- und Materialbedarf, Bestandsdaten und Literaturquellen. Das Analysemodul berechnet Wirkungsgrade, Kosten und Umwelteffekte von Technikketten.

DECPAC /66//67/, IAEA/DECADES. In den *DECPAC*-Datenbanken sind technische und ökonomische Informationen über Stromerzeugungstechnologien sowie ihre Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit gespeichert. Eine Analysetool ermöglicht den direkten Vergleich der Technologien sowie eine Technikkettenanalyse, die alle Materialströme vom Ressourcenbedarf bis zum Abfallaufkommen bilanziert. Über eine Kopplung der Datenbank mit *WASP* können auch Systemanalysen für den Stromerzeugungssektor durchgeführt werden.

IKARUS-Datenbanken /57/, KFA/BMFT. Die *IKARUS* Datenbank für Deutschland unterscheidet die Bereiche Primärenergie, Umwandlung, Haushalte, Industrie und Kleinverbraucher und Verkehr. Die Technologiedatenbank enthält technische, ökonomische und umweltrelevante Daten für alle Energiekonversionstechnologien, die in Deutschland zum Einsatz kommen - Technologien der zentralen Energieversorgung und Endverbrauchertechnologien. *IKARUS* enthält allgemeine makroökonomische Informationen (Bruttosozialprodukt, Bevölkerung, Preise) für die alten und neuen Bundesländer in Deutschland. Auch spezifische Daten für die Subsektoren Raumheizung, Strom- bzw. Fernwärmeerzeugung, Industrie und Verkehr sind verfügbar. Weiterhin enthält *IKARUS* Daten zu allen in Deutschland eingesetzten Primärenergieressourcen (Produktion, Importe, Potentiale) sowie zu den dazugehörigen Gewinnungstechnologien.

ENIS /68/, IER. Das Energie- und Umweltinformationssystem *ENIS* verwaltet spezielle und fachübergreifende Zeitreihen zur Energiewirtschaft. *ENIS* enthält z. B. volkswirtschaftliche Rahmendaten, Energiedaten, Technikdaten, Umweltdaten und Verkehrsdaten. Beliebige Abfragen und Datenanalysen lassen sich durchführen und als Berichte und Grafiken darstellen. Weiterhin stehen vorbereitete Übersichten, Berichte und Grafiken zu allgemeinen Fragestellungen der Energiewirtschaft zur Verfügung.

3.7.3 Makroökonomische Modelle

Makroökonomische Modelle beschreiben die Entwicklung und Wechselwirkungen volkswirtschaftlicher Aggregate. Ziel der makroökonomischen Analyse im Rahmen der Energie- und Umweltplanung ist einerseits die Frage, wie Preis und Verfügbarkeit von Energie makroökonomische Größen, wie das nationale Einkommen, die Arbeitslosigkeit und die Inflationsrate beeinflussen oder wie umgekehrt das Wirtschaftswachstum die Energienachfrage prägt. Andererseits geht es um die Analyse von Steuerungsmöglichkeiten durch fiskalische, ordnungsrechtliche oder ausgabenpolitische Instrumente. Man spricht dann von Totalmodellen, wenn alle Entscheidungsfaktoren und alle Güter, mithin also alle Märkte der Volkswirtschaft berücksichtigt werden /39/. Im Gegensatz dazu stehen Partialmodelle, die nicht alle Märkte enthalten. Gleichgewichtsmodelle analysieren die Bedingungen für die Existenz, Eindeutigkeit und Stabilität von Marktgleichgewichten. Im Marktgleichgewicht sind die Pläne der Anbieter und Nachfrager miteinander kompatibel, Angebot und Nachfrage werden über eine Anpassung der Preise oder der Mengen ins Gleichgewicht gebracht.

Makroökonomische Modelle verwenden einen verhaltensbeschreibenden Ansatz im Gegensatz zu der wirkungsstrukturbeschreibenden Modellierung in systemanalytischen Modellen. Sie beschreiben das Verhalten der ökonomischen Aggregate durch mathematische Schätzfunktionen, die mit Hilfe von Regressions- und Korrelationsanalysen aus Vergangenheitsdaten gewonnen werden und die historische Entwicklung nachempfinden. Der verhaltensbeschreibende Ansatz der Modellbildung hat daher seine Anwendungsgültigkeit ausschließlich für historische Bedingungen. Aussagen für die Zukunft lassen sich nur unter der Annahme ableiten, daß die Bedingungen sich nicht oder nur geringfügig ändern. Neuentwicklungen wie z. B. das Vordringen eines neuen Energieträgers, Substitutionsprozesse, technische Neuerungen oder Strukturwandel können nur schlecht beschrieben werden, deshalb erlauben makroökonomische Modelle nur relativ kurze Planungszeiträume.

Trendanalysen und -prognosen

Trendanalysen und -prognosen verwenden die Zeit als einzige erklärende Größe der Entwicklung. Trendanalysen werden häufig verwendet, um exogene Bezugsgrößen für Energiesystemmodelle zu bestimmen. Sie liefern z. B. Projektionen für das Bruttosozialprodukt, das Bevölkerungswachstum und die Aktivitäten der einzelnen Wirtschaftssektoren. Die Prognosen werden mit Hilfe von Regressionsanalysen aus Vergangenheitsdaten erstellt.

Ökonometrische Modelle

Der ökonometrische Ansatz beschreibt das Verhalten der verschiedenen makroökonomischen Indikatoren mit einem Satz ökonometrischer Gleichungen, deren Parameter mit Hilfe von Regressionsanalysen aus Vergangenheitsdaten bestimmt werden. Produktionsfunktionen

werden eingesetzt, um Produktionsausstoß und preisabhängige Substitution zwischen den Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit und Energie zu beschreiben. Produktionseinsatz- und Ausstoßmengen werden monetär bewertet. Staatlicher und privater Konsum werden mit Hilfe von Nachfragefunktionen abgebildet. Andere Größen wie Investitionen, Importe, Geldnachfrage, Beschäftigung oder Bruttosozialprodukt können ebenfalls in Verhaltensgleichungen beschrieben werden. Der Energiesektor wird als einer der Wirtschaftssektoren sehr aggregiert abgebildet. Ökonometrische Modelle ermöglichen eine konsistente Projektion der makroökonomischen Größen eines Wirtschaftssystems in die Zukunft, wegen der eingangs erwähnten Einschränkungen allerdings nur für kurze bis mittelfristige Zeiträume.

Ein Beispiel ist das am IIASA entwickelte **MACRO**-Modul /52/. Das makroökonomische "Ein-Sektor-Modell" MACRO besteht aus einem Dutzend Gleichungen. Die Entwicklung der Bevölkerung wird exogen vorgegeben. Aus Bevölkerung, realen Löhnen und Arbeitslosigkeitsrate wird die Verfügbarkeit des Produktionsfaktors Arbeit ermittelt. Eine zweite Gleichung beschreibt das verfügbare Kapital als Funktion der Produktivität und des Bruttosozialprodukts. Aus Kapital und Inflationsrate werden die Investitionen ermittelt. Der Konsum hängt zeitverzögert vom verfügbaren Einkommen und vom Konsum in der vorangegangenen Periode ab. Das verfügbare Einkommen ist eine Funktion des Bruttosozialprodukts, der Inflationsrate und der direkten und indirekten Steuern sowie der privaten und öffentlichen Transfers. Die Produktionsfunktion für das Bruttosozialprodukt wird durch eine Cobb-Douglas-Funktion der Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital beschrieben und ist die Summe aus Konsum, Investitionen, Regierungsausgaben und der Handelsbilanz. Ein weiteres makroökonomisches Modell ist **Hermes** /69/ von der EU, ein dynamisches neo-keynesianisches ökonometrisches Sektormodell, das für zwölf Staaten der EU eine mittelfristige Wirtschaftsprognose ermöglicht. Hermes unterscheidet 9 Sektoren, 15 Ausgabenkategorien und 5 Märkte.

Input-Output-Modelle

Input-Outputmodelle (I-O-Modelle) stellen die wechselseitigen Leistungs- und Lieferverpflichtungen der Volkswirtschaft in Form einer Matrix dar, der Input-Output-Tabelle. Diese sogenannte Vorleistungsmatrix dokumentiert für jeden Wirtschaftssektor die monetär bewerteten Vorleistungen aus den anderen Sektoren und beschreibt so die wirtschaftliche Vernetzung. Die Entwicklung der Nachfrage nach Konsumgütern und Investitionsgütern wird dem I-O-Modell exogen vorgegeben. Das I-O-Modell liefert die zur Deckung dieser Nachfrage notwendigen Vorleistungen aller Wirtschaftssektoren und damit das Bruttosozialprodukt, sowie eine konsistente Projektion der Aktivitäten der einzelnen volkswirtschaftlichen Sektoren. Die so projektierten wirtschaftlichen Aktivitäten bilden den Ausgangspunkt der Energiebedarfsanalyse, die wiederum den Energiesystemmodellen als exogene Vorgabe dient. Auch für I-O-Modelle gilt die Einschränkung, daß strukturelle Änderungen des Wirtschaftssystems mit einer statischen Vorleistungsmatrix nicht berücksichtigt werden können.

Das im *IKARUS*-Projekt entwickelte **MIS** /70/ z. B. ist ein dynamisches I-O-Modell

für Deutschland, welches die Volkswirtschaft in 8 Energie- und 22 Wirtschaftssektoren unterteilt. MIS berücksichtigt den technischen Fortschritt sowie die preisinduzierte Substitution zwischen Kapital und Energie und zwischen einzelnen Energieträgern. *MIS* ermöglicht es, die makroökonomischen Auswirkungen verschiedener Treibhausgas-Emissionsminderungsstrategien, die mit dem *IKARUS*-LP-Modell berechnet wurden, abzuschätzen. Weiterhin lassen sich die Wirkungen von CO_2-Steuern auf das Wirtschaftswachstum, den Kapitalstock verschiedener Sektoren und die Beschäftigungssituation berechnen.

3.7.4 Energiebedarfsmodelle

Energiebedarfsmodelle bestimmen den vom Versorgungssystem zu deckenden Energiebedarf einer Volkswirtschaft. Der Energiebedarf hängt von vielen Faktoren wie z. B. Wirtschaftswachstum, Bevölkerungswachstum, Lebensstandard, Energiepreise, Verbraucherverhalten oder Einkommen ab. Zur Analyse des Bedarfs wird die Volkswirtschaft in einzelne Untersektoren strukturiert, deren wirtschaftliche Aktivitäten mit makroökonomischen Modellen oder Trendextrapolationen in die Zukunft fortgeschrieben und dem Energiebedarfsmodell exogen vorgegeben werden. Die Untersektoren sind so gewählt, daß sie einen charakteristischen Energiebedarf besitzen. Mit Hilfe aktivitätsspezifischer Energiebedarfsintensitäten wird dann je nach gewünschter Detaillierung der Analyse für jeden Untersektor der Bedarf an Energiedienstleistung, Nutzenergie oder Endenergie bestimmt. Der Bedarf dient sodann den Energiesystemmodellen, die die Energieumwandlung beschreiben, als exogene Vorgabe. Dieses Verfahren zur Energiebedarfsanalyse wird auch "End-Use-Methode" genannt.

Die Umwandlungsebene der Endenergie ist, wie in Abb. 3-8 dargestellt, die Trennungslinie zwischen Energienachfrage und -versorgung. Endenergie ist die Energieform, die vom Verbraucher eingekauft wird. Diese Trennungslinie auch als Schnittstelle zwischen Energiebedarfs- und Energieversorgungsmodellen zu übernehmen, ist nicht immer sinnvoll, da auch im Nachfragebereich technische Substitutionsvorgänge wie z. B. rationelle Energieanwendung bei den Endverbrauchertechnologien beschrieben werden müssen. Deshalb wurden die Energieversorgungsmodelle zu Energiesystemmodellen erweitert und bilden heute große Teile des Nachfragesektors bis hin zur Nutzenergie oder zur Energiedienstleistung mit ab. Die Energiebedarfsmodelle müssen daher in der Lage sein, den Bedarf je nach Fragestellung auf der gewünschten Umwandlungsebene als Endenergie, Nutzenergie oder Dienstleistung zur Verfügung zu stellen. Beispiele für Energiebedarfsmodelle sind:

MEDEE. Modèle d'Evaluation de la demande En Energie /50/, IEJE. *MEDEE* ist ein technisch-ökonomisches "bottom-up"-Modell zur langfristigen (15-20 Jahre) Bestimmung des Nutzenergiebedarfs und der Endenergienachfrage. *MEDEE* verwendet die "End-Use-Methode" und simuliert das sozio-ökonomische Verhalten der Verbraucher. Schlüsselvariable sind das BSP aufgeschlüsselt nach Wirtschaftssektoren und die Entwicklung der Bevölkerungsgruppen. Hinzu kommen Informationen über den Bestand der Endbenutzertechnologien, ihre Wirkungsgrade und Annahmen über den Marktanteil der Endenergieträger.

MAED. Model for The Analysis of Energy Demand /49/, IAEA, US-DOE. *MAED*, ein Modul des ENPEP Planungsinstruments, ist ebenfalls ein technisch-ökonomisches "bottom-up"-Modell und dient zur Bestimmung der Endenergienachfrage, insbesonders der Stromnachfrage. *MAED* stammt aus der *MEDEE*-Familie und beschreibt die Endenergienachfrage als eine Funktion des Bruttosozialprodukts, der Bevölkerungsentwicklung und der Entwicklung der technischen Parameter der Endbenutzertechnologien. Energiepreise werden bei der Bedarfsbestimmung nicht explizit berücksichtigt. Die Ergebnisse von *MAED* können als Input für *WASP* zur Kapazitätsausbauplanung der Stromerzeugung verwendet werden.

MADE-II. Model for the Analysis of the Demand of Energy /71/, IKE. *MADE-II* ist ein Modul des *MESAP* Planungsinstruments und wurde als Nachfolger für *MAED* entwickelt. In erster Linie sollte es eine größere Flexibilität bei der Darstellung des Nachfragesektors und eine erhöhte Benutzerfreundlichkeit bei der Dateneingabe bieten. *MADE-II* besteht aus einem technisch-ökonomischen Modul zur Ermittlung des Nutz- oder Endenergiebedarfs nach der End-Use-Methode und einem Modul zur Simulation des Energieversorgungssystems. *MADE-II* ist damit gleichzeitig Energiebedarfsmodell und Energiesystemmodell. Ausgangspunkt der Analyse ist eine exogene Projektion der sektoralen wirtschaftlichen Aktivitäten und der Bevölkerung. Dabei kann innerhalb der Haushalte nach Einkommensgruppen unterschieden werden. *MADE-II* bietet die Möglichkeit, ein einfaches makroökonomisches Modul zur Bestimmung des Bruttosozialprodukts zu definieren.

3.7.5 Energieversorgungs- und Energiesystemmodelle

Energiesystemmodelle liefern eine vollständige, technisch orientierte, formale mathematische Beschreibung des gesamten Energiesystems. Das Energiesystem wird in seiner technischen Struktur in Form eines Netzwerks dargestellt. Während Energieversorgungsmodelle ausschließlich den Versorgungssektor (Gewinnung der Primärenergie, Umwandlung, Transport und Verteilung bis zur Endenergie) abbilden, können Energiesystemmodelle auch die Umwandlungen im Nachfragesektor bis hin zum Bedarf an Raum- und Prozeßwärme, an Transportarbeit, an Licht und an Kraft modellieren. Energiesystemmodelle bestimmen aus dem exogen vorgegebenen Bedarf an Nutzenergie oder Energiedienstleistung die Energiebilanz, die Kosten der Energieversorgung sowie die Emissionen des Energiesystems. Da die meisten Instrumente die Struktur des Netzwerks nicht fest vorschreiben, bleibt es dem Benutzer überlassen, wie detailliert er das Energiesystem modellieren will. Er kann das Energiesystem entweder stark aggregiert mit wenigen Technologien beschreiben, oder es sehr detailliert in wirtschaftliche Sektoren, geographische Unterregionen und viele Einzeltechnologien unterteilen. Die Datenfülle hängt von der gewählten Auflösung des Systems ab: je feiner die Energieflüsse nachgebildet werden, desto höher der Datenaufwand.

Energiesystemmodelle ermöglichen eine realitätsnahe, an den technischen Möglichkeiten orientierte Beschreibung des Energiesystems und werden deshalb auch "process-engineering" Modelle genannt. Der technische Ansatz ermöglicht einen hohen Detaillierungsgrad und

verschafft der formalen Beschreibung einer Substitution von Energie durch andere Produktionsfaktoren einen materiell-technischen Inhalt. Er kann aufzeigen, wo Substitutionen ihre naturgesetzlich-technischen und ihre von den Nutzerkriterien beeinflußten Grenzen haben. Energiesystemmodelle können sich bezüglich ihrer Zielsetzung, ihres Abbildungsbereiches und hinsichtlich des mathematischen Ansatzes erheblich unterscheiden. In formaler Hinsicht können die Modelle in lineare und nichtlineare Modelle, in deskriptive Simulationsmodelle und normative Optimierungsmodelle eingeteilt werden, je nachdem, welche Methoden zur mathematischen Beschreibung des Energiesystems herangezogen werden.

Simulationsmodelle

Simulationsmodelle bestimmen für ein vorgegebenes Energiesystem die Energieflüsse sowie die notwendigen Kapazitäten der Technologien im Nachfrage- und Versorgungssektor und berechnen damit Kosten und Umweltauswirkungen. Änderungen im Verbraucherverhalten werden durch die exogene Vorgabe von Technologiemarktanteilen festgelegt. Simulationsmodelle werden "deskriptiv" genannt, weil der Benutzer mit ihnen exploratorisch von ihm vorgegebene denkbare zukünftige Entwicklungen des realen Systems am Modell durchspielen kann. Simulationsmodelle ohne erklärende Verhaltensgleichungen werden wegen der Eigenschaft, über alle Energieflüsse eines Systems buchzuführen, auch "Accounting-Modelle" genannt. Der einfache mathematische Ansatz macht Simulationsmodelle transparent. Die Ergebnisse bleiben auch bei größeren Systemen nachvollziehbar.

MADE-II. Model for the Analysis of the Demand of Energy /71/, IER. MADE-II ist ein Modul des *MESAP* Planungsinstruments zur Energiebedarfsanalyse und zur Simulation des Energiesystems. Das Energiesystem wird von der Nutzenergie bis zur Primärenergie in einem Netzwerk abgebildet. *MADE-II* ermittelt die Energieflüsse durch das System, die Kapazitäten, die Kosten und die Emissionen.

MIDAS /72/, EU. Das modulare *MIDAS* bildet das gesamte Energiesystem eines Landes mittel- bis langfristig ab und ergänzt dabei den "Process-Engineering"-Ansatz der Energiesystemmodelle mit ökonometrischen Ansätzen. Das Nachfragemodul ermittelt die Endenergienachfrage für 12 Sektoren und 18 Energieträger unter Berücksichtigung der relativen Preise, der wirtschaftlichen Aktivitäten, des privaten Einkommens und der technischen Parameter der Umwandlungstechnologien. Dauerlinien für die Stromnachfrage werden erstellt. Demand Side Management (DSM) Maßnahmen werden durch eine Veränderung der Dauerlinien abgebildet. Das Versorgungsmodul bildet detailliert Stromsektor, Raffinerien, Gasversorgung und Kohlegewinnung ab. Die Versorgungsmodule sind über Mengen, Kosten und Preise der einzelnen Energieträger mit dem Nachfragemodul gekoppelt. Ein Preismodul erlaubt es, für jeden Energieträger internationale Preise, Steuern und Preispolitik sowie für Strom und Gas verschiedene Tarifsysteme zu modellieren. Das Impact-Modul berechnet Luft-, Wasser- und Bodenschadstoffe sowie Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und kann eine Monetarisierung der Schäden durchführen. Die MIDAS-Datenbank enthält

25000 Zeitreihen und 15000 Parameter (Elastizitäten, Kosten, technische Daten). MIDAS ist ein partielles Gleichgewichtsmodell und ermittelt eine konsistente Projektion von Energiebedarf, Energieversorgung, Energiepreisen und Energiekosten. Das rechnerisch gelöste System befindet sich für die Energiemärkte in einem Preis- und Mengengleichgewicht. Zusätzlich ermittelt MIDAS Brennstoffverbrauch, Emissionen und Kapazitätsausbaupläne.

POLES. Prospective Outlook on Long-term Energy Systems, Criqui /73/ und /74/, EU. *POLES* ist ein globales Simulationsmodell zur Bestimmung langfristiger Energienachfrage- und Versorgungsszenarien für 14 Weltregionen, das zur Zeit von der EU entwickelt wird. Es verfolgt vier Ziele: die genauere Bestimmung des zukünftigen Weltenergieverbrauchs und der zugehörigen Treibhausgasemissionen, die Erstellung einer globalen Kosten-Nutzen-Analyse für treibhausgasmindernde Maßnahmen auf internationaler Ebene, die Bewertung der Potentiale neuer Versorgungstechnologien und die Analyse der Auswirkungen von treibhausgasmindernden Maßnahmen auf die internationalen Energiepreise und den Energiebedarf. POLES besteht aus einem hierarchischen System von Submodellen, die auf internationaler Ebene die Energiemärkte modellieren, auf regionaler Ebene Energiebilanzen und Treibhausgasemissionen bestimmen und auf nationaler Ebene Nachfrage und Versorgungssystem abbilden. Die Aktivitäten der 12 Wirtschaftssektoren werden über das BSP und die Bevölkerungsentwicklung ermittelt. Das Endenergiebedarfsmodul berücksichtigt Preis- und Einkommenselastizitäten, sowie technische Trends und Sättigungseffekte. Das Technologiemodul bestimmt für 10 neue Technologien die ökonomischen Potentiale anhand des technischen Potentials, der Gestehungskosten (wobei eine Lernkurve vorausgesetzt wird) und der Amortisationszeit. Das Umwandlungsmodul bestimmt die Primärenergienachfrage sehr aggregiert. Nur bei der Stromerzeugung wird der Kapazitätszubau für verschiedene Kraftwerksklassen berücksichtigt. Das Ressourcenmodul berechnet für jede Region die Produktion und Reserven an Kohle, Öl und Gas. Über eine rekursive Simulation werden Energieangebot und -nachfrage unter Berücksichtigung internationaler Energiepreise in ein partielles Gleichgewicht gebracht.

BALANCE. Jusko et al. /75/, IAEA, US-DOE. *BALANCE* gehört zur *ENPEP* Familie und ist ein nichtlineares partielles Gleichgewichtsmodell zur langfristigen Simulation der Energieversorgung. *BALANCE* bildet das Energiesystem eines Landes von der Primärenergie bis zur Nutzenergie in Form eines Netzwerks ab. Energiebedarf und Primärenergiepreise im Basisjahr sowie Kosten und technische Daten der Prozesse werden exogen vorgegeben. Der iterative Lösungsalgorithmus beginnt damit, daß mit Hilfe der Primärenergiepreise im Basisjahr alle Kostengleichungen des Netzwerks gelöst und die Preise der nachgeordneten Energieträger berechnet werden (Up-Pass, von der Primärenergie zur Nachfrage). In einem zweiten Schritt wird der Energieverbrauch im Netzwerk aus der exogen vorgegebenen Nachfrage bestimmt (Down-Pass). Die Marktanteile konkurrierender Technologien werden jedoch nicht exogen vorgegeben, sondern über das Verhältnis der relativen Preise mit einer Logitfunktion bestimmt. Sind die im Down-Pass berechneten Inputs an Primärenergie von den ursprünglichen Annahmen verschieden, wird mit Hilfe von Angebotskurven ein neuer Primärenergie-

preis abgeschätzt. Mit diesen Preisen beginnt wiederum der Up-Pass. Die Berechnung wird so lange wiederholt, bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Die Mengen der Energieträger sind für den gesamten Planungshorizont daher in einem Marktgleichgewicht.

SAFIRE. Strategic Assessment Framework for the Implementation of Rational Energy /76/, EU. *SAFIRE* ist ein Simulationsmodell für die Strom- und Wärme-Versorgung auf lokaler und regionaler Ebene für EU-Länder. Ziel des Modells ist es, volkswirtschaftliche Auswirkungen und Marktpotentiale neuer Energieversorgungstechnologien abzuschätzen. Bedarfsseitige Maßnahmen können allerdings nicht analysiert werden. Der Endenergiebedarf wird für 53 verschiedene Sektoren mit Hilfe von spezifischen Bedarfskennziffern aus den wirtschaftlichen Aktivitäten ermittelt. Dabei werden sieben verschiedene Energiedienstleistungen unterschieden. Der Marktanteil neuer Versorgungstechnologien wird aus dem technischen Potential, einem Marktpotential (logistische Funktion in Abhängigkeit der Amortisationsdauer) und einer logistischen Marktdurchdringungsfunktion ermittelt. Die Dauerlinie des restlichen Energiebedarfs wird durch zentrale Versorgungstechnologien gedeckt, die in der Reihenfolge ihrer Kosten eingesetzt (dispatched) werden. Sind die Marktanteile aller Technologien ermittelt, wird eine Kosten-Nutzenanalyse für das Szenario durchgeführt. Bewertet werden die Schaffung von Arbeitsplätzen, der Investitionsbedarf, die Schadstoffemissionen, der erwirtschaftete Mehrwert, Staatsausgaben, Importabhängigkeit und externe Kosten. Diese Effekte werden anhand von Technologiekennziffern bewertet. Die Datenbank enthält Informationen über fossile und erneuerbare Ressourcen, technische und Kostendaten, spezifische Bedarfskennziffern sowie Preise und Steuern für 10 konventionelle Endenergieträger.

EM. Environmental Manual /77/, World Bank/GTZ. *EM* evaluiert Kosten und Umweltauswirkungen von alternativen Energieversorgungssystemen zur Stromerzeugung. Die Systeme werden als Technikketten dargestellt, die die Umwandlung der Energie von der Ressource bis zur Endenergie abbilden und auch die vorgelagerten Prozesse für die Herstellung des Energiesystems berücksichtigen (Life-Cycle-Analyse). *EM* basiert auf dem *GEMIS*-Modell /78/ des Öko-Instituts Darmstadt.

Optimierungsmodelle

Optimierungsmodelle sind ebenfalls technologieorientierte Energiesystemmodelle. Statt wie im Simulationsmodell die Marktanteile der einzelnen Technologien oder Brennstoffe exogen vorzugeben, werden diese Anteile durch Optimierung einer Zielfunktion unter Berücksichtigung von Erhaltungsgleichungen und Restriktionen ermittelt. Die Zielfunktion beschreibt in der Regel die gesamten diskontierten Systemkosten. Die Zielfunktion kann auch andere Elemente enthalten, wie z. B. die zu minimierenden Gesamtemissionen. Restriktionen können für Kapazitäten, Kosten, Zubauraten, Energieströme, Emissionen, Ressourcenverfügbarkeit und Marktdurchdringungsraten festgelegt werden. Ausgehend von dem exogen vorgegebenen Bedarf an Endenergie, Nutzenergie oder Energiedienstleistung, den Technologiekosten, den Energiepreisen und den Restriktionen bestimmen Optimierungsmodelle das kostenoptimale

Versorgungssystem, d.h. den Technologie- und Brennstoffmix, der den Bedarf mit den geringsten Systemkosten deckt. Die Marktanteile der Technologien und Brennstoffe sind im Gegensatz zu Simulationsmodellen Ergebnisse der Berechnung (Variable). Die Optimierung ermittelt also die kostenoptimale Strategie. Sie wird auch "normativ" genannt, weil hier die Rahmenbedingungen, in denen sich Strategien bewegen können, vorgegeben werden.

Optimierungsmodelle sind dann "statisch", wenn sie die Optimierung nur für eine Periode durchführen. "Quasi-dynamisch" sind sie, wenn sie die Minimierung der Kosten in jeder Periode durchführen und das Ergebnis Ausgangspunkt für die Optimierung in der nächsten Periode ist. Sie sind "dynamisch", wenn sie die Optimierung über den gesamten Modellierungszeitraum gleichzeitig durchführen. Mathematische Verfahren, die für die Optimierung eingesetzt werden, sind die lineare Programmierung (LP), die nichtlineare Programmierung (NLP) und die dynamische Programmierung (DP). Wenn mehrere Zielvorstellungen optimiert werden sollen, wird die Technik der "multiobjective LP" eingesetzt. Unsicherheitsaspekte werden mit der Technik "stochastisches LP" in der Optimierung berücksichtigt.

Typische Vertreter für prozeßtechnische multiperiodische dynamische lineare Optimierungsmodelle (LP-Modelle) sind **EFOM-12C / EFOM-ENV** (Energy Flow Optimization Model /45/, EU), **MARKAL** (Market Allocation Model /47/, IEA/ETSAP) und **MESSAGE** (Model for Energy Supply Systems and Their General Environmental Impact /44/, IIASA) und **E^{3}Net** /79/. Alle bilden das Energiesystem als technologieorientiertes Netzwerk ab. Während *EFOM* und *E^{3}Net* flußorientierte LP-Modelle sind, die jeden Energiefluß durch eine Technologie als Variable abbilden können, sind *MARKAL* und *MESSAGE* prozeßorientierte LP-Modelle, die pro Umwandlungstechnologie nur eine Aktivitätsvariable zulassen. Alle anderen Umsatzgrößen sind zu dieser Aktivität proportional. Der Bedarf kann als Energiedienstleistung, Nutzenergie oder Endenergie vorgegeben werden. Restriktionen für Emissionsgrenzwerte, maximale Marktdurchdringungs- und Zubauraten oder maximale Ausbeutungsraten von Ressourcen können festgelegt werden. Für eine vorgegebene Nachfrage werden die gesamten Energieflüsse durch das Netzwerk, sowie der Primärenergieverbrauch und die notwendigen Investitionen in den Ausbau des Energiesystem berechnet. Einfache Lastaspekte können bei der Modellierung der Stromerzeugung berücksichtigt werden. Eine mathematische Option zur Simulation des Energiesystems ist für *EFOM* und *MESSAGE* verfügbar, wird jedoch selten genutzt. *EFOM* und *MESSAGE* besitzen keine bedienerfreundliche Benutzeroberfläche. *MARKAL* dagegen hat mit dem *MARKAL*-User-Support System *MUSS* /55/ eine komfortable Bedieneroberfläche.

WASP. Wien Automatic System Planning /41//42/, IAEA/US-DOE. *WASP* ist ein Modell zur langfristigen Kapazitätsausbauplanung des Stromerzeugungssektors und wird seit den fünfziger Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. In der *ENPEP*-Version (*WASP* heißt dort *ELECTRIC*) besitzt es heute eine benutzerfreundliche Oberfläche. *WASP* minimiert die Kosten des Kapazitätszubaus eines Stromerzeugungssystems mit der Methode der dynamischen Programmierung. Dabei werden explizit die Wartungspläne und die Ausfallwahrscheinlichkeit der Kraftwerke sowie die Unsicherheit in der Verfügbarkeit des Wasserkraftpotentials

berücksichtigt. Die Stromnachfrage wird in Form einer Dauerlinie für bis zu zwölf Perioden des Jahres vorgegeben. *WASP* berücksichtigt die zum Zeitpunkt der Studie schon bestehenden und im Bau befindlichen Kraftwerke, sowie ihre Lebensdauer. Restriktionen für die Verfügbarkeit des Gesamtsystems können vorgegeben werden (loss of load probability, energy not served). Aus den Investitionskosten, Betriebskosten und Wartungskosten der Kraftwerke berechnet *WASP* die Gesamtkosten eines vorgegebenen Ausbauplans oder bestimmt den kostenoptimalen Ausbauplan zur Deckung der vorgegebenen Stromnachfrage.

Simulation oder Optimierung?

In wissenschaftlichen Debatten wird oft kontrovers diskutiert, welche Methode für die Energie- und Umweltplanung besser geeignet ist: Simulation oder Optimierung, große detaillierte oder kleine aggregierte Modelle. Prinzipiell entscheidet jedoch die Fragestellung und die Zielsetzung einer Untersuchung, was sinnvoller ist: "General scientific principles suggest that the smallest adequate model is preferable to any larger model. ... it seems reasonable to begin any model application with a minimum size model, i.e. the smallest that gives an answer relative to the problem" /103/.

In der strategischen Energieplanung wird die Szenariotechnik eingesetzt, um Unsicherheiten zu berücksichtigen und verschiedene mögliche Entwicklungen des zukünftigen Energiesystems durchzuspielen. Szenarien besitzen exploratorischen Charakter, denn sie nehmen Entscheidungen vorweg. Durch den Vergleich zweier Szenarien lassen sich Auswirkungen von Entscheidungen analysieren. Während der Modellierer bei Simulationsmodellen den Entwicklungspfad des Energiesystems direkt vorgibt, wird bei Optimierungsmodellen der Entscheidungsraum durch Vorgabe von Restriktionen eingeschränkt, um dann in der Regel die kostenoptimale Strategie zur Gestaltung des Energiesystems zu bestimmen. Das Wort "optimal" ist hierbei irreführend, da das Optimum nur in Bezug auf die vorgegebenen Restriktionen gilt. Verschiedene Szenarien führen zu verschiedenen "optimalen" Lösungen. Werden alle Freiheitsgrade eingeschränkt (z. B. durch Restriktionen für alle Marktanteile), werden Optimierungsmodelle zu Simulationsmodellen. Der Übergang vom Optimieren zum Simulieren ist fließend. "It is suggested that when optimization models are applied for long-term energy planning, they are not significantly different from simulation models. It is also suggested that normative models be used for energy planning only where the normative variables are well-controlled in real life" /103/. Besonders bewährt hat sich der Einsatz von Optimierungsmodellen in denjenigen Bereichen des Energiesystems, in denen die technischen und ökonomischen Modellparameter relativ genau bekannt sind, wie z. B. bei der Einsatzplanung in Stromerzeugungssystemen oder Raffinerien.

In der langfristigen Energiesystemplanung wird Optimieren immer ähnlicher dem Simulieren, weil die Entwicklungspfade immer stärker exogen vorgegeben werden, und daher die Restriktionen immer bestimmender für die Systemlösung werden. Optimierungsmodelle sind von ihrer Handhabbarkeit her für die Simulation jedoch nicht besonders geeignet, da alle Mo-

dellrestriktionen immer eingehalten werden müssen, um das System lösen zu können. Dies widerspricht dem explorativen Charakter der Simulation, denn der Modellierer will oft wissen, welche Restriktionen verletzt werden, wenn er eine konkrete Vorstellung von der Entwicklung des Energiesystems antizipiert. Die daraus resultierende Schwerfälligkeit in der Handhabung von LP-Modellen führt dazu, daß interessante Optionen aus Zeitgründen oft nicht berechnet werden können. Hinzu kommt, daß die Minimierung der Kosten nicht identisch mit dem Entscheidungsproblem sein muß. Andere Zielsetzungen wie Umweltschutz, Arbeitsplatzeffekte oder soziale Akzeptanz können eine ebenso wichtige Rolle spielen.

Ein wesentlicher Vorteil der Optimierung gegenüber der Simulation ist ihre Fähigkeit, Schattenpreise der Energieträger zu berechnen (long run marginal cost). Diese für die ökonomische Analyse sehr wertvolle Information gibt an, wieviel die Produktion einer zusätzlichen Energieeinheit kosten würde, was sich mit Simulationsmodellen nur sehr umständlich bestimmen läßt. Optimierungsmodelle sind auch geeignet, zu untersuchen, wie sich ein System verändert, wenn ihm neue Restriktionen aufgezwungen werden. Das Optimierungsmodell liefert sofort ein Ergebnis, in dem alle Restriktionen eingehalten werden, während das Simulationsmodell sich erst durch viele Rechenläufe an dieses Ergebnis herantasten muß.

Ein Nachteil von LP-Modellen ist die geringe Transparenz der Ergebnisse, die insbesonders bei detaillierten Modellen ins Gewicht fällt und die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse erschwert /10/. "Theoretically a Linear Program model is rather transparent, in particular if good use is made of features provided by the LP solver. In practice, however, tracing results of a large case back to its inputs is difficult and requires a lot of experience and familarity with the LP-approach" /103/.

Eine Kombination beider Techniken bietet sich an. So kann die Lösung des Optimierungsmodells im Simulationsmodell als Ausgangspunkt für die Exploration dienen und eine Sensitivitätsanalyse der optimalen Lösung unter Vermeidung des unerwünschten "Penny-Switching" ermöglichen (bei LP-Modellen können kleine Veränderungen der Inputgrößen große Veränderungen der Ergebnisse bewirken). Auch können einzelne Bereiche des Energiesystems optimiert werden, wie die Stromerzeugung oder der Raffineriesektor, wobei die Optimierungsergebnisse dann in die Simulation des restlichen Systems eingebettet werden.

3.7.6 Modulare Planungsinstrumente

Modulare Planungsinstrumente evaluieren die Auswirkungen energiepolitischer Strategien auf die gesamte Volkswirtschaft. Dazu unterteilen sie die Volkswirtschaft in die Subsysteme Wirtschaft, Energiebedarf, Energieversorgung und Umwelt wie es die Abb. 3-9 zeigt. Die Trennung erfolgt an Stellen schwacher Verknüpfung. Jedes Subsystem wird mit der geeignetsten Methode modelliert. Die einzelnen Teilmodelle der Subsysteme werden gekoppelt, um die Fragestellungen ganzheitlich zu untersuchen. Durch eine iterative Anwendung der Modelle wird das Optimum des gesamten Systems näherungsweise erreicht. Probleme ergeben sich, wenn die Aggregationsniveaus der einzelnen Module zu unterschiedlich sind.

Modulare Planungssysteme nutzen verschiedene methodische Ansätze, um eine integrierte Beschreibung der Energieproblematik zu erlangen. Ein **makroökonomisches Modell** beschreibt die langfristige Entwicklung der Nachfrage und ermittelt die globalen ökonomischen Führungsgrößen. Die Verflechtungen der volkswirtschaftlichen Sektoren und Produktionsstrukturen werden mit Input-Output-Tabellen abgebildet. Ein **Energiebedarfsmodell** ermittelt nach der "End-Use-Methode" aus den wirtschaftlichen Indikatoren Aussagen über den induzierten Bedarf nach Dienstleistungen, Nutzenergie oder Endenergie. Ein **Energieversorgungsmodell** berechnet das Energiesystem zur Deckung der Nachfrage. Hierbei werden Simulations- oder Optimierungsmodelle verwendet, um Energie-, Kosten- und Emissionsbilanzen zu ermitteln. Das **IMPACT-Modell** berechnet die Auswirkungen der Energieversorgung auf den Arbeitsmarkt, den Kapitalmarkt, die Umwelt, die Ressourcen und die menschliche Gesundheit. Im folgenden werden einige Beispiele für modulare Planungsinstrumente vorgestellt:

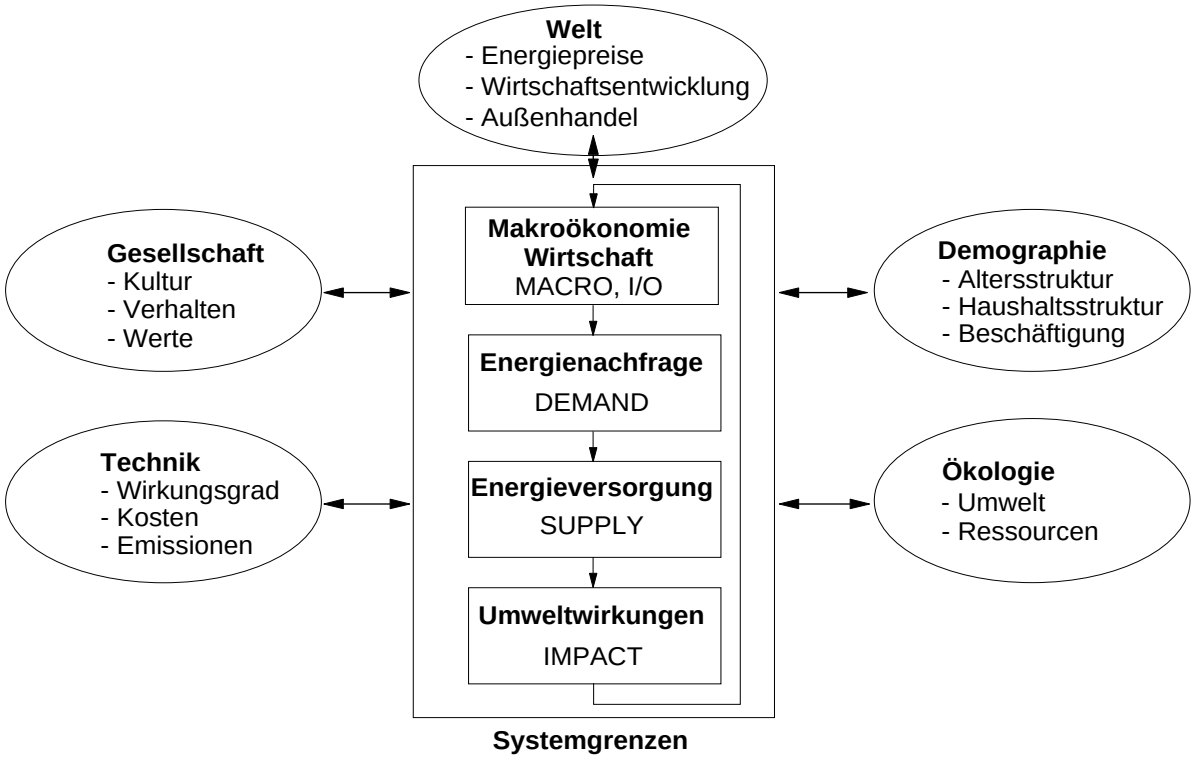


Abb. 3-9: Systemdiagramm eines modularen Planungssystems

MESAP. Microcomputer based Energy Sector Analysis and Planning System /58//64/, IER. *MESAP* verwendet die Module *MADE-II* /71/ und *MAED* /49/ für die Energiebedarfsanalyse und zur Simulation der Energieversorgung. *MESSAGE* /44/, ein LP-Modell, wird zur Optimierung des Energieversorgungssystems verwendet und *WASP* /41//42/ ermöglicht die kostenoptimale Ausbauplanung der Elektrizitätsversorgung mit Hilfe der dynamischen Programmierung. Das Modul *INCA* /80/ erlaubt eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung von einzelnen Kraftwerken. Die hierarchische Datenbank *RSYST* /81/, die in den 70er Jahren an der Universität Stuttgart entwickelt wurde, integriert die Modelle und wird als Energieinformationssystem zur Verwaltung statistischer Zeitreihen und Energiebilanzen eingesetzt. Werkzeuge zur graphischen Darstellung, zur Regressions- und Korrelationsanalyse stehen zur Verfügung. *MESAP* wurde ursprünglich für den Einsatz in Entwicklungsländern konzipiert. Die hier vorliegende Arbeit ist eine Weiterentwicklung von *MESAP*, wobei die Datenbank RSYST und das Simulationsmodell MADE-II durch Neuentwicklungen ersetzt werden.

ENPEP. The Energy and Power Evaluation Program /56/, IAEA/US-DOE. ENPEP verfolgt zwei Pfade: die Analyse von Energiesystemen und von Stromerzeugungssystemen. Die Analyse von ganzen Energiesystemen wird mit *MACRO*, einem Modul zur einfachen makroökonomischen Trendprojektion, *DEMAND* zur Bestimmung der Energienachfrage und *BALANCE* zur Simulation des Versorgungssystems durchgeführt. Der optimale Ausbau des Stromerzeugungssystems wird dagegen mit den Modulen *MAED* (Stromnachfrage), *LDC* (Ermittlung der Jahresdauerlinie der Energienachfrage), *PLANTDATA* (Technologiedaten), *ELECTRIC* (PC-Version von *WASP*, langfristige Ausbauplanung) und *IKARUS* (kurzfristige Einsatzplanung) vorgenommen. *ELECTRIC* ermittelt die langfristigen Grenzkosten (long run marginal cost) und *IKARUS* die kurzfristigen Grenzkosten (short run marginal cost). Zur Bestimmung der Umweltauswirkungen und des Ressourcenverbrauchs von Energiesystem oder Stromerzeugungssystem wird für beide Pfade das Modul *IMPACTS* eingesetzt.

ETB. The Energy Toolbox /62/, ERL. *ETB* ist ein kommerziell vertriebenes Planungssystem mit Modulen auf drei Ebenen, die durch eine Datenbank verbunden sind. Level A umfaßt als Kern des Systems das Modul *RES*, welches das Versorgungssystem als Netzwerk simuliert und alle Informationen über die Umwandlungstechnologien enthält (Nutzungsgrade, Kosten, Kapazitäten). Weiterhin enthält *ETB* auf dieser Ebene einen Reportgenerator zur Erstellung von Auswertungsberichten und Energiebilanzen und ein Modul zur graphischen Darstellung des Netzwerks. Auf Level B analysiert das Modul *DDAS* (Disaggregated Demand Analysis System) detailliert den Energiebedarf für verschiedene Wirtschaftssektoren und Unterregionen. Dabei lassen sich beliebige, auch ökonometrische Gleichungen zwischen den bestimmenden Variablen aufstellen. Das Modul *DDAS* (Level B) liefert den Input für das Simulationsmodul *RES* (Level A). Alternativ kann das Energiesystem mit dem Modul *LP-ESPS* (Energy Supply Planning Package) als LP-Problem formuliert werden. Das Optimierungsmodell bestimmt die kostenoptimale Entwicklung der Marktanteile der Umwandlungstechnologien und der Energieträger unter Berücksichtigung von Restriktionen für die Verfüg-

barkeit der Ressourcen und des Kapazitätszubaus. Auf dem Level C befinden sich Module für spezielle Fragestellungen, wie *AESOP* (Alternative Electricity Opportunities Programm) zum optimalen Ausbau eines Kraftwerkparks zur Stromerzeugung oder *FREDA* (Framework for Rural Energy Decision Analysis), das zur detaillierten Analyse der ländlichen Energieversorgung mit kommerziellen und nichtkommerziellen Energieträgern zugeschnitten ist. *ETB* besitzt eine benutzerfreundliche Oberfläche mit Menüsteuerung, Dateneingabemasken und einem Online-Hilfesystem. *ETB* wurde vorrangig für den Einsatz in Entwicklungsländern konzipiert.

LEAP. Long Range Energy Alternatives Planning /63//82/ TELLUS. *LEAP* besteht aus einem Simulationsmodell zur Berechnung von Energieszenarien, einem Modul zur tabellarischen Aggregation von Ergebnissen und einer Umweltdatenbank. Das Simulationsmodell bilanziert die physikalischen und ökonomischen Flüsse des Energiesystems vom Bedarf über die Umwandlung bis zu den Ressourcen (accounting framework, end-use driven). Es besteht aus den Modulen "Demand", "Transformation", "Biomass", "Environment" und "Evaluation". Zur Bestimmung der Endenergienachfrage strukturiert "Demand" die Volkswirtschaft vierstufig in Sektor, Subsektor, Nutzenergie (end-use) und Endbenutzertechnologie. Der Energiebedarf wird aus Aktivitäten und Marktanteilen abgeleitet. Mit Hilfe von "Driver"-Variablen lassen sich ökonometrische Gleichungen für die wirtschaftlichen Aktivitäten aufstellen. Das Modul "Transformation" ist in prozeßorientierte Energieversorgungsmodule gegliedert und berechnet den Primärenergiebedarf des Systems sowie die Energiebilanz des Umwandlungssektors. Die Verfügbarkeit erschöpfbarer und erneuerbarer Ressourcen wird berücksichtigt. "Biomass" ermöglicht die detaillierte Modellierung der Landnutzung zur Bestimmung des Biomasseangebots. Hier offenbart *LEAP* seine Herkunft, denn es wurde wie *MESAP* ursprünglich für den Einsatz in Entwicklungsländern konzipiert und zu Beginn der 80er Jahre zum ersten Mal in Kenya eingesetzt. Heute wird es auch für die USA und globale Studien verwendet. "Environment" bestimmt die Umweltauswirkungen des Energiesystems. Dazu steht eine Umweltdatenbank *EDB* mit Kennziffern für Luft- und Wasserschadstoffe sowie Abfallaufkommen, Landverbrauch und Gesundheitsauswirkungen zur Verfügung. "Evaluation" ermöglicht eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Bewertung verschiedener Szenarien.

SUPER/OLADE-BID /61/, OLADE-IDB. *SUPER/OLADE* ist ein Instrument zur Ausbauplanung von Stromerzeugungssystemen mit Schwerpunkt auf der Modellierung von Wasserkraft unter Berücksichtigung hydrologischer Unsicherheiten. *SUPER/OLADE* setzt Optimierungs- und Simulationstechniken ein. Das Energiebedarfsmodell berücksichtigt Ganglinien, Jahresdauerlinien und erneuerbare Energiequellen, es enthält jedoch keine makroökonomischen Zusammenhänge. Mehrere Optimierungsmodule zur Ausbau- und Einsatzplanung von Wasserkraftwerken und thermischen Kraftwerken sind verfügbar, wie z. B. *WASP*. Ein Finanzmodul ermöglicht die finanzielle Analyse des betreffenden Energieversorgungsunternehmen (EVU). Die Umweltauswirkungen der Stromerzeugung sowie regionale Kosten und Nutzen werden mit Hilfe von dem *ENPEP*-Modul *IMPACT* berechnet.

IKARUS Modellsystem /83/, KFA/BMFT: Das *IKARUS* Modellsystem wurde zur Analyse von treibhausgasmindernden Maßnahmen in Deutschland entwickelt. Es umfaßt ein statisches technologieorientiertes LP-Modell zur Beschreibung Ost- und West-Deutschlands und vier Simulationsmodelle für die Subsektoren Raumheizung, Strom- und Fernwärmeerzeugung, Industrie und Verkehr. Das LP-Modell minimiert die gesamten Systemkosten für einen vorgegebenen CO_2-Grenzwert. *IKARUS* umfaßt weiterhin ein Modell zur vergleichenden Analyse von Technikketten und das makroökonomische Modell *MIS*, das auf einem dynamischen Input-Output-Ansatz basiert.

ENERPLAN /84/, UNDTCD: *ENERPLAN* wurde für den Einsatz in Entwicklungsländern konzipiert und koppelt ein makroökonomisches Modell mit einem Simualtionsmodell des Energiesektors. Es erstellt Energiebilanzen für jedes berechnete Jahr und enthält eine Datenbank für statistische Energie- und Wirtschaftsdaten und erlaubt Regressionsanalysen.

TEESE. TERI Energy Economy Simulation and Evaluation Model /85/, Tata Energy Research Institute (TERI), India. *TEESE* umfaßt ein Input-Output-Modell zur Bestimmung des Energiebedarfs gekoppelt an ein statisches LP-Modell zur Optimierung des Energieversorgungssektors. *TEESE* wurde für den Einsatz in Entwicklungsländern konzipiert.

SESAM. The Sustainable Energy Systems Analysis Model /86/, Aalborg University. *SESAM* ist ein Instrument zur Planung lokaler und regionaler Energiesysteme. Es strukturiert die Systeme geographisch in Regionen (Domains) und lokale Energiesysteme. Lokale Energiesysteme bestehen aus einem Endbenutzersystem (end-use system, *EUS*), einem Umwandlungs- und Verteilungssystem (energy conversion and transmission system, *ECTS*) und den Energieressourcen (system of energy sources, *ES*). Endbenutzersysteme lassen sich zur Bestimmung des Wärmebedarfs weiter in Distrikte unterteilen. Die lokalen Energiesysteme sind über das zentrale elektrische Stromnetz gekoppelt und können Strom importieren und einspeisen. Das Endbenutzersystem *EUS* enthält Gebäude, energieverbrauchende Geräte sowie Personen- und Nutzfahrzeuge. Auch ein Modell zur Bestimmung des Raumwärmebedarfs von Gebäuden und des Strombedarfs von Haushalten ist verfügbar. Das Umwandlungssystem *ECTS* bildet alle Umwandlungs-, Speicher- und Verteilungstechnologien für die gekoppelte und ungekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme sowie für die industrielle Prozeßwärmeerzeugung ab. Das Ressourcensystem *ES* beschreibt alle erneuerbaren und erschöpfbaren Energieträger und ihre Gewinnungstechnologien. *SESAM* berechnet mit einer Auflösung von bis zu 15 Minuten die zur Deckung des Bedarfs notwendigen jährlichen und monatlichen Energieflüsse, die daraus resultierenden Emissionen, die Kapazitäten der Umwandlungstechnologien und Speicher sowie die Kosten des zukünftigen Energiesystems. Die Datenbank enthält neben der Struktur des Energiesystems (Kapazitäten, Verfügbarkeit) qualitative und quantitative Technologiedaten, meteorologische Daten, Bedarfsdaten (auch als Tagesgänge), sowie Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Brennstoffkosten. Die Datenbank unterstützt die Szenariotechnik sowie die Darstellung und Aggregation von Ergebnissen.

3.7.7 Energiewirtschaftsmodelle

Technologieorientierte "bottom-up/engineering" Energiesystemmodelle sind in der Abbildung des Energiesystems sehr realitätsnah, können jedoch den Mechanismus des Marktgleichgewichtes und der Preisbildung sowie das ökonomische Verhalten der Marktteilnehmer nur unvollkommen darstellen. "Top-down/macroeconomic" orientierte gesamtwirtschaftliche Modelle sind dagegen in der Lage, indirekte Effekte und Rückkopplungen sowie die Veränderungen makroökonomischer Größen (Preise, Wirtschaftswachstum, Beschäftigung, Wettbewerbsfähigkeit) zu erfassen und außerdem das mikroökonomische Verhalten der Marktteilnehmer abzubilden. Sie aggregieren den Energiesektor jedoch so stark, daß die technischen Optionen und Restriktionen nicht mehr realistisch darstellbar sind. Energiewirtschaftsmodelle wurden entwickelt, um den "top-down" mit dem "bottom-up" Ansatz zu vereinen und geschlossen in einem Modell abzubilden. Energiewirtschaftsmodelle werden eingesetzt, wenn die Wechselwirkungen zwischen Energiewirtschaft und nichtenergetischen Produktions- und Konsumaktivitäten der übrigen Volkswirtschaft nicht vernachlässigt werden dürfen. Sie ermöglichen eine volkswirtschaftlich konsistente Analyse langfristiger energiepolitischer Strategien und können Zielkonflikte mit anderen wirtschaftspolitischen Vorgaben sichtbar machen. Sie werden zur Analyse und Bewertung von Strategien zur Minderung der Treibhausgasemissionen (gesetzliche Auflagen, Steuern, Quoten oder Zertifikate) eingesetzt.

Bei Energiewirtschaftsmodellen unterscheidet man Partialmodelle, die sich auf den Markt des Energiesektors beschränken und Totalmodelle, die die gesamte Volkswirtschaft erfassen. Partielle Gleichgewichtsmodelle verwenden einen neoklassischen makroökonomischen Modellansatz, der das Niveau der Energiepreise und der Energienachfrage über ein Marktgleichgewicht ermittelt. Veränderungen in den nichtenergetischen Wirtschaftssektoren sowie Auswirkungen auf die anderen Produktionsfaktoren können jedoch nicht quantifiziert werden.

Beispiele für partielle Gleichgewichtsmodelle sind das "National Energy Modeling System" **NEMS** /87/ des Department of Energy (DOE) in den USA und **PRIMES**, "A Computable Price-Driven Partial Equilibrium Model of the Energy System and Markets for Europe" /88/, eine Entwicklung der EU. Beide Modelle besitzen eine ähnliche Struktur und verwenden den gleichen Lösungsansatz. *PRIMES* ist ein langfristiges Planungsinstrument (1990-2030), das mit Hilfe eines Preisbildungsmechanismus ein Marktgleichgewicht für die jeweiligen Güter der Energiemärkte auf nationaler und europäischer Ebene ermittelt. Diese Markträumung in *PRIMES* ermöglicht es, marktorientierte energiepolitische Maßnahmen zu analysieren und die zunehmende Liberalisierung der Energiemärkte in Europa realistisch nachzubilden. *PRIMES* ist modular aufgebaut und kombiniert technologieorientierte Module zur Beschreibung einzelner Sektoren des Energiesystems mit einem marktorientierten Integrationsmodul, welches die Module iterativ koppelt. Alle Optimierungsmodule sind quasi-dynamisch (myopisch, "kurzsichtig"), d. h. sie optimieren jede einzelne Periode individuell. Das Bedarfsmodul besteht aus neun nichtlinearen Simulations- und Optimierungsmodulen für die Sektoren Haushalte, Kleinverbraucher, Industrie (6 Subsektoren) und Transport. Drei

Optimierungsmodule bilden die Stromversorgung (50 konventionelle und erneuerbare Technologien, Lastganglinien, Kraft-Wärme-Koppelung), die Raffinerien (4 Typen) und den Gassektor (weltweit) ab. Ein Kohlemodul ermittelt die Preisbildung auf dem weltweiten Kohlemarkt. Insgesamt werden 18 verschiedene Energieformen (9 Nutz-, 4 End-, 5 Primärenergieträger) berücksichtigt. Die Märkte für Strom, Fernwärme, Gas und Mineralölprodukte werden durch einen repräsentativen Anbieter und einen Konsumenten dargestellt, dessen ökonomisches Verhalten über Angebots- und Nachfragefunktionen modelliert wird. Die Energiemärkte der 15 Mitgliedsländer werden über Preise ins nationale Gleichgewicht gebracht. Anschließend werden für Öl- und Gasmarkt Angebot und Nachfrage auf EU-weiter Ebene ins Gleichgewicht gebracht. Das europaweite Strom- und Gasnetz sowie internationale Versorgungsverträge werden hier modelliert. Das Integrationsmodul ermittelt die Gesamtlösung durch eine iterative Prozedur. Dazu wird zuerst die Nachfrage für einen Startwert der Endenergiepreise bestimmt. Die Versorgungsmodule berechnen dann den zur Deckung des Bedarfs notwendigen Primärenergieverbrauch und die Kosten des Versorgungssystems. In der Folge bestimmt ein Preismodul die neuen Preise für die Endenergieträger unter Berücksichtigung eventueller Steuern. Sind diese Preise unterschiedlich von der Startannahme, wird die Iteration mit dem Bedarfsmodul wiederholt und so eine neue Nachfrage ermittelt. Als Ergebnis liefert PRIMES jährliche Energiebilanzen aller EU-Länder, Projektionen des endogenisierten Endenergiebedarfs, der Energiekosten, der Anbieter- und Konsumentenpreise. Weiterhin werden die Energieflüsse, die Kapazitäten und die Kosten der Versorgungssysteme, das Potential neuer Technologien und das Einsparpotential ermittelt. Das Umweltmodul bewertet die durch das Energiesystem hervorgerufenen Umweltschäden (CO_2, NO_x und SO_2). Im Vordergrund der Analyse stehen dabei der Treibhauseffekt und der "saure Regen". Weiterhin wird über eine Ausbreitungsrechnung die Immission und Deposition dieser Stoffe in Europa bestimmt. Anschließend werden die Gesundheitsschäden, die Schäden am Ökosystem (Landwirtschaft, Wälder, natürliche Ökosysteme), materielle Schäden und die Schäden durch die Erwärmung der Erdatmosphäre mit jeweils einer Schätzfunktion monetarisiert.

Energiewirtschaftsmodelle, die auf dem allgemeinen Gleichgewichtsmodellansatz basieren, bilden alle Märkte der Volkswirtschaft ab. Sie integrieren die technologieorientierte "bottom-up" Darstellung des Energiesystems (üblicherweise in Form eines LP-Modells) mit der "top-down"-Modellierung der Volkswirtschaft (ökonometrisches oder Input-Output-Modells). Diese auch E^3-Modelle (Energy, Economy, Environment) genannten Planungsinstrumente können neben den Rückkopplungen der Energiepreise auf den Energiebedarf auch die Reaktionen des Kapital- und Arbeitsmarktes auf Preisänderungen bestimmen und die Auswirkungen von emissionsmindernden Maßnahmen auf das Wirtschaftswachstum und andere makroökonomische Größen analysieren. Der Ansatz der allgemeinen Gleichgewichtstheorie basiert auf dem Konzept des vollständigen Wettbewerbs. Wettbewerbsverzerrungen durch Monopole oder Oligopole können nicht modelliert werden. Wegen der Komplexität des methodischen Ansatzes werden die beiden Teilsysteme Volkswirtschaft und Energiesystem im Vergleich zur individuellen Modellierung vereinfacht abgebildet. Viele Modelle ver-

wenden daher den Ansatz eines einzigen repräsentativen Produzenten bzw. Verbrauchers. Das Wirtschaftswachstum wird mit Hilfe einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion (CD-PF) oder einer Input-Output-Analyse (Leontief, IO) beschrieben, in der die Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit und Energie über geschachtelte CES-Funktionen ("constant elasticity of substitution") eingehen. Die Nachfrage nach Endenergie oder Nutzenergie wird über Preiselastizitäten endogenisiert. Energie kann durch andere Produktionsfaktoren substituiert werden, neue Energieträger und Technologien können in den Markt kommen. Der technische Fortschritt bei der Energieumwandlung wird oft durch eine autonome, d. h. nicht preisabhängige, Verbesserung der Energienutzungsgrade (autonomous energy efficiency improvement, AEEI) modelliert. Mehr-Regionen-Modelle ("combined national and multinational equilibrium models") endogenisieren auch die Weltenergiepreise, indem sie das Gleichgewicht für nationale Faktormärkte und internationale Handelsmärkte ermitteln.

Eines der ersten Energiewirtschaftsmodelle mit einem allgemeinen Gleichgewichtsansatz war **ETA-MACRO** /89/, eine Kopplung des makroökonomischen Ein-Sektor-Modells *MACRO* mit dem stark aggregierten Energiesystemmodell *ETA* (Energy Technology Assessment, 8 stromerzeugende und 9 nichtstromerzeugende Umwandlungstechnologien). Einige Energiewirtschaftsmodelle basieren auf diesem Ansatz. **Global 2100** /90/ erweitert *ETA-MACRO* auf 5 Weltregionen und berücksichtigt CO_2-Emissionen und den internationalen Ölhandel. **12RT** /91/ ist eine Erweiterung auf 12 Weltregionen und 12 Sektoren, davon 8 zur Erzeugung und Verteilung von Energie. Modelle der *ETA-MACRO*-Familie unterstellen "perfect foresight", d. h. sie nehmen an, daß Produzenten und Verbraucher im Modell das zukünftige Angebot und die Preisentwicklung kennen und daher nach langfristigen Gesichtspunkten handeln.

Energiewirtschaftsmodelle, die den allgemeinen Gleichgewichtsansatz in den Vordergrund stellen, den Energiesektor aber nicht technologieorientiert abbilden, sind z. B. **GREEN** /92/, das dieselben 12 Regionen wie *12RT* abbildet und eine ähnliche sektorale Unterteilung hat. Der Energiesektor wird hier als ein Teil der Wirtschaft ökonometrisch formuliert. Weitere Modelle dieses Typs sind **ESG**, das im Rahmen des ZENCAP-Projekts /93/ an der ETH Zürich entwickelt wurde, sowie die beiden EU-Modelle **GEM-E3** /94/ und **E3ME** /95/. Letztere verwenden zur Beschreibung der Volkswirtschaft ein ökonometrisch aus Vergangenheitsdaten geschätztes sektorales Input-Output-Modell in das der Energiesektor integriert ist. In dem französischen Modell **MICRO-MELODIE** /96/ wird zwar der Stromerzeugungssektor technologieorientiert abgebildet, allerdings auf Kosten der sektoralen Aufgliederung der Volkswirtschaft (nur drei Sektoren). Alle Modelle sind quasidynamisch. Sie optimieren jede einzelne Periode rekursiv für sich, d. h. die Marktteilnehmer kennen nur die aktuelle Situation und sind daher "kurzsichtig" (myopisch). Auch das am IER entwickelte **NEWAGE** /97/ ist quasidynamisch (rekursiv, myopisch), allerdings wird das Energiesystem hier aktivitätsanalytisch abgebildet, d. h. es wird eine hybride Darstellung der technologischen Produktionsmöglichkeiten eines Industriesektors wahlweise durch einen ökonomischen "top-down" oder durch einen technologieorientierten "bottom-up" Ansatz ermöglicht.

Technologieorientierte Energiewirtschaftsmodelle koppeln klassische LP-Energiesystemmodelle mit dem makroökonomischen Ein-Sektor-Modell *MACRO*. Die Koppelung erfolgt wie bei *ETA-MACRO*, wobei allerdings die LP-Modelle das Energiesystem wesentlich detaillierter als *ETA* abbilden. Auf diese Weise wird der Nutzenergiebedarf, der in reinen LP-Modellen exogen vorgegeben werden muß, endogenisiert. Dieser Ansatz wurde mit **MARKAL-MACRO** realisiert /98//99//100/. Am IER wurde dasselbe Konzept mit dem LP-Modell **E^3-Net-MACRO** /101/ realisiert. Die Gleichungssysteme von LP-Modell und *MACRO* sind durch sogenannte "Hardlinks" gekoppelt und werden in einem einzigen Modellauf optimiert. Im Gegensatz dazu kann ein allgemeines Gleichgewichtsmodell auch durch "Softlinks" an ein LP-Modell gekoppelt werden (**11R**, eine am IIASA weiterentwickelte Version von Global 2100 mit 11 Weltregionen und das IIASA-LP-Modell **MESSAGE III** /102/). "Softlink" bedeutet, daß der Modellierer den Transfer von Informationen zwischen den Modellen kontrolliert. Das Energiesystem wird parallel mit beiden Modellen abgebildet. Im "Clearing House" wird anhand von "Common Measuring Points (CMP)" evaluiert, ob die einzelnen Modelläufe konsistent sind und die Einsichten beider Modelle für die verschiedenen Szenarien übereinstimmen. Der Modellierer entscheidet dann, wie die Annahmen angepaßt werden müssen, damit die Modellergebnisse konvergieren. Auf diese Weise werden die methodischen Vorteile beider Ansätze genutzt, ohne die Kompromisse eingehen zu müssen, die zur Etablierung eines "Hardlinks" notwendig sind. In Tabelle 3-7 werden die Anzahl der Regionen und Sektoren, der Typ des Energiesystemmodells, der makroökonomische Modelltyp und die Behandlung der Zeit für die angesprochenen Energiewirtschaftsmodelle gegenübergestellt.

Tabelle 3-7: Übersicht Energiewirtschaftsmodelle

Modell	**Reg.**	**Sek.**	**ES-Modell**	**Volkswirtschaft**	**Zeit**
ETA-MACRO	1	1	ETA	CES / CD-PF	dynamisch
Global 2100	5	1	ETA	CES / CD-PF	dynamisch
12RT	12	11	ETA	CES / CD-PF	dynamisch
MARKAL-MACRO	1	1	MARKAL	CES / CD-PF	dynamisch
E^3-Net-MACRO	1	1	E^3-Net	CES / CD-PF	dynamisch
11R-MESSAGE	11	1	ETA / MESSAGE	CES / CD-PF	dynamisch
GREEN	12	11	ökonometrisch	CES / CD-PF	quasi-dyn.
GEM-E3	12	11	ökonometrisch	CES / IO	quasi-dyn.
E3ME	12	25	ökonometrisch	CES / IO	quasi-dyn.
NEWAGE	1	60	aktivitätsanalytisch	CES / IO	quasi-dyn.
ESG	1	10	ökonometrisch	CES / IO	quasi-dyn.
MICRO-MELODIE	1	3	Stromerzeugung	ökonometrisch	quasi-dyn.

3.8 Anforderungen an die Funktionalität von Planungsinstrumenten

Das Anforderungsprofil für Planungsinstrumente enthält die folgenden Funktionalitätskriterien (siehe auch /103/):

3.8.1 Informationsverwaltung

Die Informationsverwaltung sollte gekennzeichnet sein durch:
- ein standardisiertes Datenformat für Energiesysteme
- ein relationales Datenverwaltungssystem
- eine einfache Bedienung
- eine vollständige Dokumentation aller Daten (Herkunft, Qualität, Modifikationen)
- maximale Redundanzfreiheit bei verschiedenen Regionen und Szenarien
- Einfachheit und Transparenz beim Szenariomanagement

3.8.2 Flexibilität

Das Planungsinstrument sollte in der Lage sein, den Detaillierungsgrad der Modellierung an die Fragestellung und die Verfügbarkeit von Daten anzupassen ohne die Vollständigkeit der Analyse in Frage zu stellen. Werden neue Informationen erschlossen, sollte die Analyse nachträglich verfeinert werden können. Die Flexibilität wird bestimmt durch die Gestaltungsfähigkeit des der Analyse zugrundeliegenden Netzwerks aus Umwandlungstechnologien (RES), der sektoralen Gliederung der wirtschaftlichen Aktivitäten sowie der Wahl der zeitlichen und räumlichen Auflösung. Zur Analyse sollten unterschiedliche mathematische Methoden zur Verfügung stehen.

3.8.3 Transparenz

Der Weg von der inhaltlichen Beschreibung der Szenarien bis zu den Ergebnissen der Berechnung sollte leicht nachvollziehbar, rekonstruierbar und damit überprüfbar sein. Das Instrument sollte dabei alle qualitativen und quantitativen Annahmen dokumentieren und zusätzlich die unterschiedlichen Annahmen und Ergebnisse verschiedener Szenarien übersichtlich gegenüberstellen.

3.8.4 Sensitivität der Ergebnisse

Die Sensitivität beschreibt, wie empfindlich die Berechnungsergebnisse auf kleine Änderungen der Inputparameter reagieren. Das Planungsinstrument sollte Hilfsmittel zur Verfügung stellen, um Aussagen über die Sensitivität (Stabilität und Robustheit der Ergebnisse) treffen zu können.

3.8.5 Entscheidungsunterstützende Fähigkeiten

Entscheidungsunterstützende Komponenten helfen dem Planer, seine Arbeit transparent zu dokumentieren und aus der Vielfalt der Berechnungsergebnisse diejenigen Informationen herauszuarbeiten, die dem Entscheidungsträger Argumente für die Entscheidung liefern. Die folgenden Punkte sollten vom Planungsinstrument unterstützt werden:

- Inhaltliche Dokumentation der Probleme, der Zielsetzungen und der untersuchten Maßnahmen und Strategien einer Fallstudie
- Transparente Dokumenation der Szenarioannahmen durch Szenariotabellen
- Flexible Auswertemöglichkeiten der Modellergebnisse in Tabellen und Grafiken
- Unterstützung bei der Sensitivitätsanalyse
- Formalisierung des Bewertungsschemas zur Beurteilung alternativer Strategien
- Dokumentation der Entscheidung in Form eines Aktionsplans

3.8.6 Benutzerfreundlichkeit

Die Anforderungen an die Einfachheit der Bedienung kann sowohl aus der Sicht eines Anfängers als auch aus der eines erfahrenen Benutzers bewertet werden, wobei beide unterschiedliche Erwartungen haben. Wünschenswert wäre,

- eine kurze Einarbeitungszeit
- daß geringe Vorkenntnisse im Bereich EDV notwendig sind
- eine hohe Qualität der Dokumentation: Einführung, Referenzhandbuch, Online-Hilfe
- die Verfügbarkeit von Lernprogrammen oder Trainingskursen
- die Fähigkeit, inhaltliche Fehler des Benutzers durch Konsistenzprüfungen zu identifizieren und in Fehlermeldungen genau zu beschreiben
- ein geringer Aufwand, tabellarische und grafische Ergebnisauswertungen anzufertigen.

3.8.7 Behandlung von Unsicherheitsaspekten

Das Instrument sollte in der Lage sein, die Unsicherheit der Systemparameter zu berücksichtigen. Falls das Instrument keine statistische oder probabilistische mathematische Funktionen verwendet, um Unsicherheitsaspekte methodisch schon während der Berechnung zu berücksichtigen, dann sollte der Unsicherheitsaspekt mit Hilfe des Szenariomanagements und der Sensitivitätsanalyse abgedeckt werden können.

4 Das entscheidungsunterstützende System *PlaNet*

4.1 Zielsetzung und Konzeption

PlaNet ist ein EDV-basiertes entscheidungsunterstützendes System zur Evaluierung energie- und umweltpolitischer Strategien auf regionaler und nationaler Ebene. *PlaNet* ist ein Energiesystemmodell und eignet sich zur Bedarfsanalyse, zur Simulation von Energiesystemen und zur Analyse von Umweltbelastungen. *PlaNet* simuliert Energiesysteme technologieorientiert nach dem "accounting" Prinzip von der volkswirtschaftlichen Aktivität bis zum Primärenergieverbrauch und erstellt Energiebilanzen, Emissionsbilanzen und Kostenbilanzen. *PlaNet* unterstützt alle Phasen des strukturierten Planungsprozesses, bietet eine flexible und leistungsfähige Datenverwaltung und setzt bewährte wissenschaftliche Methoden zur Simulation von Energiesystemen ein. Die Dialogkomponente ist benutzerfreundlich und setzt keine speziellen EDV-Kenntnisse voraus. Der Aufbau des Energiesystems, die strategische Vorgehensweise bei der Analyse sowie die Herkunft der Daten lassen sich gut dokumentieren, um die Modellierung transparent und die Ergebnisse nachvollziehbar zu machen. Durch die Integration bewährter Planungsmethoden mit einer modernen Datenverwaltung und einer benutzerfreundlichen Bedienoberfläche soll die Produktivität des Modellierers gesteigert werden. Ziel ist es, die Zeit für die Erstellung eines Datensatzes und die Durchführung und Analyse der Rechenläufe zu reduzieren, um mehr Raum für strategische Überlegungen, kreative Lösungen und Diskussionen mit den am Entscheidungsprozeß Beteiligten zu schaffen. Die konzeptionellen Schwerpunkte von *PlaNet* werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

4.1.1 Modulare Architektur

PlaNet ist modular aufgebaut, um leicht erweiterbar zu sein, und bietet unter einer einheitlichen Bedienoberfläche zu jedem Schritt der Energieplanung ein Modul an. Über eine standardisierte Datenenschnittstelle sind kommerzielle Softwarepakete wie Tabellenkalkulation und Textverarbeitung integriert. Alle Module von *PlaNet* sind in Abb. 4-1 dargestellt. Sie umfassen die fallstudienorientierte Datenbank *NetWork*, den *Navigator*, den *Analyst*, den *Case-Manager*, die Rechenmodule *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* und den *Evaluator*. Mit der Datenbank *NetWork* werden alle Daten, die während einer Fallstudie anfallen, gespeichert. Während der *Navigator* die Dateneingabe, Zeitreihenverwaltung und Retrieval übernimmt, 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 sowie die Sensitivitätsanalyse. Die Simulationsmodule *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* berechnen Energie- und Schadstoffbilanzen für beliebige Energiesysteme sowie die erforderlichen Kapazitäten der Umwandlungstechnologien. Für die Kostenrechnung werden jährliche Investitionskosten, Brennstoffkosten, fixe und variable Betriebskosten für jede Technologie sowie die spezifischen Gestehungskosten

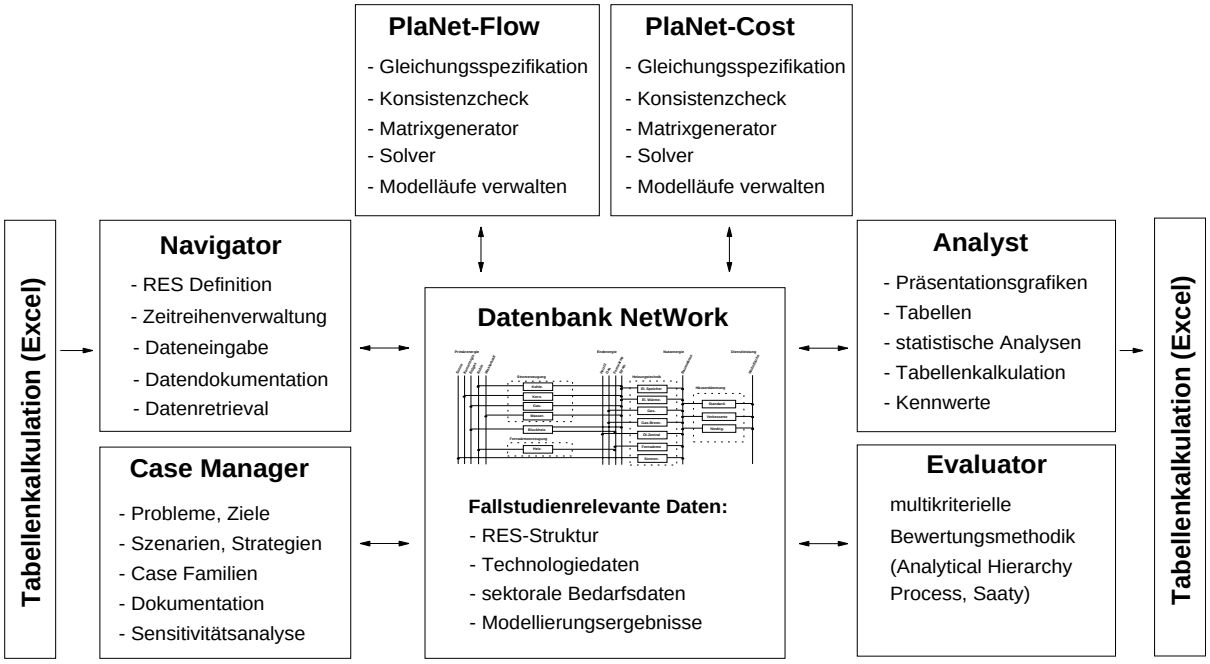


Abb. 4-1: Der modulare Aufbau von *PlaNet*

aller Güter und die über den gesamten Beobachtungszeitraum abdiskontierten Gesamtkosten des Energiesystems erfaßt. Ein *Evaluator* ermöglicht die multikriterielle Bewertung der untersuchten Strategien. Alle Module sind so ausgelegt, daß die durchgeführten Arbeiten und die gespeicherten Informationen ausführlich dokumentiert werden können.

4.1.2 Standardisierung der Datenschnittstelle

Kernidee des Konzepts von *PlaNet* ist die Standardisierung der Datenverwaltung für Energiesystemdaten durch eine klare Trennung von Topologie des Energiesystems und mathematischer Struktur des Modells. Die *PlaNet*-Datenbank *NetWork* orientiert sich in ihrem Aufbau ausschließlich an der Topologie des Energiesystems und nicht wie andere Datenbanken am prozeduralen Datenfluß und an der mathematischen Struktur eines Modells. Die Topologie der Energiesysteme wird dabei generell in Form eines Netzwerks, dem "Referenzenergiesystem" (RES), abgebildet (vgl. auch Kapitel 3.3.3). *NetWork* übernimmt die komplette Datenverwaltung für die Rechenmodule, die selbst nur noch mathematische Algorithmen enthalten. Daten und Ergebnisse werden über die einheitliche Schnittstelle ausgetauscht.

4.1.3 Flexibilität und Anpassungsfähigkeit

PlaNet gewährleistet ein hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, um die Analyse optimal an die untersuchten Fragestellungen, die Zielsetzung und die zur Verfügung stehen-

den 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.

4.1.4 Entscheidungsunterstützung

PlaNet unterstützt alle Phasen der Energieplanung - von der Definition der Problemstellung über die Modellierung bis hin zur Erfolgskontrolle - und erweitert damit den klassischen Horizont der Planungsinstrumente von der reinen Modellierung, d. h. der reinen Berechnung des Energiesystems, zur Entscheidungsunterstützung. Eine wichtige Komponente der Entscheidungsunterstützung ist dabei die lückenlose und so weit wie möglich automatisierte Dokumentation der Vorgehensweise im Rahmen der Fallstudie. Dokumentiert werden die Struktur des Energiesystems (RES), sowie die Probleme, Ziele, Szenarien und Maßnahmen, die Spezifikation des Gleichungssystems und die Herkunft der Daten einer Fallstudie. Im Bereich der Modellierung unterstützt *PlaNet* neben der Erstellung des Gleichungssystems auch die Szenariotechnik mit dem Konzept hierarchischer Entscheidungsbäume. Werkzeuge zur Erstellung von Grafiken und Standardberichten erleichtern die Auswertung der Modelläufe. Hilfsmittel für eine multikriterielle Bewertung der Modellergebnisse stehen zur Verfügung. Eine projektbegleitende Erfolgskontrolle wird dadurch ermöglicht daß die Datenbank als Informationssystem weitergeführt werden kann und sich die Modellierungsperiode zur Aktualisierung der Berechnungen leicht verschieben läßt.

4.1.5 Benutzerfreundlichkeit

PlaNet bietet eine "Windows"-orientierte grafische Benutzeroberfläche. Der Ablauf der Programme ist menügesteuert, die Dateneingabe maskenorientiert. Konsistenzchecks fangen mögliche Fehler schon während der Dateneingabe ab. Ein kontextsensitives Hilfesystem erklärt die Funktionalität des Programms.

4.1.6 Erschwinglichkeit und Portierbarkeit

PlaNet wurde auf der kostengünstigen Hardwareplattform eines PC’s unter Windows/Win95 mit Visual Basic entwickelt. Als relationales Datenbankformat kommt die Microsoft Access Engine zum Einsatz. Die zunehmende Unabhängigkeit der Betriebssysteme von der Hardware und die Tatsache, daß beide Produkte von Microsoft inzwischen eine sehr weite Verbreitung als Entwicklungsplattform genießen, stellt sicher, daß *PlaNet* auch auf zukünftige Hardware portierbar sein wird. *PlaNet* ist netzwerk- und multiuserfähig, unabhängig vom Netzwerkhersteller. Eine Client-Server Implementierung ist konzeptionell vorgesehen.

4.2 Das Referenzenergiesystem als Modellbildungsschema

PlaNet verwendet das “Referenzenergiesystem” (RES) als Modellbildungsschema für das Energiesysteme. Das Referenzenergiesystem beschreibt die Topologie des Energiesektors in Form einer 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.

Das Referenzenergiesystem ist ein bipartiter Graph und basiert auf der Petri-Netz-Theorie, wobei die dynamischen Aspekte der Theorie außer acht gelassen werden. Ein Petri-Netz ist ein bipartiter gerichteter Graph. Er besitzt zwei ausgezeichnete Knotentypen, Stellen und Transitionen genannt. Eine gerichtete Kante verbindet stets eine Transition mit einer Stelle und umgekehrt, jedoch niemals eine Stelle mit einer Stelle oder eine Transition mit einer Transition /104/. Ein Petri-Netz PN besteht aus zwei endlichen Mengen S (Stellen) und T (Transitionen), einer Quellrelation Q, die alle Verbindungen zwischen Eingangsstellen und Transitionen beinhaltet und einer Zielrelation Z, die alle Verbindungen zwischen Transitionen und Ausgangsstellen beinhaltet:

$$PN = (S,T,Q,Z) \ mit \quad S \cap T = \emptyset, \quad S \cup T \neq \emptyset, \quad Q \subseteq S \times T, \quad Z \subseteq T \times S \tag{4-1}$$

Die Petri-Netz-Theorie dient der graphischen Modellierung von Systemzusammenhängen sowie der mathematischen Analyse von Systemdynamik. Die Petri-Netz-Modellierung ist einfach, anschaulich und kommunikativ. Ihre Modelle sind leicht zu variieren und zu verfeinern. Die Reinterpretation der Ergebnisse ist problemlos. Eine computergestützte Auswertung von Petri-Netzen erlaubte es, relevante Verhaltensmuster zu simulieren, Antworten auf gezielte "Was wäre wenn (What if)" Fragen zu finden und Systeme auf definierte dynamische Eigenschaften hin zu überprüfen /105/.

Das Referenzenergiesystem als Petri-Netz enthält zwei Arten von Knoten: Güter (Commodities) und Prozesse. In Abb. 4-2 ist ein RES dargestellt, in dem der Prozeß "Kohlekraftwerk" das Gut "Steinkohle" verbraucht und die Güter "Strom" und "CO_2" erzeugt. Unter dem Begriff *Gut (Commodity)* werden alle mengenmäßig erfaßbaren Materialströme und Mengen zusammengefaßt, wie z. B. Energieträger, Minerale, Gase und andere Ressourcen aber auch Industriegüter, Schadstoffe, Dienstleistungen oder andere. Güter entsprechen den "Stellen" im Petri-Netz. *Prozesse* dagegen sind in der Lage, ein oder mehrere Güter in andere Güter zu transformieren. Sie entsprechen den “Transitionen” im Petri-Netz. Prozesse müssen nicht ausschließlich Energiekonversionstechnologien sein, sie können z. B. auch ein Stahlwerk, ein Fahrzeug oder etwas ähnliches darstellen. Prozesse und Güter sind durch Verknüpfungen (Links) verbunden. Eine *Verknüpfung (Link)* stellt den Fluß eines Gutes in oder aus einem Prozeß dar, also die erzeugten oder die verbrauchten Mengenströme. Inputgüter entsprechen

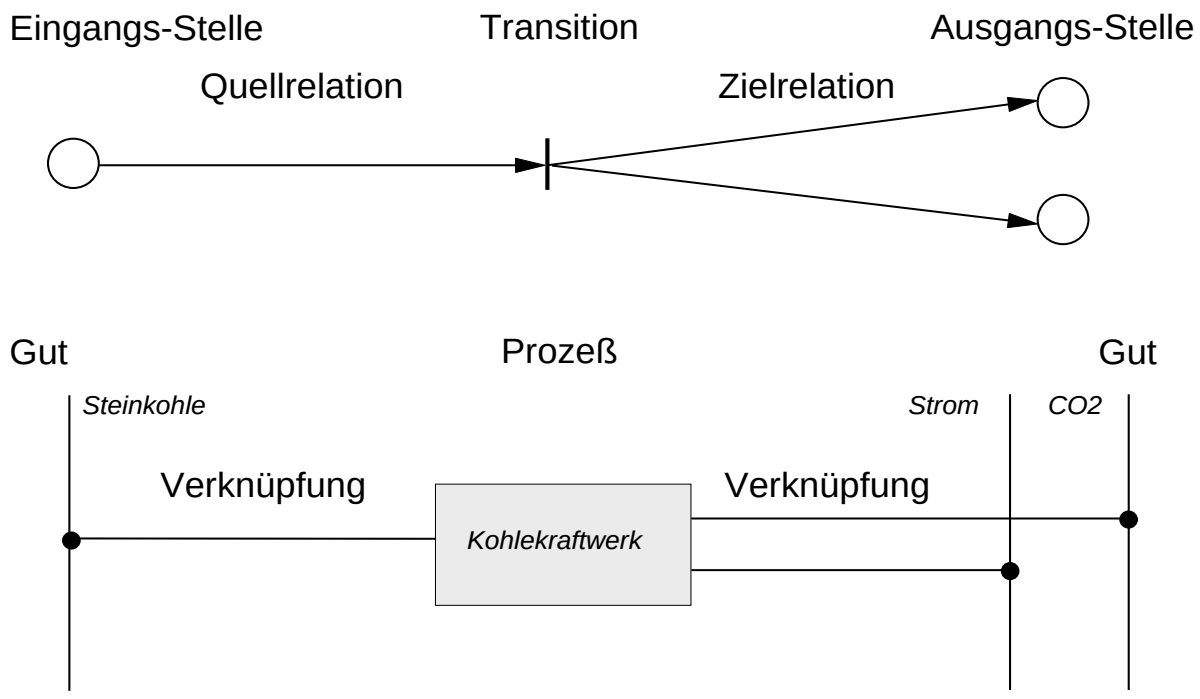


Abb. 4-2: Definition von Petri-Netz und Referenzenergiesystem

im Petri-Netz dabei den Eingangsstellen und Outputgüter den Ausgangsstellen einer Transition. Die Verknüpfungen entsprechen daher den Quellrelationen (Input-Links) und den Zielrelationen (Output-Links). Da das RES ein bipartiter Graph ist, dürfen zwei Prozesse oder Güter nicht direkt miteinander verknüpft werden, sondern müssen sich im Netzwerk immer abwechseln. Einige zusätzliche Regeln gelten für das RES: Quellen und Senken werden immer durch Güter dargestellt, deswegen muß ein Prozeß mindestens einen Input und einen Output haben. Ein Gut darf nicht isoliert vorkommen und muß mit mindestens einem Prozeß verknüpft sein.

Abb. 4-3 zeigt ein Beispiel eines RES für ein Energiesystems zur Deckung des Raumwärmebedarfs. Auf der rechten Seite wird die aktivitätsbestimmende Größe, in diesem Fall die Größe der Bevölkerung dargestellt. Anhand der bezogenen Wohnfläche pro Kopf läßt sich die zu befriedigende Dienstleistung als gesamte zu beheizende Wohnfläche ermitteln. Je nach spezifischem Wärmebedarf und dem jeweiligen Marktanteil der verschiedenen Häusertypen läßt sich daraus der Raumwärmebedarf (Nutzenergie) ermitteln. Verschiedene Heizungssysteme mit unterschiedlichen Wirkungsgraden und Kosten stehen zur Verfügung, um diesen Raumwärmebedarf zu decken. In dieser Umwandlungsstufe wird anhand der Marktanteile und der Nutzungsgrade der Heizungstechnologien die Nachfrage nach den verschiedenen Endenergieträgern bestimmt. Auf der linken Seite des RES wird der Versorgungssektor des Energiesystems abgebildet. Man erkennt hier die Stromerzeugung, die Fernwärmeerzeugung über Kraftwärmekoppelung und die Verteilungssysteme für Öl und Gas. Hier wird anhand der Marktanteile und der Nutzungsgrade die Primärenergienachfrage ermittelt.

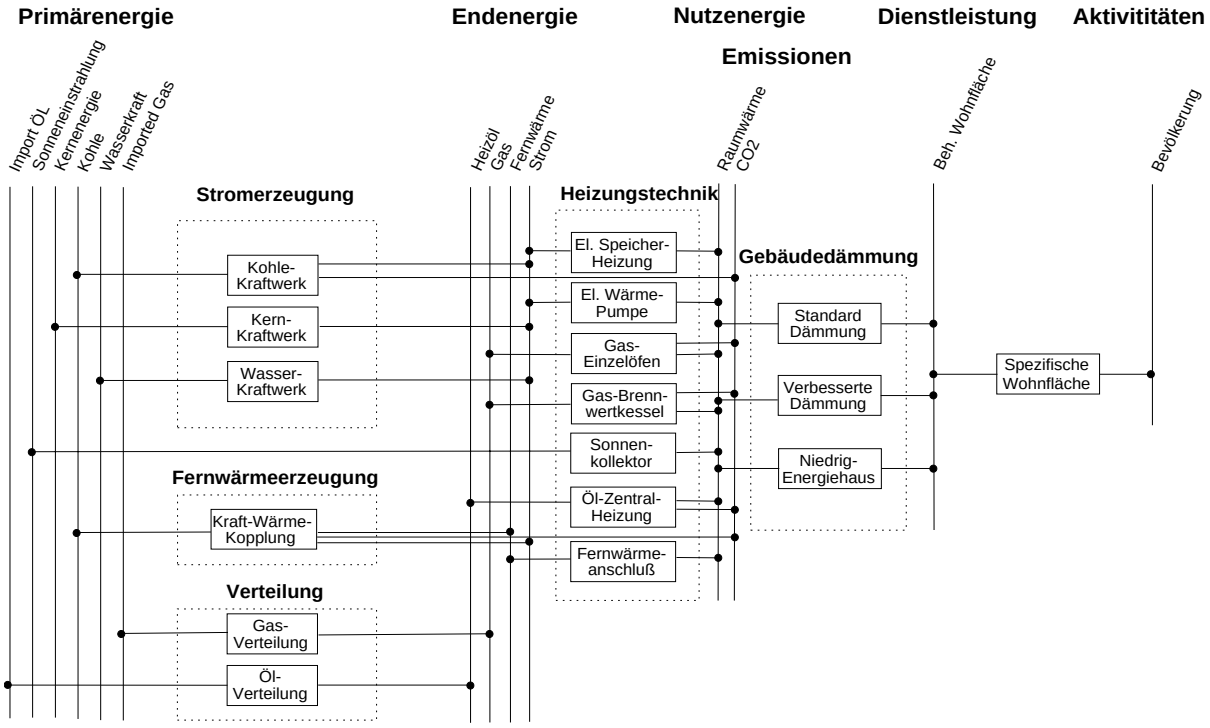


Abb. 4-3: Beispiel eines Referenzenergiesystems zur Raumwärmeerzeugung

Das Referenzenergiesystem enthält die wesentlichen, problemrelevanten Systemkomponenten des realen Energiesystems, d. h. auch diejenigen Energieträger und Umwandlungstechnologien, die erst als zukünftige Option verfügbar sein werden. Die Definition des RES legt für die strukturierte Planung den Untersuchungsgegenstand und die Systemgrenzen eindeutig und nachvollziehbar fest. Da sich unterschiedlichste Prozesse und Güter mit dem Modellbildungswerkzeug "RES" definieren lassen, können beliebige Energiesysteme aufgebaut werden. Der Detaillierungsgrad der Abbildung und damit der Grad der Abstraktion des Modells bleibt vollständig dem Modellierer überlassen, da die Anzahl der Prozesse, Güter und Verknüpfungen in einem RES nicht begrenzt ist.

Dieses Realmodell beschreibt lediglich die Topologie des Energiesystems. Es enthält aber keine funktionalen Zusammenhänge zwischen Objekten. Wird nun auf dieses Realmodell eine mathematische Methode aufgesetzt, erhält man eine formale Beschreibung des Energiesystems in Form eines mathematischen Gleichungssystems (formales Modell). Das formale Modell läßt sich auf einem Computer berechnen, um z. B. die Güterflüsse, die Kosten oder andere Kenngrößen im RES zu errechnen.

4.3 Das *PlaNet*-Datenbanksystem *NetWork*

4.3.1 Merkmale des Datenbanksystems *NetWork*

NetWork ist ein Datenbanksystem zur Verwaltung von Energiesystemdaten, die sich auf ein Referenzenergiesystem beziehen. Die wesentlichen Kennzeichen von *NetWork* sind Unabhängigkeit der Daten von den Planungsinstrumenten, einfacher und flexibler Datenzugriff, minimale Redundanz bei der Datenspeicherung, Konsistenzchecks zur Gewährleistung der Datenintegrität sowie umfangreiche Dokumentationsmöglichkeiten. *NetWork* basiert auf einem relationalen Datenformat.

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 Realmodelle von Energiesystemen zu speichern. Zeitliche und räumliche Auflösung sind flexibel. Das Datenformat ist auf die Topologie des Referenzenergiesystems abgestimmt und daher unabhängig von der Struktur der Rechenmodule, d. h. die Daten sind von der Planungskomponente des DSS isoliert. 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 des "Mapping"-Algorithmus wird 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 vor dem Modellauf vermeidet Umrechnungsfehler und erlaubt es, Originaldaten in der Datenbank einzutragen und zu dokumentieren.

Ein Informationssystem erfüllt vier Aufgaben: die Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation von Informationen. Es ist gekennzeichnet durch die Vollständigkeit der gespeicherten Informationen, durch die Schnelligkeit und Flexibilität beim Wiederfinden der gespeicherten Daten, sowie durch eine Dokumentation der Herkunft jeder einzelnen Information. Als **Informationssystem** erlaubt *NetWork* daher, alle zusätzlich zur Modellierung erhobenen Daten in der gleichen Datenbank zu speichern und zu dokumentieren. Auch Informationen, die nicht zur Modellierung verwendet werden, wie z. B. historische Daten, können abgelegt werden. 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. Die gespeicherte

Datenmenge kann dazu nach den verschiedenen Kriterien des Zugriffsschlüssels gefiltert werden. So lassen sich z. B. die zu einem Prozeß, einem Gut/Commodity oder einem Attribut verfügbaren Daten anzeigen. Eine hierarchische Gruppierung der Prozesse und Güter kann als Filter zur Einengung der Informationsmenge dienen. So läßt sich z. B. die Prozeßliste eines Energiesystems auf die Prozesse zur Stromerzeugung reduzieren. Mehrere Hierarchiebäume mit beliebig vielen Knotenebenen können definiert werden. Parallel hierzu kann der Benutzer zusätzlich sein eigenes Schlüsselsystem zur Strukturierung seiner Daten aufbauen, um einen noch gezielteren Zugriff auf die Daten zu ermöglichen. Für jede einzelne gespeicherte Zahl können Herkunft und Qualität durch die Angabe einer Quelle dokumentiert werden. Der Name des Bearbeiters sowie Datum und Uhrzeit der Bearbeitung werden automatisch vom System notiert. Tabelle 4-1 faßt die Merkmale von *NetWork* zusammen.

Die doppelte Nutzungsmöglichkeit von *NetWork* als Datenbank für Planungsinstrumente und als Informationssystem für Fallstudien hat einen für die Planung entscheidenden Vorteil. Die ständigen Veränderungen der Randbedingungen machen es notwendig, die Datenbasis regelmäßig zu aktualisieren und fortzuführen. Da dies in vielen Datenbanken nicht möglich ist, muß parallel zur Modelldatenbank für die Datenpflege ein Informationssystem aufgebaut werden. Da *NetWork* beide Aufgaben erfüllt, müssen 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 die Überprüfung der Planungsergebnisse zur Verfügung.

Tabelle 4-1: Merkmale der Datenbank *NetWork*

- Unabhängigkeit des Datenformats von formalen Modellen
- Nutzung 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

4.3.2 Das Referenzenergiesystem als Datenzugriffsschlüssel

Um als Informationssystem und Modellierungsdatenbank Informationen zu beliebigen Energiesystemen speichern zu können und gleichzeitig unabhängig von Planungsinstrumenten zu sein, muß das Datenmodell von *NetWork* auf der Topologie des Realmodells und nicht auf der eines formalen mathematischen Modells aufbauen. In *PlaNet* wird das Referenzenergiesystem (RES) wegen seiner Einfachheit, Flexibilität und methodischen Unabhängigkeit als Realmodell für die Beschreibung von Energiesystemen eingesetzt. Das RES bildet ebenfalls die Grundlage für die Datenstruktur von *NetWork*, da es nicht nur das Energiesystem vollständig beschreibt sondern auch einen eindeutigen Datenzugriffsschlüssel für alle Informationen, die sich auf Energiesysteme beziehen, ermöglicht.

Alle numerischen Informationen werden grundsätzlich als Zeitreihen abgelegt, da sie einen zeitlichen Verlauf besitzen können. Der Zugriffsschlüssel einer Zeitreihe setzt sich zusammen aus einem Attribut, das die Bedeutung der Zeitreihe beschreibt, und aus einem RES-Zuordnungsschlüssel, der den Bezug der Information zu einem oder mehreren Objekten im RES beschreibt. Abb. 4-4 zeigt, wie Informationen sich eindeutig im RES lokalisieren lassen. Die Informationen lassen sich dabei in fünf Klassen einteilen. “P-Attribute” beziehen sich auf einen Prozeß, wie z. B. die gesamten Investitionskosten oder die Lebensdauer des Kohlekraftwerks. “C-Attribute” beziehen sich auf ein Gut, wie z. B. der Schwefelgehalt der Kohle oder der Preis des Stroms. “PC-Attribute” wiederum beziehen sich auf eine Prozeß-Gut-Kombination, also eine Verknüpfung, wie z. B. der Steinkohleverbrauch des Kohlekraftwerks oder die variablen Kosten des Kohlekraftwerks bezogen auf die Stromerzeugung (DM

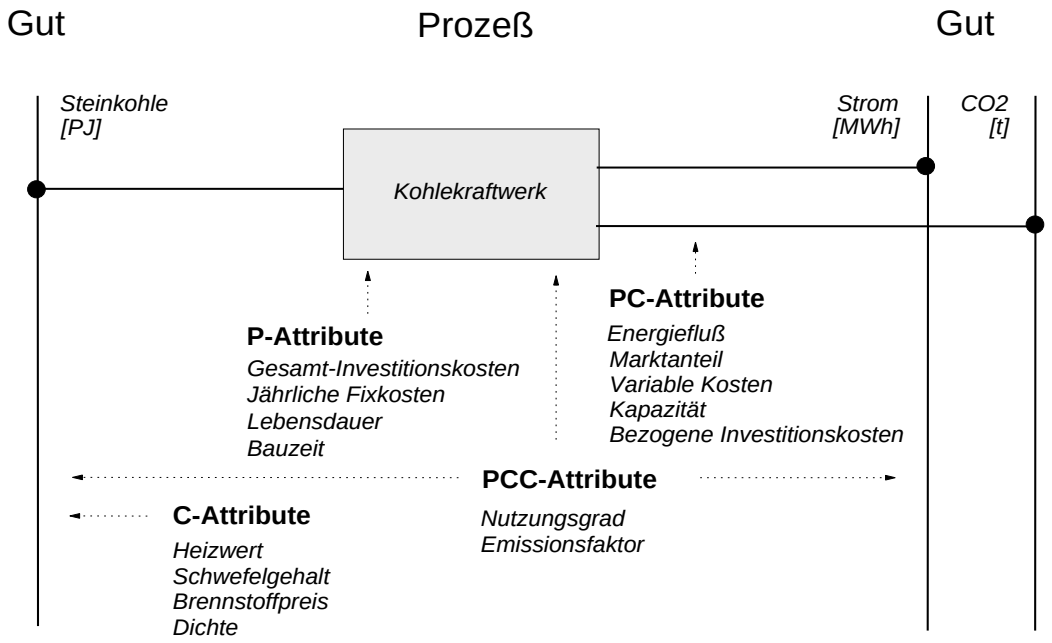


Abb. 4-4: Das RES als Datenzugriffsschlüssel für *NetWork*

pro kWh). Schließlich gibt es noch “PCC-Attribute”, die für einen Prozeß einen funktionalen Zusammenhang zwischen zwei Verknüpfungen herstellen, wie z. B. der Nutzungsgrad, der für ein Kohlekraftwerk die Menge des erzeugten Stroms ins Verhältnis zur Menge verbrauchter Kohle setzt, oder der Emissionsfaktor, der die spezifischen CO_2-Emissionen aus der Kohleverbrennung beschreibt. Als letzte Klasse gibt es die “G-Attribute”, die sich auf das gesamte RES beziehen, wie z. B. die Diskontrate. Der Zugriffsschlüssel setzt sich aus vier Komponenten zusammen: Attribut, Prozeß, Gut 1 und Gut 2. In Tabelle 4-2 werden die Zugriffsschlüssel für die in Abb. 4-4 aufgeführten Informationen zusammengefaßt.

Tabelle 4-2: Der Daten-Zugriffsschlüssel in *NetWork*

Zeitreihe	**Inhaltliche Beschreibung**		**Position im RES**
Nr.	Attribut	Klasse	Beteiligte Objekte
1	Heizwert	c	Steinkohle
2	Schwefelgehalt	c	Steinkohle
3	Brennstoffpreis	c	Steinkohle
4	Dichte	c	Steinkohle
5	Gesamt-Investitionskosten	p	Kohlekraftwerk
6	Jährliche Fixkosten	p	Kohlekraftwerk
7	Lebensdauer	p	Kohlekraftwerk
8	Bauzeit	p	Kohlekraftwerk
9	Energiefluß	pc	Kohlekraftwerk / Kohle
10	Marktanteil	pc	Kohlekraftwerk / Strom
11	Variable Kosten	pc	Kohlekraftwerk / Strom
12	Kapazität	pc	Kohlekraftwerk / Strom
13	Bezogene Investitionskosten	pc	Kohlekraftwerk / Strom
14	Nutzungsgrad	pcc	Kohlekraftwerk / Strom / Steinkohle
15	Emissionsfaktor	pcc	Kohlekraftwerk / CO_2 / Steinkohle

4.3.3 Strukturelle, zeitliche und räumliche Auflösung

Die strukturelle Auflösung des RES und damit der Detaillierungsgrad bei der Darstellung von Energiesystemen ist frei wählbar, da die Anzahl der Prozesse, Güter und Verknüpfungen nicht festgelegt ist. Die zeitliche und regionale Auflösung läßt sich an die Anforderungen der Fallstudie anpassen. Die Struktur des RES gilt für alle räumlichen und zeitlichen Instanzen, wie in Abb. 4-5 dargestellt, während Daten zu Objekten des RES unterschiedlichen Zeitpunkten und Regionen zugeordnet werden können. Da die Struktur des RES der Schlüssel der

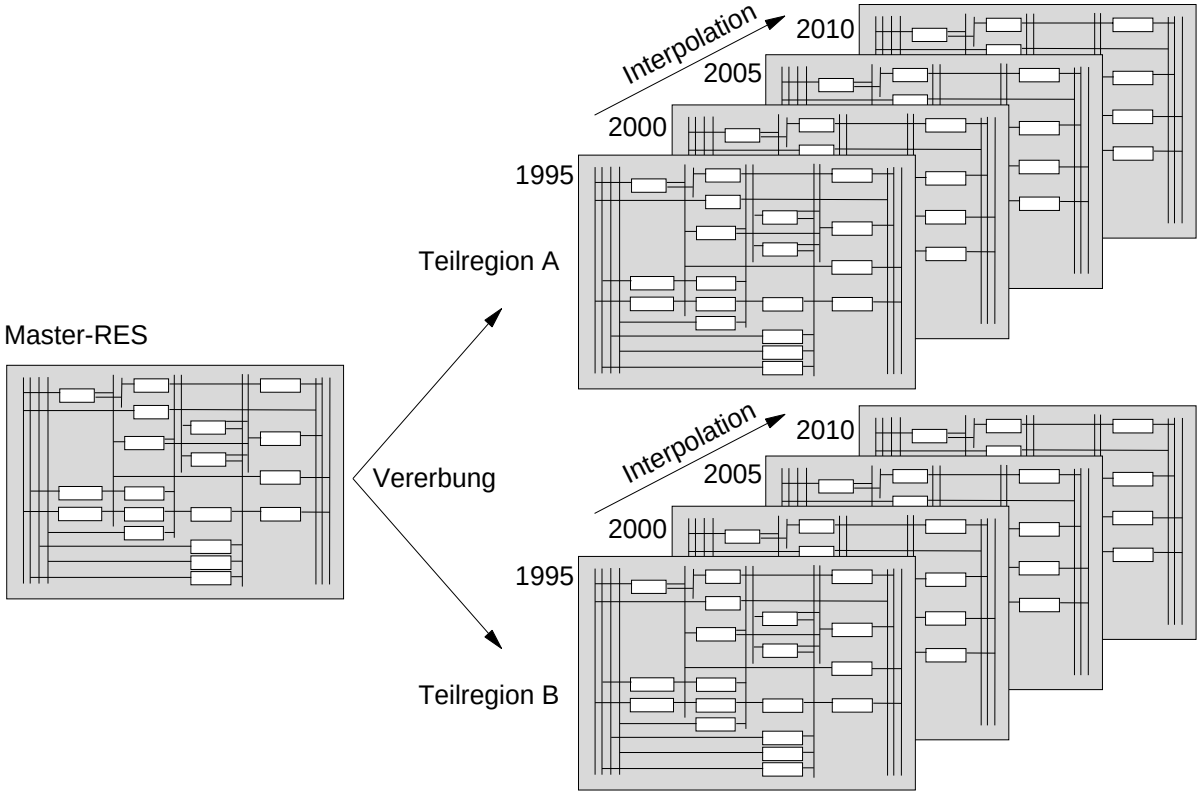


Abb. 4-5: Zeitliche und regionale Instanzen des RES

Datenbank ist, darf es sich in der räumlichen und zeitlichen Dimension nicht ändern, sondern muß ebenfalls alle zukünftigen und regionalen Komponenten beinhalten. Technologien, die in einem Zeitraum oder einer Teilregion nicht benutzt werden, lassen sich abschalten, indem ihnen ein Marktanteil von Null zugewiesen wird. Um die Redundanz in Datenbanken mit vielen Teilregionen zu minimieren, besitzt *NetWork* den Mechanismus der Vererbung, der Daten von einem Master-RES auf die Teilregionen übertragen kann. Damit die Daten nicht immer für die gesamte Modellierungsperiode eingegeben werden müssen, ermöglicht es ein Interpolationsalgorithmus, aus vorhandenen Werten die vollständige Zeitreihe abzuleiten.

Die Gesamtregion läßt sich in eine beliebige Anzahl von Teilregionen mit gleichem RES zerlegen, um regionale Strukturen zu modellieren. Die Zeitachse läßt sich in beliebige sogenannte *Bilanzierungsperioden* unterteilen. Die Dauer einer Bilanzierungsperiode ent-

spricht der zeitlichen Auflösung der Fallstudie und ist frei wählbar ist. In der Regel ist sie ein Jahr, d. h. die Zeitreihen in der Datenbank enthalten Jahreswerte. Die zeitliche Auflösung kann erhöht werden, indem für die Bilanzierungsperiode ein kürzerer Zeitraum, z. B. ein Monat, ein Tag oder eine Stunde gewählt wird. Die Daten in den Zeitreihen würden anstatt für Jahre dann für Monate, Tage oder Stunden gelten. Für alle Zeitreihen eines RES gilt die gleiche zeitliche Auflösung, da sonst keine konsistente Berechnung möglich ist, denn es macht keinen Sinn, z. B. Jahreswerte und Monatswerte zu addieren. Zeitpunkte werden in *NetWork* generell als Datum und Uhrzeit gespeichert. Je nach der Definition der Bilanzierungsperiode wird das gespeicherte Datum unterschiedlich interpretiert. So läßt sich der Zeitpunkt "1.5.1995 17:31:13" für verschiedene zeitliche Auflösungen unterschiedlich interpretieren: Jahr "1995", Quartal "2/1995", Monat "5/1995", Woche "18/1995", Tag "1.5.1995", Minute "1.5.1995 17:31".

Die *Modellierungsperiode* beschreibt den Zeitraum in der Zukunft, der mit Hilfe eines Planungsinstrumentes untersucht werden soll. Das *Basisjahr* ist das erste Jahr der Modellierungsperiode. Hier endet für die Modellierung der historische Zeitraum und beginnt die Zukunftsanalyse. Das Planungsinstrument muß nicht alle Bilanzierungsperioden innerhalb der Modellierungsperiode berechnen. Um die Rechenzeit zu verkürzen wird oft nur jede fünfte Periode berechnet und dazwischen interpoliert. Die vom Planungsinstrument explizit berechneten Bilanzierungsperioden heißen *Stützperioden*, im Falle von Jahren also Stützjahre. Die Definition der Modellierungsperiode einer Fallstudie kann jederzeit modifiziert werden.

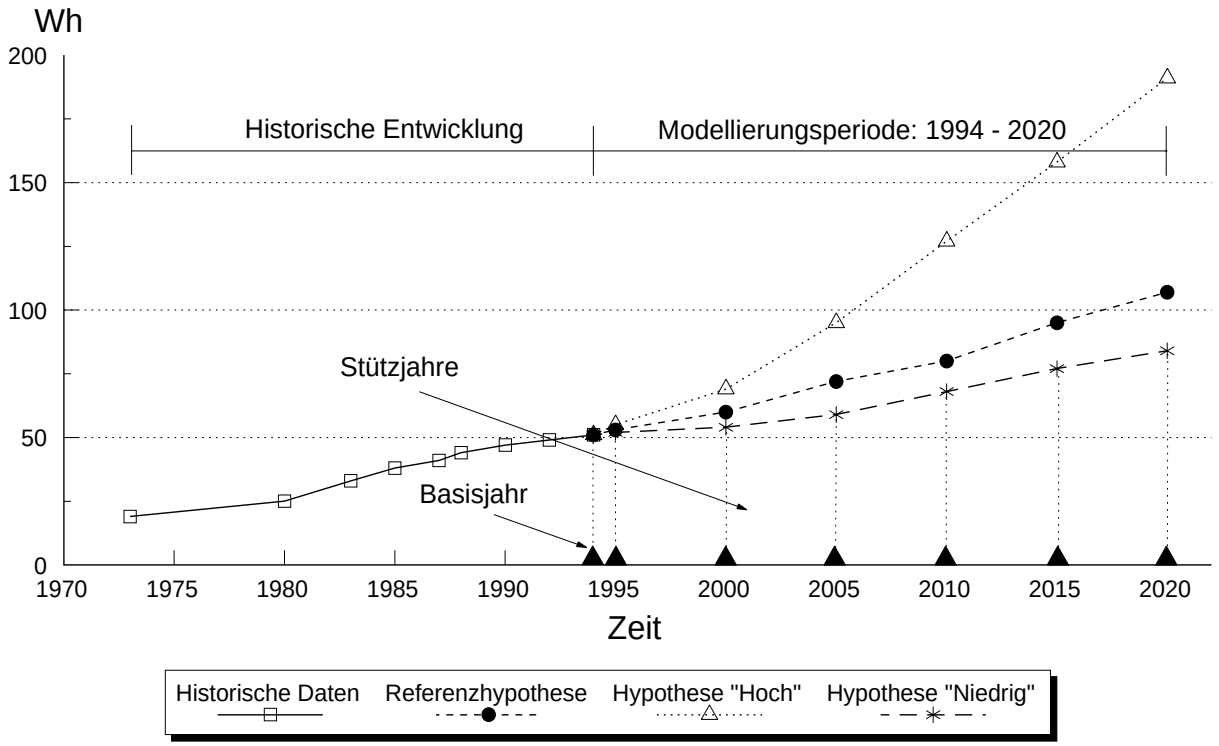


Abb. 4-6: Das Konzept der Zeitreihe in *NetWork*

Numerische Informationen in *NetWork* werden als Zeitreihen verwaltet, d. h. sie können einen zeitlich dynamischen Verlauf besitzen. Eine *Zeitreihe* setzt sich, wie in Abb. 4-6 illustriert wird, aus einer historischen Entwicklung und einer Zukunftsprojektion für die Modellierungsperiode zusammen. Die zukünftige Entwicklung kann dabei für unterschiedliche Hypothesen festgelegt werden. Eine *Hypothese* ist eine Annahme einer bestimmten zeitlichen Entwicklung der Zeitreihe in der Zukunft. Die Anzahl der Hypothesen für eine Zeitreihe ist unbegrenzt. Abb. 4-6 zeigt als Beispiel eine Zeitreihe mit drei Hypothesen. Die Modellierungsperiode beginnt im Basisjahr 1994 und reicht bis ins Jahr 2020.

Da Planungsinstrumente in der Regel mit ganzzahligen Perioden rechnen, müssen die Zeitpunkte in Periodennummern umgerechnet werden. Dazu werden die Bilanzierungsperioden beginnend ab dem Basisjahr durchnumeriert. Abb. 4-7 zeigt zwei Zeitreihen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und demonstriert, wie die Zeitpunkte in ganzzahlige Perioden übersetzt werden. Die obere Zeitreihe stellt Jahreswerte dar, die mit Bezug auf den Beginn der jeweiligen Periode (1. Januar) gespeichert sind. Die zweite Zeitreihe in dem Beispiel hat die Auflösung 4 Stunden. Die Zeitreihe umfaßt 6 Perioden à 4 Stunden am 8.4.1995. Die 4-Stundenwerte sind mit Referenz auf die Periodenmitte abgespeichert. Die Dauer der Bilanzierungsperiode wird vom Benutzer zu Beginn der Fallstudie festgelegt. Auch der Zeitpunkt innerhalb der Bilanzierungsperiode, der dem Wert einer Periode zugewiesen wird, kann frei gewählt werden.

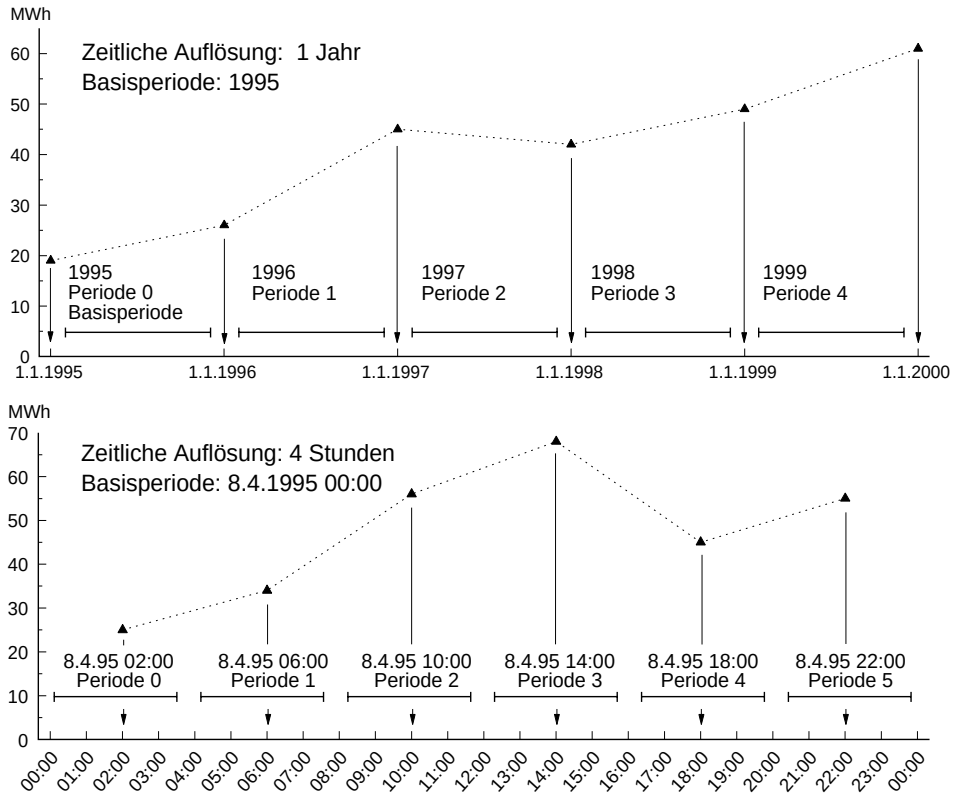


Abb. 4-7: Übersetzung der Zeitpunkte in Periodennummern zur Modellierung

4.3.4 Vererbung von Werten innerhalb einer Zeitreihe

Um Werte einer Zeitreihe eindeutig zu beschreiben, müssen zusätzlich zum Zeitreihen-Zugriffsschlüssel ein Raumbezug, ein Zeitbezug und eine Hypothese angegeben werden. Diese beschreiben, für welche jeweilige Teilregion, Periode und Annahme der Wert gilt. Müßte man für alle Kombinationen aus Hypothesen und Regionen die kompletten Zeitreihen angeben, so würde das neben einem hohen Mehraufwand bei der Dateneingabe auch zu einer starken Redundanz der Daten führen. Immer dann, wenn der Wert einer Zeitreihe bei verschiedenen Hypothesen oder Teilregionen gleich wäre, würde dieser Wert mehrfach in der Datenbank stehen. Bei einer nachträglichen Änderung dieses Wertes müßten alle Kopien ebenfalls geändert werden, um die Datensätze konsistent zu halten.

Die Redundanz von Daten stellt eine potentielle Fehlerquelle bei der Modellierung dar. Um Datenredundanz zu vermeiden, besitzt *NetWork* Vererbungsregeln. Die *Vererbungsregel* für Hypothesen besagt, daß nur für die Referenzhypothese einer Zeitreihe der komplette Datensatz eingegeben werden muß. Für alle anderen Hypothesen werden nur die von der Referenzhypothese abweichenden Werte angegeben. Fehlt in einer Zeitreihe für eine Hypothese zu einem Zeitpunkt ein Wert, wird automatisch der Wert aus der Referenzhypothese "vererbt". Die Vererbungsregel zwischen Regionen funktioniert genauso und vererbt Daten vom Master-RES auf die Teilregionen. Sie kann aber für bestimmte Attribute abgeschaltet werden, wenn wie z. B. für den Energieverbrauch eine regionale Vererbung keinen Sinn macht. Das Zusammenwirken der zwei Vererbungsregeln wird in Abb. 4-8 dargestellt. Dort

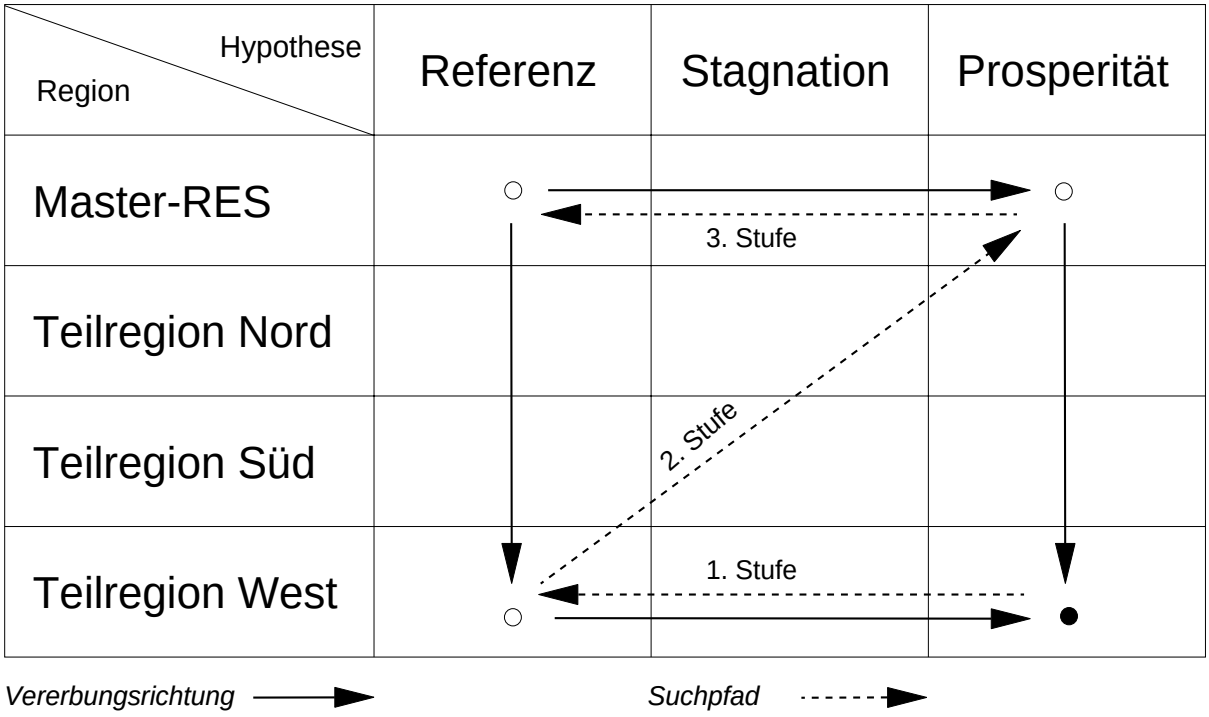


Abb. 4-8: Vererbungsregeln in *NetWork*

wird auch der Suchpfad illustriert, um einen Wert für eine Kombination aus Teilregion / Hypothese zu finden. Als Beispiel ist hier ein Wert für die Teilregion "West" und für die Hypothese "Prosperität" gesucht. Ist für diese Kombination kein Wert in der Datenbank vorhanden, wird in der ersten Suchstufe bei der Referenzhypothese der Teilregion "West" gesucht. Gibt es dort auch keinen Wert, wird in der 2. Suchstufe im "Master-RES" unter der Hypothese "Prosperität" gesucht und in der dritten Suchstufe dann im "Master-RES" unter der "Referenzhypothese". Ist dort auch kein Wert verfügbar, wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

Tabelle 4-3 zeigt, wie die Vererbungsregeln für Hypothesen aus den verfügbaren Werten für die Hypothese X und den Werten der Referenzhypothese eine komplette Zeitreihe bestimmen. In diesem Beispiel werden alle historischen Werte von 1973 bis 1992 vererbt und müssen nicht bei der Hypothese X neu eingegeben werden. Die Werte der Referenzhypothese für 1994 und 2007 werden von der Hypothese X überschrieben.

Tabelle 4-3: Funktionsweise des Vererbungs-Algorithmus

Referenzhypothese			**Hypothese X**			
Verfügbare Werte			**Verfügbare Werte**		**Resultierende Zeitreihe ***	
Jahr	Wert	Wachstumsrate	Wert	Wachstumsrate	Wert	Wachstumsrate
1973	19,0				19,0	
1980	25,0				25,0	
1983	33,0				33,0	
1985	38,0				38,0	
1987	41,0				41,0	
1988	44,0				44,0	
1990	47,0				47,0	
1992	49,0				49,0	
1994	51,0		55,0		55,0	
2007	78,0	3,0 %	85,0	4,0 %	85,0	4,0 %
2013				7,0 %		7,0 %
2020				6,0 %		6,0 %

** Vererbte Werte sind grau unterlegt.*

4.3.5 Interpolation von Werten innerhalb einer Zeitreihe

Der iterative Charakter der Planung erfordert es, Modellberechnungen regelmäßig zu aktualisieren. Bei einer neuen Berechnung verschiebt sich die Modellierungsperiode auf der Zeitachse nach vorne. Diese Verschiebung muß in der Datenbank nachvollzogen werden und wäre sehr aufwendig, wenn Zeitreihen für alle Stützperioden Werte besitzen müssten. Daher ist *NetWork* von der Modellierungsperiode unabhängig, d. h. es müssen nicht notwendigerweise Werte für alle Stützperioden eingetragen sein. Da ein Planungsinstrument jedoch zur Berechnung für jede Stützperiode einen Wert erwartet, ist *NetWork* in der Lage, vor einer Berechnung aus den in der Datenbank vorhandenen Daten den für die Berechnung notwendigen kompletten Datensatz zu bestimmen. Aus den in der Datenbank vorhandenen Informationen werden die Werte für die Stützjahre der Modellierungsperiode durch Interpolationsregeln oder durch Extrapolation ergänzt (*Interpolationsalgorithmus*). Der vervollständigte Datensatz wird dann dem Berechnungsmodul übergeben. Abb. 4-9 zeigt eine Zeitreihe, deren Werte für die Stützjahre 1995, 2000, 2005 durch Interpolation und für die Stützjahre 2010, 2015 und 2020 durch Extrapolation gewonnen wurden.

Die Funktionsweise des Interpolationsalgorithmus wird in Tabelle 4-4 erläutert. Zunächst wird in einem ersten Schritt festgestellt, für welche Stützjahre der Modellierungsperiode noch keine Werte vorhanden sind. In der Spalte 1 von Tabelle 4-4 werden die in der Zeitreihe vorhandenen Wertepaare angezeigt. Die Stützjahre, in denen Werte fehlen, sind grau unterlegt. In einem zweiten Schritt werden diese fehlenden Werte dann bestimmt. Liegen sie zwischen zwei vorhandenen Wertepaaren, werden sie durch lineare Interpolation ergänzt.

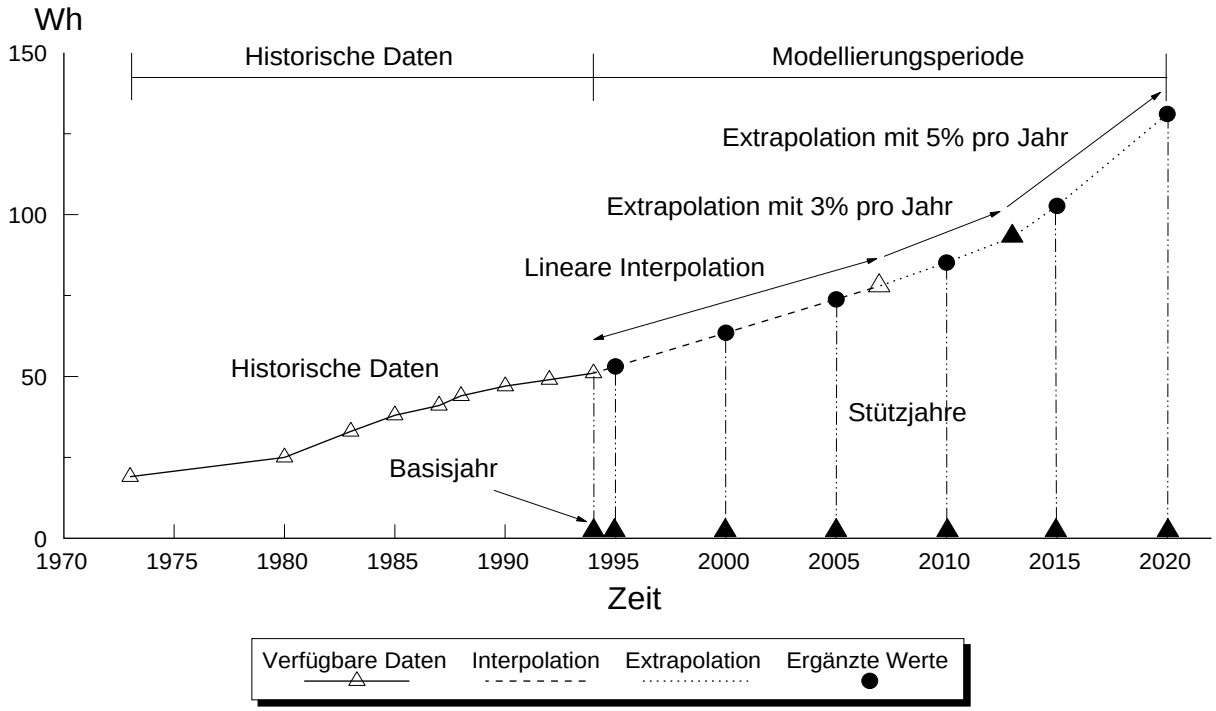


Abb. 4-9: Der Interpolations-Algorithmus für Zeitreihen

Tabelle 4-4: Funktionsweise des Interpolationsalgorithmus

In der Zeitreihe verfügbare Werte			Ergänzung fehlender Werte		Berechnung redundanter Werte	
Jahr	Wert	Wachstumsrate	Wert	Wachstumsrate	Wert	Wachstumsrate
1973	19		19,0		19,0	4,0 %
1980	25		25,0		25,0	9,7 %
1983	33		33,0		33,0	7,3 %
1985	38		38,0		38,0	3,9 %
1987	41		41,0		41,0	7,3 %
1988	44		44,0		44,0	3,4 %
1990	47		47,0		47,0	2,1 %
1992	49		49,0		49,0	2,0 %
1994	51		51,0		51,0	4,1 %
1995			53,1		53,1	3,6 %
2000			63,5		63,5	3,1 %
2005			73,8		73,8	2,8 %
2007	78	3%	78,0	3,0 %	78,0	3,0 %
2010				3,0 %	85,2	3,0 %
2013		5%		5,0 %	93,1	5,0 %
2015				5,0%	102,7	5,0 %
2020				5,0%	131,1	5,0 %

In diesem Beispiel ist als Interpolationsalgorithmus die lineare Interpolation gewählt.

Dies ist für die Stützjahre 1995, 2000 und 2005 der Fall. Alternativ kann auch exponentiell, stufenförmig oder logistisch interpoliert werden, je nachdem welchen qualitativen Verlauf man für die Zeitreihe erwartet. Liegen die fehlenden Werte nach dem letzten in der Zeitreihe vorhandenen Wert, so werden sie durch exponentielle Extrapolation bestimmt. Aus diesem Grund können bei den Zeitreihen neben absoluten Zahlen auch Wachstumsraten angegeben werden, die den weiteren Verlauf der Zeitreihe beschreiben. Dies ist im Jahr 2007 der Fall. Der Übergang von absoluten Zahlen zu Wachstumsraten kann nur einmal innerhalb einer Zeitreihe stattfinden. Die Wachstumsraten lassen sich in ihren Zeitverlauf verändern. In dem Beispiel aus Tabelle 4-4 wächst die Zeitreihe ab dem Jahr 2007 mit 3% pro Jahr. Die Wachstumsrate von 3% gilt bis zum Jahr 2013. Damit wird die fehlende Wachstumsrate für 2010 mit der Wachstumsrate von 2007 ergänzt. Ab dem Jahr 2013 steigert sich die Wachstumsrate auf 5% pro Jahr. In einem letzten Schritt werden die redundanten Werte und Wachstumsraten innerhalb der Zeitreihe berechnet und stehen als Zusatzinformation zur Verfügung.

Der Wert x_2 der Periode t_2 wird aus einem gegebenen Wert x_1 der Peride t_1 und einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate i durch Extrapolation wie folgt bestimmt:

Extrapolation $$x_2 = x_1 * (1 + i)^{(t_2 - t_1)} \quad (4\text{-}2)$$

Andererseits läßt sich die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate i zwischen den gegebenen Werten x_1 der Periode t_1 und x_2 der Periode t_2 wie folgt berechnen:

Jährliche Wachstumsrate $$i = \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{\frac{1}{t_2 - t_1}} - 1 \quad (4\text{-}3)$$

Als Interpolationsalgorithmen kommen die folgenden Formeln zum Einsatz, die für einen gegebenes Wertepaar (x_1, t_1) und (x_2, t_2) den Wert x in der Periode t ($t_1 < t < t_2$ bestimmen:

Lineare Interpolation $$x = \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} * (t - t_1) + x_1 \quad (4\text{-}4)$$

Exponentielle Interpolation $$x = x_1 * \left(\left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{\frac{1}{t_2 - t_1}}\right)^{(t - t_1)} \quad (4\text{-}5)$$

Logistische Interpolation $$x = \frac{(x_2 - x_1)}{1 + e^{C * \left(\frac{(t_2 + t_1)}{2} - t\right)}} + x_1 \,, \quad \textit{Steilheit } C \quad (4\text{-}6)$$

Stufeninterpolation $$x = x_1 \quad (4\text{-}7)$$

Der Interpolationsalgorithmus kann aus den in der Datenbank verfügbaren Informationmen die zur Berechnung notwendigen Daten gewinnen und ermöglicht die Unabhängigkeit der im Planungsinstrument berechneten Modellierungsperiode von dem Inhalt der Datenbank. Der Vorteil der Interpolation zeigt sich dann, wenn zu einem späteren Zeitpunkt eine erneute Berechnung mit einer verschobenen Modellierungsperiode durchgeführt werden soll. Während früher der komplette Datensatz manuell überarbeitet werden mußte, um alle Zeitreihen an die neue Modellierungsperiode anzupassen, führt der Interpolations-Algorithmus diese Anpassung automatisch durch.

4.3.6 Maßeinheitenkonvertierung

Da Maßeinheiten bei der Modellierung von Energiesystemen eine wichtige Rolle spielen, enthält *PlaNet* ein Modul zur automatischen und konsistenten Maßeinheitenkonvertierung. In *PlaNet* ist festgelegt, daß alle Werte einer Zeitreihe dieselbe zusammengesetzte Einheit besitzen, die aus einer Kombination von bis zu zwei Zähler- und Nennereinheiten besteht. Die Einheiten sind in Einheitenklassen eingeteilt, wie Arbeit, Leistung, Masse, Zeit, Fläche, Volumen und Geld. Energiemaßeinheiten wären z. B. GJ, tSKE, Cal, BTU oder kWh. Für jede Einheitenklasse ist eine Basiseinheit festgelegt, z. B. Joule für Arbeit oder Watt für Leistung. Zur Umrechnung wird für jede Einheit der Umrechnungsfaktor in die Basiseinheit der Klasse definiert. Die Umrechnung z. B. von *toe* in *tSKE* vollzieht sich in zwei Schritten. Zuerst wird *toe* in *J* umgerechnet und dann *J* in *tSKE*. (1 toe = $42{,}73 \cdot 10^9$ J = 1,46 tSKE). Dieses Verfahren erfordert zwar zwei Rechenschritte, aber nur einen einzigen Umrechnungsfaktor pro Einheit (in die Basiseinheit) und ist daher damit immer konsistent.

Die zusammengesetzte Einheit einer neuen Zeitreihe wird aus der Standardeinheit des Attributes im Zugriffsschlüssel der Zeitreihe bestimmt. Die Standardeinheit eines Attributs setzt sich ebenfalls aus bis zu zwei Zählern und Nennern zusammen. Bei manchen Attributen sind einzelne Einheiten jedoch z. B. von der Mengeneinheit der entsprechenden Güter abhängig. So wird der Emissionsfaktor des Kohlekraftwerkes in Abb. 4-2 in *t/GJ* angegeben, also in Masse CO_2 pro Verbrennungswärme der Kohle. Die Mengeneinheiten der beteiligten Güter, die im RES festgelegt werden, bestimmen hier die zusammengesetzte Einheit der Zeitreihe. Daher kann die Standardeinheit eines Attributs Platzhalter enthalten, die auf Einheiten verweisen, die erst in der Fallstudie definiert werden. Platzhalter existieren für die Mengeneinheit der Güter, für die Geldeinheit, in der alle Kostenberechnungen vorgenommen werden, für die Dauer der Bilanzierungsperiode und für die Zeitbezugseinheit, die für zeitbezogene Größen eine gemeinsame Zeiteinheit festlegt. Platzhalter werden beim Anlegen einer Zeitreihe durch die konkreten in der Fallstudie definierten Einheiten ersetzt.

Um Daten so abspeichern zu können, wie in der Literatur dokumentiert, und um Umrechnungsfehler während der Dateneingabe zu vermeiden, kann die zusammengesetzte Einheit einer Zeitreihe von der Standardeinheit abweichen. Jede Zeitreihe besitzt daher zwei zusammengesetzte Einheiten, die Originaleinheit und die Berechnungseinheit. Zu Beginn sind Originaleinheit und Berechnungseinheit gleich und entsprechen der Standardeinheit des entsprechenden Attributs, wobei die enthaltenen Platzhalter ersetzt wurden. Die Originaleinheit bezieht sich auf die Eingabewerte und kann vom Benutzer verändert werden. Die Berechnungseinheit bestimmt die für eine konsistente Berechnung notwendige Einheit und kann nicht geändert werden. Wird eine platzhalterbeeinflussende Einheit nachträglich im RES geändert, müssen die Berechnungseinheiten der davon betroffenen Zeitreihen erneut bestimmt werden. Original- und Berechnungseinheit einer Zeitreihe sind immer kompatibel zueinander, d. h. die einzelnen Komponenten gehören derselben Einheitenklasse an.

Die Umrechnung erfolgt durch das Einheitenkonvertierungsmodul, das zu Beginn eines

Rechenlaufes die Zahlenwerte der Zeitreihen von der Originaleinheit in die Berechnungseinheit umrechnet. Beispiel: Der Nutzungsgrad eines Kraftwerks beschreibt das Verhältnis zwischen den Energieflüssen Strom und Kohle und wird in *MWh/GJ* angegeben, wenn im RES der Strom in *MWh* und die Kohle in *GJ* bilanziert wird. Die Berechnungseinheit der Zeitreihe ist daher *MWh/GJ*. In der Praxis wird der Nutzungsgrad jedoch dimensionslos angegeben, die Originaleinheit ist also *MWh/MWh*. Vor einem Rechenlauf müssen die Werte der Zeitreihe von *MWh/MWh* in *MWh/GJ* umgerechnet werden. Die Bestimmung des Umrechnungsfaktors wird anhand des Beispiels in Tabelle 4-5 und in Gleichung (4-8) beschrieben, in dem DM_{95} */(mon · MW)* in DM_{90} */(a · kW)* umgerechnet werden.

Tabelle 4-5: Maßeinheitenkonvertierung in *NetWork*

Maßeinheitenbeschreibung			**Einheiten-klasse**	**Umrechnungsfaktor zur Basiseinheit**		**Basiseinheit**
Zähler 1	von	DM_{95}	Geld	$Z1_{orig}$	0,409	DM_{70}
	in	DM_{90}	Geld	$Z1_{ziel}$	0,479	
Zähler 2	-	-	-	-	-	-
Nenner 1	von	mon	Zeit	$N1_{orig}$	2 592 000	s
	in	a	Zeit	$N1_{ziel}$	31 104 000	
Nenner 2	von	MW	Leistung	$N2_{orig}$	1 000 000	W
	in	kW	Leistung	$N2_{ziel}$	1 000	

$$1\ \frac{DM[95]}{mon\ \ MW} = \frac{\dfrac{Z1_{orig}}{N1_{Ziel}}\ \dfrac{Z2_{orig}}{Z2_{Ziel}}}{\dfrac{N1_{orig}}{N1_{Ziel}}\ \dfrac{N2_{orig}}{N2_{Ziel}}}\ \frac{DM[90]}{a\ \ kW}$$

$$= \frac{\dfrac{0{,}8}{0{,}937} * 1}{\dfrac{2\ 592\ 000}{31\ 104\ 000} * \dfrac{1\ 000\ 000}{1\ 000}}\ \frac{DM[90]}{a\ \ kW} \qquad (4\text{-}8)$$

$$= \frac{0{,}8539}{0{,}0833 * 1\ 000}\ \frac{DM[90]}{a\ \ kW} = 0{,}0102\ \frac{DM[90]}{a\ \ kW}$$

Vor der Umrechnung wird die Kompatibilität der Einheiten daraufhin überprüft, ob die Anzahl der Elemente im Nenner und Zähler identisch ist und ob es für jedes Element der Originaleinheit eine Entsprechung in der Berechnungseinheit gibt. Eine Entsprechung liegt vor, wenn beide Elemente derselben Einheitenklasse angehören.

4.3.7 Hierarchische Strukturen im RES

Die Anzahl der Prozesse, Güter, Regionen und Attribute kann sehr groß werden. Für Dateneingabe, Retrieval und Auswertung ist es notwendig, Gruppen bilden zu können. Gruppendefinitionen können eingesetzt werden, um die Anzahl der Daten auf einen Datenausschnitt zu reduzieren, indem die Gruppe als "Filter" verwendet wird. Auf diese Weise kann das Retrieval z. B. auf die Kostendaten von Stromerzeugungstechnologien eingeschränkt werden. Alle anderen Daten, die nicht zur Attributgruppe "Kosten" und zur Prozeßgruppe "Stromerzeugungstechnologien" gehören, werden ausgeblendet. Gruppendefinitionen eignen sich auch, um Summationen durchzuführen und z. B. die gesamten CO_2-Emissionen der Stromerzeugung zu ermitteln. Dieser Vorgang wird als "Aggregation" von Ergebnissen bezeichnet. "Filter" und "Aggregationen" sind ein wesentlicher Bestandteil der Funktionalität von *NetWork*.

Gruppen werden mit Hilfe von hierarchischen Gliederungsbäumen für jede einzelne Objektkategorie definiert. Dadurch ist es auch möglich, Gruppen von Gruppen zu bilden. Gruppen entsprechen den Knoten der Baumstruktur. Die Anzahl der Ebenen und der Knoten in einem Gliederungsbaum ist nicht begrenzt. Prozesse, Güter, Regionen und Attribute können als Endknoten ("Blätter") mit der Baumstruktur verknüpft werden, allerdings dürfen sie nicht in einer Baumstruktur gemischt werden. Um Doppelzählungen bei der Aggregation auszuschließen, darf jedes Objekt nur einmal in einem Gliederungsbaum vorkommen. Für jede Objektkategorie lassen sich beliebig viele Gliederungsbäume definieren, um unterschiedliche Klassifizierungsprinzipien zu realisieren. So lassen sich z. B. die Stromerzeugungstechnologien nach Brennstoffen wie in Abb. 4-10 oder nach Lastbereichen gruppieren.

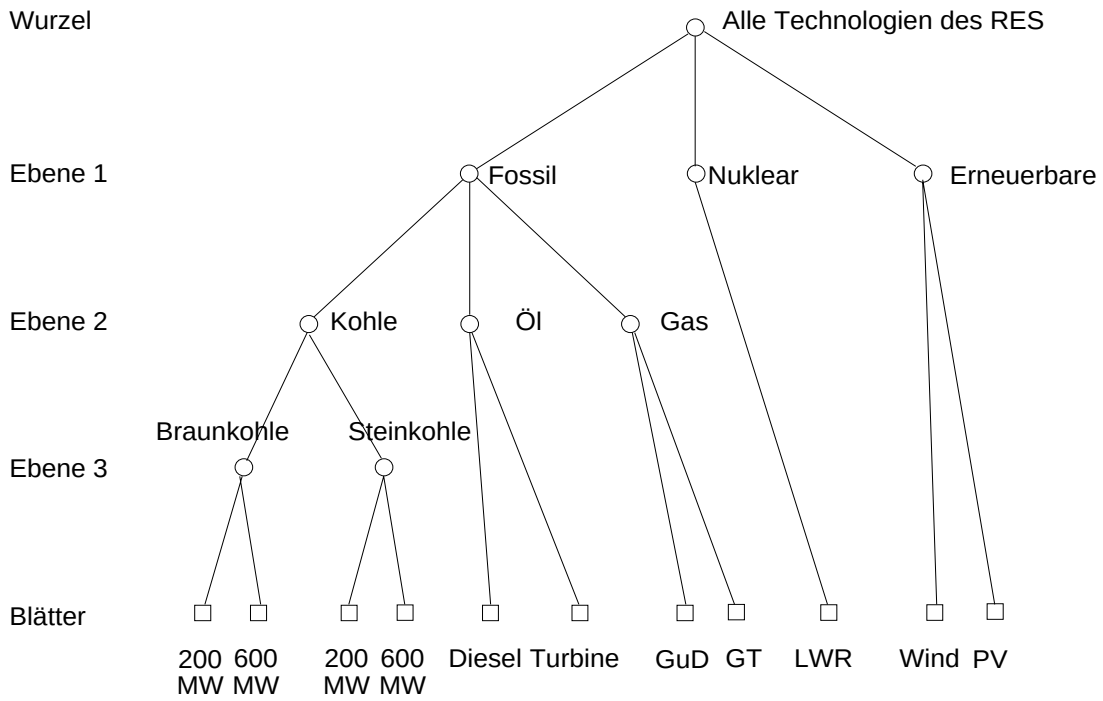


Abb. 4-10: Beispiel eines hierarchischen Gliederungsbaums

4.3.8 Datenmodell

In diesem Kapitel wird das Datenmodell des Datenbanksystems *NetWork* vorgestellt. Ein Datenbanksystem ist "die Gesamtheit aller für den Betrieb einer Datenbank notwendigen Informations- und Informatikkomponenten" /106/. Ein Datenmodell beschreibt die logische Struktur der Daten. Drei Datenmodelle sind besonders verbreitet, das hierarchische Datenmodell, das Netzwerkmodell und das relationale Datenmodell. Alle Datenmodelle unterscheiden *Entities* und *Relationships*. Entitäten (Entities) sind beliebige Objekte, die sich eindeutig identifizieren lassen. Mengen ähnlicher Entities werden zu Sets (Entitätenmengen) zusammengefaßt. Eine Beziehung (Relationship) ist eine Zuordnung zwischen Entities. Die Eigenschaften der Entities werden durch Attribute beschrieben.

Im hierarchischen Modell werden die Daten in einer Baumstruktur verwaltet. Jede Entität ist einem und nur einem anderen untergeordnet, d. h. jedes Datenobjekt kann nur ein "Elternpaar" jedoch beliebig viele "Kinder" haben, was einer 1:n-Beziehung entspricht. Dabei kann die Hierarchie beliebig viele Stufen enthalten. N:m-Beziehungen wie sie z. B. zwischen Maschinen und Bauteilen bestehen (eine Maschine besteht aus mehreren Bauteilen), können in diesem Datenmodell nur durch redundante Speicherung modelliert werden, d. h. die Daten der Bauteile müssen dupliziert werden. Die Suche nach einem Datenobjekt ist nur über einen bestimmten Pfad des Baumes möglich. Hierarchische Datenbanken haben den Vorteil, daß sie sich wie unstrukturierte Dateien auch sequentiell bearbeiten lassen.

Im Netzwerkmodell kann ein Datenobjekt mehreren anderen untergeordnet sein. Netzwerk-datenmodelle entstehen formal aus hierarchischen Modellen dadurch, daß Entities gleichzeitig Mitglied in mehreren Hierarchien sein können, wodurch aus der Baumstruktur ein Netzwerk entsteht. Somit können auch n:m-Beziehungen adäquat abgebildet werden. Das Netzwerkmodell kann als eine Verallgemeinerung des hierarchischen Datenmodells angesehen werden. Sein Vorteil liegt in der Redundanzfreiheit und der Flexibilität.

Im relationalen Datenmodell /107/ werden Entitäten in Tabellen (Relationen) zusammengefaßt, wobei in einer Spalte Entitäten desselben Attributs stehen. Jede Zeile bildet einen Tupel von Entitäten, den sogenannten "Record". Im relationalen Datenmodell werden im Gegensatz zu anderen Datenmodellen nur Daten und keine Beziehungen zwischen Datenobjekten explizit dargestellt. Beziehungen werden erst durch Vergleichen von korrespondierenden "globalen" Attributen in verschiedenen Tabellen realisiert. Die vollständige Entkopplung der Datenbereitstellung von ihrer zukünftigen Verwendung ermöglicht dem relationale Datenmodell eine redundanzfreie, physische Speicherung, erfordert jedoch einen Mehraufwand bei der Erstellung von Abfragen, was insbesonders die Antwortzeiten beeinflußt. Die Flexibilität des Designs und die Standardisierung der Abfragesprache SQL (Structured Query Language) haben zu einer weiten Verbreitung von relationalen Datenbanksystemen (RDBMS) geführt.

Für die Realisierung von *NetWork* wurde das relationale Datenmodell verwendet. Zur Eliminierung von Redundanzen im Datenbankdesign wurde eine Normalisierung durchge-

führt. Redundanz ist in einem Datenbestand genau dann vorhanden, wenn ein Teil des Bestands ohne Informationsverlust weggelassen werden kann. Dies führt zu einem erhöhten Speicheraufwand und zu sogenannten Mutationsanomalien, wenn redundant gespeicherte Daten nicht mitmutiert (aktualisiert) werden. Ziel der Normalisierung ist es, die Attribute so zu Tabellen zu gruppieren, daß innerhalb der Tabellen keine Redundanzen auftreten.

Eine Relation befindet sich nach Codd in der *1. Normalform*, wenn die Tupel sich paarweise unterscheiden und alle Attribute nur einzelne Werte aus dem zulässigen Wertebereich enthalten. Dies impliziert, daß die Attribute keine innere Struktur haben dürfen. Eine Relation befindet sich in der *2. Normalform*, wenn jedes nicht zum Identifikationsschlüssel gehörige Attribut voll von diesem abhängig ist, d. h. wenn es nicht von Teilen sondern nur vom ganzen Identifikationsschlüssel funktional abhängig ist. Ein Identifikationsschlüssel ist ein Attribut oder eine Attributskombination, welches jedes Tupel einer Relation eindeutig identifiziert. Eine Relation befindet sich in der *3. Normalform*, wenn kein Attribut, das nicht zum Identifikationsschlüssel gehört, transitiv von diesem abhängt, d. h. wenn kein Attribut von einem anderen Attribut abhängt, das vom Schlüssel abhängt. Die Normalformen bauen aufeinander auf. Die Normalisierung geschieht durch Aufspaltung der Relation. Befindet sich eine Relation in der 3. Normalform (TNF, third normal form), heißt sie auch "normalisiert".

Das Entity-Relationship-Diagramm /108/ dokumentiert die Struktur relationaler Datenmodelle. Tabellen (Relationen) werden als Rechtecke und Beziehungen (Relationships) als Kanten dargestellt. Im Datenmodell von *NetWork* (Abb. 4-11) werden alle Tabellen und ihre Beziehungen dargestellt. Ein Pfeil von Tabelle A zu Tabelle B zeigt an, daß der Schlüssel von Tabelle A in Tabelle B referenziert wird. Dies entspricht einer 1:n Beziehung, wobei *NetWork* als globale Attribute zum Aufbau der Beziehungen Referenznummern verwendet. Eine ausführliche Beschreibung des Datenmodells findet sich in /109/. Die Tabellen lassen sich in sechs Klassen einteilen:

- RES: Definition der RES-Struktur und Datenverwaltung,
- Strategie: Verwaltung und Dokumentation der Konzeption der Fallstudie,
- Bäume: Verwaltung von Objekten und Gliederungsbäumen,
- Allgemein: Dokumentation, Zähler, Status, Protokoll, Einstellungen,
- System: Attributliste, Maßeinheitenverwaltung, Zeitzonen,
- Multiuser: Tabellen zur System- und Benutzerverwaltung.

Eine Übersicht über alle *NetWork*-Tabellen befindet sich in Tabelle 4-6. *NetWork* ist fallstudienorientiert, d. h., daß für jede Fallstudie ein kompletter, eigenständiger Satz Tabellen angelegt wird, der nur Daten aus einer Fallstudie enthält. Eine Ausnahme sind die Systemtabellen, die für alle Fallstudien gleich sind und daher nur einmal zentral gespeichert werden. Den Kern des Datenbanksystems bilden die Tabellen zur Verwaltung der RES-Struktur, der Zeitreihenschlüssel und der Daten. In Tabelle R_PRO werden alle Prozesse des RES eingetragen. R_COM beinhaltet eine Liste aller Güter, während R_NET die Vernetzung der

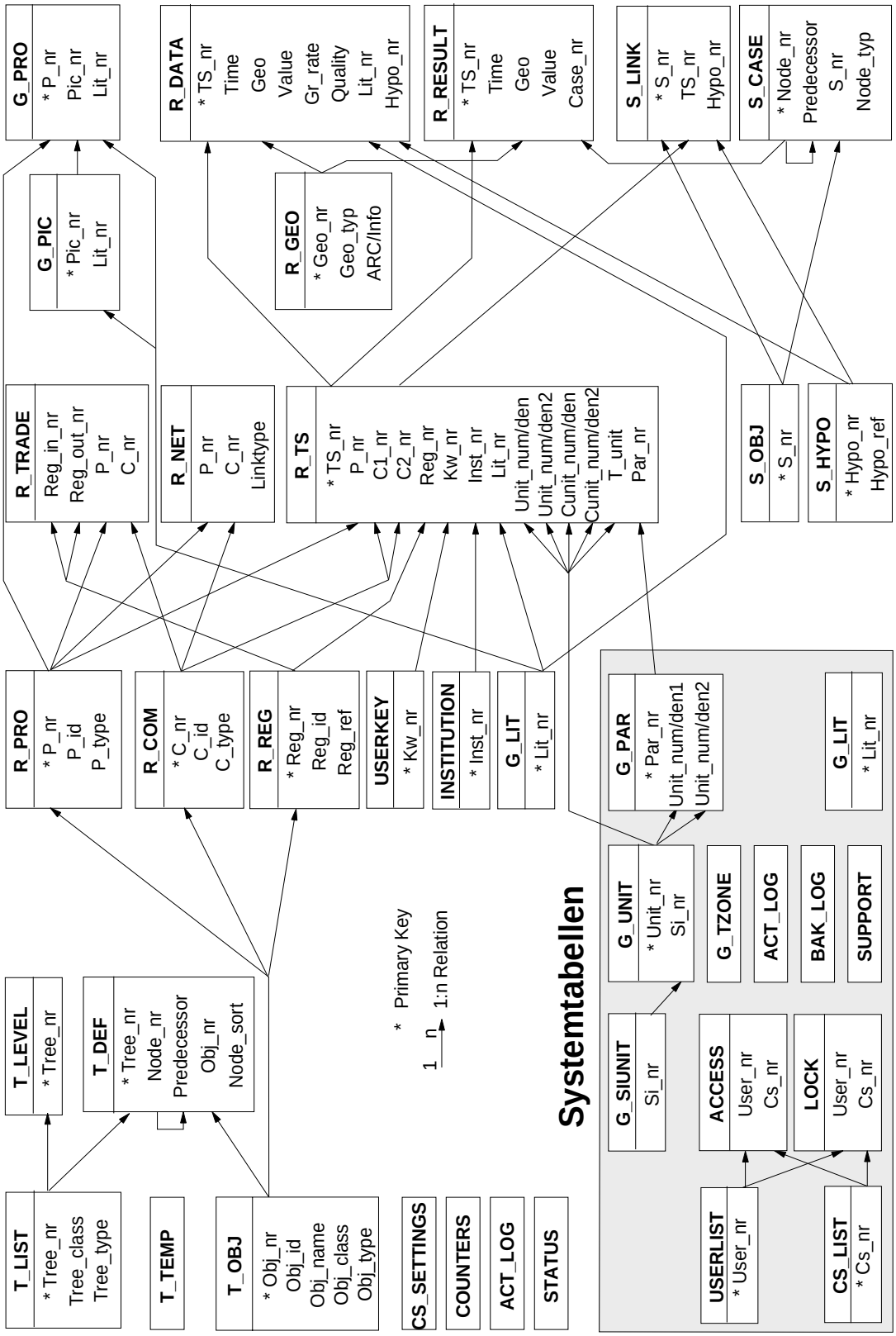


Abb. 4-11: Das strukturierte Entity-Relationship-Diagramm von *NetWork*

Tabelle 4-6: Relationale Tabellen in *NetWork*

Tabelle	Klasse	Beschreibung
R_PRO	RES	Liste aller Prozesse im RES
R_COM	RES	Liste der Commodities im RES
R_NET	RES	Netzwerkstruktur des RES
R_TS	RES	Liste der Zeitreihen
R_DATA	RES	Vom Benutzer eingegebene Werte von Zeitreihen
R_RESULT	RES	Berechnete Werte von Zeitreihen
R_REG	RES	Liste aller in der Fallstudie definierten Subregionen
REG_TRADE	RES	Struktur des regionalen Austauschs von Commodities
R_GEO	RES	Liste geographischer Objekte
INSTITUTION	RES	Liste der Institutionen, die Daten liefern
USERKEY	RES	Liste der benutzerdefinierten Schlüsselwörter
S_HYPO	Strategie	Liste der Hypothesen
S_OBJ	Strategie	Liste strategischer Objekte: Probleme, Ziele, Szenarien, Strategien, Maßnahmen
S_LINK	Strategie	Verknüpfung strategischer Objekte mit Zeitreihen
S_CASE	Strategie	Liste der berechneten Cases
T_LIST	Bäume	Liste der Gliederungsbäume
T_OBJ	Bäume	Liste der Baumknoten
T_DEF	Bäume	Definition der Baumstruktur
T_LEVEL	Bäume	Bedeutung der Knotenebenen
T_TEMP	Bäume	Redundante Adjazenzliste der Gliederungsbäume
COUNTERS	Allgemein	Liste der Zählerstände in NetWork-Tabellen
G_LIT	Allgemein	Liste der Literaturquellen
G_PRO, G_PIC	Allgemein	Dokumentation der Technologien, Systemdiagramme
ACT_LOG	Allgemein	Protokoll der Benutzeraktivitäten
STATUS	Allgemein	Status der Berechnungsmodule
CS_SETTINGS	Allgemein	Fallstudienspezifische Benutzereinstellungen
G_PAR	Zentral	Attribut Liste
G_SIUNIT	Zentral	Liste der Einheitenklassen
G_UNIT	Zentral	Liste der Einheiten
G_TZONE	Zentral	Liste der Zeitzonen
CS_LIST	Multiuser	Liste der Fallstudien
USERLIST	Multiuser	Liste der Benutzer
ACCESS	Multiuser	Zugriffsrechte auf die Fallstudien
LOCK	Multiuser	Liste der Fallstudien, die in Benutzung sind
ACT_LOG, BAK_LOG	Multiuser	Protokoll der Benutzeraktivitäten
SUPPORT	Multiuser	Technical Support Anfragen der Benutzer

Prozesse mit den Gütern speichert. G_PAR enthält die Liste aller verfügbaren Attribute, wobei die Attribute den möglichen inhaltlichen Bedeutungen gespeicherter Informationen entsprechen. R_TS verwaltet die Zugriffsschlüssel (Attribut/Prozeß/Com_1/Com_2) der gespeicherten Zeitreihen. Der Zugriffsschlüssel setzt sich dabei, wie schon in Kapitel 4.3.2 erläutert, aus einem Verweis auf ein Attribut in G_PAR und einem RES-Zuordnungsschlüssel zusammen, der die Position der Information im RES lokalisiert. Diese Position wird durch einen Verweis auf die Nnummer der entsprechenden Einträge in R_COM bzw. R_PRO verschlüsselt. Sind Teilregionen in der Fallstudie definiert, wird die Zeitreihe einer Region aus R_REG zugeordnet. In REG_TRDE wird der Im- und Export von Güter zwischen Teilregionen abgebildet. Die Tabelle USERKEY enthält einen benutzerdefinierbaren Schlüsselsatz, der in R_TS als alternativer Zugriffsschlüssel verwendet werden kann. In R_TS wird auch die Maßeinheit der Zeitreihe (Originaleinheit und Berechnungseinheit) als Verweis auf einen Eintrag in G_UNIT gespeichert, in der alle Maßeinheiten eingetragen sind. Die Einheitenklassen sind in G_SIUNIT definiert.

Jede Tabelle bekommt als globales Attribut eine Nummer, die für den Zugriffsschlüssel steht (Schlüsselwechsel). Werte einer Zeitreihe werden unter Bezugnahme auf diese Zeitreihennummer in der Tabelle R_DATA abgelegt. Dabei wird für jede einzelne Zahl ein Datensatz in R_DATA angelegt, der neben dem Wert und dem Zeitbezug der Information auch die Zuordnung zu einer Hypothese enthält. Hypothesen werden in der Tabelle S_HYPO definiert. In R_DATA werden auch Quelle, Qualität, Bearbeiter sowie Datum und Uhrzeit der Bearbeitung für jede Zahl dokumentiert. Um eine Koppelung mit Geographischen Informationssystemen (GIS) zu ermöglichen, können die Daten geographischen Objekten aus der Tabelle R_GEO zugeordnet werden. Grundsätzlich gibt es zu einer Zeitreihe zwei Arten von Daten: vom Benutzer eingegebene Daten und durch Berechnungen ermittelte Daten. Unter Berechnungen versteht man hier sowohl die Datenaufbereitung vor dem Modellauf (Unit Conversion, Vererbung, Interpolation) als auch die Ergebnisse eines Modellaufs. Alle vom Benutzer eingegebene Werte finden sich in R_DATA. Die entsprechenden für den Modellauf aufbereiteten Inputdaten werden dagegen in R_RESULT gespeichert, ebenso wie die Ergebnisse.

Die Konzeption einer Fallstudie wird in den mit S_* beginnenden Tabellen dokumentiert. Die Komponenten einer Fallstudie sind Probleme, Ziele, Szenarien, Trends, Strategien und Maßnahmen. Sie werden in S_OBJ definiert und beschrieben. Hier werden ebenfalls die logischen Beziehungen der Komponenten untereinander definiert, z. B. welche Strategie welche Probleme lösen soll, welche Ziele sie verfolgt und aus welchen Maßnahmen sie besteht. Zur quantitativen Beschreibung können den Komponenten mit Hilfe der Tabelle S_LINK Zeitreihen mit ihren entsprechenden Hypothesen zugeordnet werden. In der Tabelle S_CASE werden die zu berechnenden Fälle definiert (vgl. hierzu Kapitel 4.5).
Gliederungsbäume zur Strukturierung des RES werden in den mit T_* beginnenden Tabellen definiert. Bäume werden in T_LIST definiert, während die Knoten in der Tabelle T_OBJ enthalten sind. Hier befindet sich auch eine Kopie aller RES-Objekte (Prozesse, Güter und Teilregionen), da auch sie Endknoten von Bäumen sein können. Dabei sind die Schlüssel-

nummern der Objekte in T_OBJ und ihre Entsprechungen in R_PRO bzw. R_COM bzw. R_REG identisch. Die Baumstruktur mit beliebig viele Ebenen wird in T_DEF festgelegt. Für jede Knotennummer wird definiert, welches Element aus T_OBJ sie repräsentiert und welcher Knoten Vorgänger ist, wobei jeder Knoten aus T_OBJ nur einmal im Baum verwendet werden darf und die RES-Objekte nur als Endknoten vorkommen dürfen. Die inhaltliche Bedeutung der einzelnen Ebenen eines Baumes kann in T_LEVEL beschrieben werden.

Die allgemeinen Tabellen umfassen eine Literaturzitateverwaltung (G_LIT) zur Dokumentation der Quellen in R_DATA, eine Tabelle mit Systemdiagrammen und Bildern (G_PIC) zur Dokumentation von Prozessen sowie die Tabelle G_PRO, um Texte und Bilder den Prozessen zuzuordnen. Die Tabelle ACT_LOG enthält ein Protokoll aller Aktivitäten, die in der Fall-studie durchgeführt wurden. Auf diese Weise kann die Entwicklung einer Fallstudie dokumentiert und nachvollzogen werden, was insbesonders bei Teamarbeit von Bedeutung ist. Die Tabelle STATUS enthält für jedes Rechenmodul den aktuellen Zustand der Fallstudie. Sie sagt aus, ob Gleichungssystem und Ergebnisse der Rechenläufe noch aktuell sind oder neu erstellt werden müssen. In der Tabelle CS_SETTINGS werden alle fallstudienspezifischen Einstellungen gespeichert, wie Name und Beschreibung der Fallstudie, Bearbeiter, Modellierungsperiode, Währungseinheit, Definition des Qualitätsschlüssels, Rechnerverzeichnisse und die zuletzt vom Bearbeiter gewählten Einstellungen der Benutzeroberfläche.

NetWork ist als Mehrplatz-Software für Computernetzwerke ausgelegt. Die Tabellen zur Multiuserverwaltung und die zentralen Tabellen G_PAR, G_UNIT und G_SIUNIT sind sogenannte Systemtabellen. Sie existieren im Gegensatz zu den anderen Tabellen nur einmal und sind für alle Fallstudien gleich. Daher werden sie separat von den anderen Tabellen der Fallstudien im Systemverzeichnis der *PlaNet*-Installation gespeichert. Die Verwaltung des Mehrbenutzersystems geschieht in CS_LIST, USERLIST, ACCESS und LOCK. CS_LIST enthält alle dem System bekannten Fallstudien. USERLIST enthält alle zugelassenen Benutzer. ACCESS stellt zwischen den Fallstudien und den Benutzern eine n:m-Beziehung für die Zugriffsrechte her. LOCK enthält alle momentan angemeldeten Benutzer und die Zugriffsberechtigungen, mit denen sie Fallstudien bearbeiten. Vier Zugriffsrechte sind definiert. "Read Only" verleiht nur Rechte zum Lesen und Analysieren der Daten. "Data Entry" ermöglicht es, Daten einzugeben aber nicht die Struktur des RES oder der Gleichungen zu ändern und Modellrechnungen durchzuführen. Mit "Write"-Berechtigung dürfen Daten eingegeben, Gleichungen modifiziert und Modellrechnungen durchgeführt werden. Benutzer mit "Exclusive"-Berechtigung können den gleichzeitigen Zugang zur Fallstudie für andere Benutzer sperren und dürfen die Fallstudie löschen. Das exklusive Zugriffsrecht kann eingesetzt werden, wenn z. B. Umstrukturierungen an Gliederungsbäumen durchgeführt werden, und verhindert werden soll, daß "Read Only"-Benutzer diese zur selben Zeit als Filter nutzen. Beim Anmelden (Login) muß jeder Benutzer sein gewünschtes Zugriffsrecht angeben, wobei er sein maximales Zugriffsrecht einschränken kann. Weitere Beschränkungen sind davon abhängig, welche anderen Benutzer schon für dieselbe Fallstudie angemeldet sind. Die Ein-

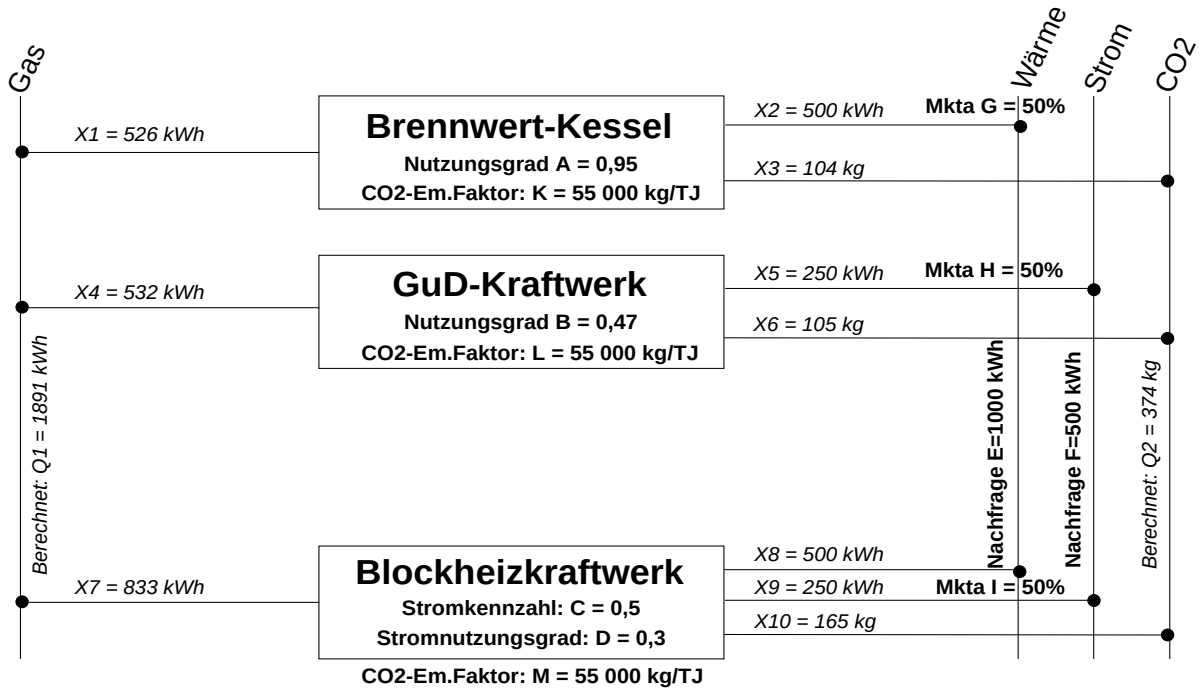
Tabelle 4-7: Hierarchie der Multiuser-Zugriffsrechte in *PlaNet*

Benutzer sind angemeldet mit:	**ReadOnly-Berechtigung**	**DataEntry-Berechtigung**	**Write-Berechtigung**	**Exclusive-Berechtigung**
Exclusive	gesperrt	gesperrt	gesperrt	gesperrt
Write	Multiple Access	gesperrt	gesperrt	gesperrt
DataEntry	Multiple Access	Multiple Access	gesperrt	gesperrt
ReadOnly	Multiple Access	Multiple Access	Multiple Access	gesperrt

schränkung der Zugriffsrechte ist in Tabelle 4-7 dargestellt. Sind mehrere Benutzer angemeldet, kann nur ein einziger Benutzer "Write"-Berechtigung haben und die Struktur des RES oder der Gleichungen verändern und Modellrechnungen durchführen. Alle anderen Benutzer haben nur noch Leseberechtigung. Die gleichzeitige aktive Bearbeitung einer Fallstudie ist auf die Dateneingabe beschränkt. Bearbeitete Zeitreihen in R_TS werden dann für andere Benutzer gesperrt, dies entspricht einem Record-Locking auf Zeitreihenebene.

Abb. 4-12 zeigt das Beispiel eines Referenzenergiesystems mit einem Brennwertkessel, einem GuD-Kraftwerk und einem Blockheizkraftwerk, die alle Gas verbrauchen und Strom bzw. Fernwärme erzeugen. Alle Prozesse emittieren CO_2. Der Bedarf an Raumwärme und Strom ist 1000 kWh bzw. 500 kWh. Der Marktanteil des Blockheizkraftwerkes an der Stromerzeugung ist 50%. Nutzungsgrade der Technologien sowie der CO_2-Emissionsfaktor von Gas sind angegeben. Aus diesen Angaben läßt sich die Flußbilanz für das RES berechnen. Insgesamt werden zur Deckung des Bedarfs in diesem Beispiel 1891 kWh Gas verbraucht und 374 kg CO_2 erzeugt. Ergebnisse der Flußbilanzierung sind in Abb. 4-12 kursiv dargestellt.

Das Beispiel illustriert, wie Daten für die Flußberechnung in die entsprechenden Tabellen von *NetWork* eingetragen werden. Um das Datenmodell verständlicher zu machen, enthalten die Beispieltabellen nur die wichtigsten Felder. In R_PRO werden drei Prozesse, in R_COM vier Güter eingetragen. Das System vergibt automatisch jedem Objekt des RES eine Nummer. Unter Bezugnahme auf die Nummer werden in R_NET die Verknüpfungen eingetragen, und vermerkt, ob sie Input- oder Output-Links sind. In R_TS wird der Zugriffsschlüssel für die Zeitreihe definiert. Die Zeitreihe Nr. 1 enthält den Nutzungsgrad (Attribut Nr. 1) von Wärme (Gut Nr. 2) zu Gas (Gut Nr. 1) für den Brennwertkessel (Prozeß Nr. 1). Das Verhältnis zweier Flüsse ist per Definition als Gut-2 / Gut-1 festgelegt. Die eigentliche Zahl "0,95" wird in R_DATA unter der Zeitreihennummer 1, dem Jahr 1996 und der Hypothese "Referenz" eingetragen. Analog wird mit den anderen Daten verfahren.



Attribute: G_PAR

	Attributname
1	Nutzungsgrad
2	Marktanteil
3	Menge
4	Emissionsfaktor
5	Stromkennzahl
6	Investitionskosten
7	Variable Kosten
8	Preis
9	Fluß
10	....

Prozesse: R_PRO

	Prozeßname
1	Brennwert-Kessel
2	GuD-Kraftwerk
3	Blockheizkraftwerk
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Commodities: R_COM

	Commodity-Name
1	Gas
2	Wärme
3	Strom
4	CO2
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Netzwerk-Struktur: R_NET

	PRO	COM	Type
1	1	1	i
2	1	2	o
3	1	4	o
4	2	1	i
5	2	3	o
6	2	4	o
7	3	1	i
8	3	2	o
9	3	3	o
10	3	4	o

Zugriffsschlüssel: R_TS

TS_nr.	Attribut	Prozeß	Com. 1	Com. 2	Kommentar
1	1	1	1	2	Nutzungsgrad A
2	4	1	1	4	Emissionsfaktor K
3	1	2	1	3	Nutzungsgrad B
4	4	2	1	4	Emissionsfaktor L
5	1	3	1	3	Stromnutzungsgrad D
6	4	3	1	4	Emissionsfaktor M
7	5	3	2	3	Stromkennzahl C
8	2	3	3	-	Marktanteil I
9	3	-	2	-	Nachfrage E
10	3	-	3	-	Nachfrage F
11	2	2	3	-	Marktanteil H
12	2	1	2	-	Marktanteil G
13					

Daten: R_DATA

TS_No.	Jahr	Wert	Hypothese
1	1996	0,95	Ref
2	1996	55000	Ref
3	1996	0,47	Ref
4	1996	55000	Ref
5	1996	0,3	Ref
6	1996	55000	Ref
7	1996	0,5	Ref
8	1996	50%	Ref
9	1996	1000	Ref
10	1996	500	Ref
11	1996	50%	Ref
12	1996	50%	Ref

Abb. 4-12: Beispiel für die Tabellenstruktur von *NetWork*

4.3.9 Schnittstelle zu Rechenmodulen

NetWork speichert Energiesystemdaten mit Bezug auf die topologische Struktur des Referenzenergiesystems. Da das RES als Realmodell unabhängig von der mathematischen Struktur des formalen Modells ist, wird eine Trennung von Informationsverwaltung und Planungsinstrument erreicht. FORTRAN-Planungsinstrumente wie *MESSAGE*, *EFOM* oder *MARKAL* strukturieren ihre Datenbanken so, wie sie vom Computerprogramm während der Berechnung abgearbeitet werden - die Daten müssen sich dem Programm anpassen. Bei *NetWork* ist es umgekehrt. Die Daten sind vom Berechnungsprogramm abgekapselt und werden nach der Beschreibungslogik des Energiesystems abgespeichert. Der zentrale Zugriffsschlüssel auf die Daten ist dabei das RES. Planungsinstrumente zur Berechnung eines RES müssen sich in ihrer Struktur an die Datenbank anpassen, um gespeicherte Parameter in die Gleichungen einzufügen und die berechneten Variablen zurückzuspeichern.

Das *NetWork*-Konzept berücksichtigt damit neueste Erkenntnisse des Software-Engineering, die fordern, daß bei großen Softwareprojekten eine Koordination der Anwendungen über eine gemeinsame Datenschnittstelle anzustreben ist. Zehnder weist in /110/ darauf hin, daß es bei der Organisation von großen Softwareprojekten sinnvoll ist,

- die Datenbestände von den einzelnen Anwendungen abzutrennen und einer eigenen Datenverwaltung (Datenbankverwaltungssystem) zu unterstellen,
- die Datenbestände in einer möglichst allgemeinen, von einzelnen Programmiersprachen unabhängigen Form zu beschreiben (logische Datenstruktur, "konzeptionelles Schema" der Datenbank),
- die Datenbestände möglichst sicher und effizient zu organisieren (Maßnahmen zu Datenintegrität, Datenkonsistenz, Datensicherheit, Datenschutz).

Das Konzept einer zentralen Datenbank mit modularen Berechnungsmodulen ist nicht neu. Schon vor 25 Jahren wurde an der Universität Stuttgart mit der Entwicklung von *RSYST* /81/ ein ähnliches Konzept verfolgt. *RSYST* ist ein integriertes Modulsystem zur Berechnung von Kernreaktoren. Es sollte die Situation überwinden, daß Programmsysteme für spezialisierte Anwendungsbereiche nicht untereinander koppelbar waren, keine einheitliche Datenbasis besaßen, umständlich und uneinheitlich zu benutzen und schwer erweiterbar waren. *RSYST* sollte ein Programmsystem sein, das sowohl für den Anwender ohne DV-Kenntnisse als auch für den Entwickler großer Modellsysteme geeignet war. Daher hatte die Forderung nach leichter Bedienbarkeit die höchste Priorität. Weitere Anforderungen bei der Entwicklung von *RSYST* waren die konsistente und zentrale Verwaltung der Daten, die Datenbereitstellung nach logischen Gesichtspunkten, die flexible Verknüpfung von Daten und Programmen, die Koppelung von Modellen, automatische Konsistenzprüfungen, hohe Verfügbarkeit, Portabilität zwischen verschiedenen Rechenanlagen und eine leichte Erweiterbarkeit der Funktionalität /111/.

Im Zentrum von *RSYST* stand eine hierarchische Datenbank, in der alle Daten unter einheitlichen Gesichtspunkten verwaltet und bereitgestellt wurden. *RSYST* verwendete ein

Vielzahl von Datentypen: Zeitreihen, Energiebilanzen, Input-Output-Tabellen, lineare Modellstrukturen für ökonometrische Modelle, Texte, Tabellen, Matrizen, Bilder und Funktionen. Methoden und Modelle waren als Programmodule realisiert, die um die Datenbank gruppiert waren. Ein Modul war eine abgeschlossene Programmeinheit, die eine definierte Funktion ausführte. Die Verbindung der Module zu Modulsequenzen erfolgte mit Hilfe einer *RSYST*-Sprache und über genau definierte Datenschnittstellen (Interfaces). Das "Steuerprogramm" kontrollierte die Reihenfolge, in der die Module ausgeführt wurden. Die Datenübergabe erfolgte über ein "Datenbasisverwaltungsprogramm". Für den Datenzugriff standen vordefinierte *RSYST*-Unterprogramme zur Verfügung, die die für den jeweiligen Datentyp notwendigen und erlaubten Operationen bereitstellten. Die *RSYST*-Funktionen waren in FORTRAN-Subroutinen realisiert und standen über die normalen, vom Betriebssystem verwalteten Bibliotheken zur Verfügung. Das *RSYST*-Konzept zeichnete sich durch leichte Wartbarkeit und übersichtliche Handhabung aus und ermöglichte den Austausch einzelner Funktionen, ohne die Systemumgebung zu beeinflussen. Einzelne Module ließen sich getrennt entwickeln und die Zahl der Module war für neue Methoden beliebig erweiterbar. Der Einsatz des in FORTRAN implementierten *RSYST* war zunächst auf UNIX- und Vax-Workstations begrenzt. Erst das Betriebssystem Windows NT und die Möglichkeit, verschiedene Programmiersprachen zu integrieren (vor allem FORTRAN und C++) machten eine Portierung von *RSYST* auf die heute verfügbaren leistungsfähigen und preisgünstigen PC’s möglich /112/. Die aktuelle Version 3.7.0 von *RSYST* (Reengineering System for Scientific Technical Software) für Windows NT 4.0 basiert auf einer objektorientierten Datenbank. Viele konzeptionelle Ideen und Prinzipien von *RSYST* wurden bei der Entwicklung von *NetWork* aufgegriffen.

Bevor das Konzept für die Integration von Planungsmodulen mit *NetWork* erläutert wird, soll zuerst das Konzept von *MARKAL* und *EFOM* diskutiert werden. Beide linearen Optimierungsmodelle verwenden eine netzwerkorientierte Beschreibung des Energiesystems, die sich im Gegensatz zum RES dadurch auszeichnet, daß aus der Topologie des Energiesystems ein eindeutiges Gleichungssystem abgeleitet werden kann, d. h. sie beschreiben Realmodell und formales Modell gleichzeitig. Da eine Vielzahl von mathematischen Beschreibungen für das gleiche RES denkbar sind, müssen beide Instrumente in ihrer Topologiebeschreibung zusätzliche Restriktionen und Konventionen einführen.

EFOM ist "flußorientiert" und bildet jeden Fluß im Energiesystem als unabhängige Variable ab. Prozesse ("Links") können nur einen Input und einen Output haben ("upstream and downstream node"). Zusätzliche Inputs oder Outputs müssen als "ancillaries" oder "byproducts" deklariert werden, die proportional zum Output des Prozesses sind. Hat ein Prozeß mehrere unabhängige Flüsse, wie das in Abb. 4-13 gezeigte Kohlekraftwerk mit zwei alternativen Brennstoffen und Kraft-Wärme-Koppelung mit einer festen Stromkennzahl, muß er in eigenständige "Links" zerlegt werden, was zu virtuellen Prozessen und Gütern führt, die in der Realität keine Entsprechung haben, wie hier der "Kohle-Mix" oder der "Dampf".

MARKAL ist "prozeßorientiert" und ermöglicht mehrere Inputs und Outputs für einen Prozeß. Pro Prozeß ist jedoch nur ein unabhängiger Fluß zulässig. Alle anderen Flüsse sind

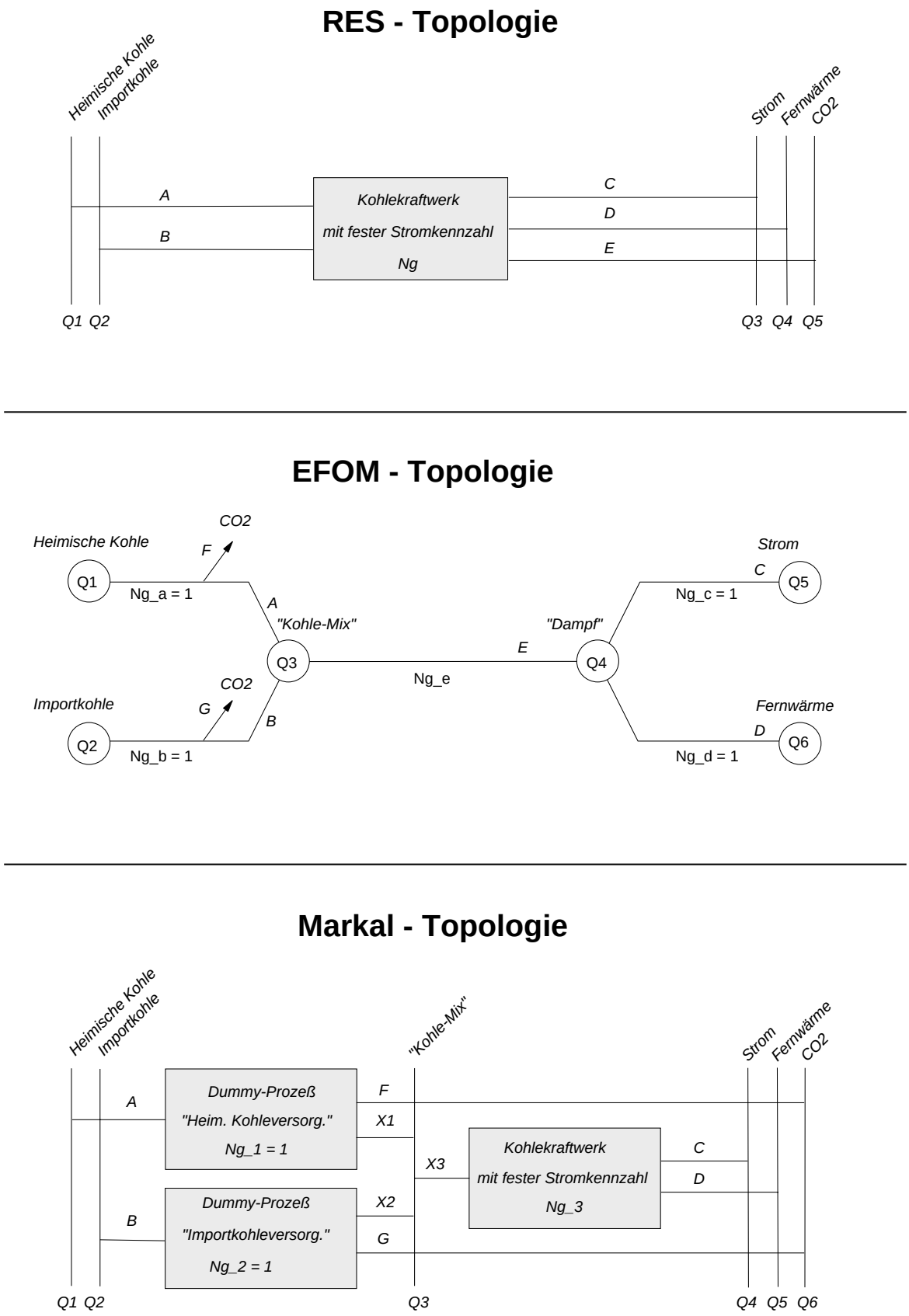


Abb. 4-13: Topologien verschiedener Energiesystemmodelle

RES - Gleichungen

Gleichungsspezifikation:

	Unabhängig	Abhängig	Upper Bound	Lower Bound
A: Dt. Kohle	X		Bnd1	
B: Importkohe	X			Bnd2
C: Strom	X			
D: Fernwärme		X		
E: CO2		X	Bnd3	

Variable:

Commodity Variable: Q1, Q2, Q3, Q4, Q5
Unabhängige Variable: A, B, C
Abhängige Variable: D, E

Parameter:

Ng, Em_fac1, Em_fac2,
Stromkennzahl, Bnd1, Bnd2, Bnd3

Transformationsgleichungen:

C + D = Ng * (A + B)
C = D * Stromkennzahl
E = A * Em_fac_1 + B * Em_fac_2

Erhaltungsgleichungen:

Q1 = A
Q2 = B
Q3 = C
Q4 = D
Q5 = E

Restriktionen:

A <= Bnd1
B >= Bnd2
E <= Bnd3

EFOM - Gleichungen

Variable:

Node-Variable: Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6
Flow-Variable: A, B, C, D, E
Byproducts: F, G

Parameter:

Ng_a, Ng_b, Ng_c, Ng_d, Ng_e
Em_fac1, Em_fac2, Bnd1, Bnd2, Bnd3
Stromkennzahl

Transformationsgleichungen:

Q1 = 1/Ng_a * A
Q2 = 1/Ng_b * B
Q3 = 1/Ng_e * E
Q4 = 1/Ng_c * C + 1/Ng_d * D
F = A * Em_fac1
G = B * Em_fac2
C = D * Stromkennzahl (PRALNOR)

Erhaltungsgleichungen:

Q3 = A + B
Q4 = E
Q5 = C
Q6 = D

Restriktionen:

A <= Bnd1
B >= Bnd2
F + G <= Bnd3

Markal - Gleichungen

Variable:

Main Output Variable: X1, X2, C
Commodity Variable: Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6

Parameter:

Ng_1, Ng_2, Ng_3,
Em_fac1, Em_fac2, Bnd1, Bnd2, Bnd3
Stromkennzahl

Transformationsgleichungen und Erhaltungsgleichungen:

Q1 = X1 * 1/Ng_1 (= A)
Q2 = X2 * 1/Ng_2 (= B)
Q3 = C * 1/Ng_3 (= X3)
Q3 = X1 + X2
Q4 = C
Q5 = C * 1/Stromkennzahl (= D)
Q6 = X1 * Em_fac1 + X2 * Em_fac2 (= F+G)

Restriktionen:

X1 * 1/Ng_1 (= A) <= Bnd1
X2 * 1/Ng_2 (= B) >= Bnd2
X1 * Em_fac1 + X2 * Em_fac2 (= F+G) <= Bnd3

Abb. 4-14: Gleichungssysteme verschiedener Energiesystemmodelle

proportional zu diesem "main fuel". Sollen mehrere Flüsse eines Prozesses unabhängig voneinander optimiert werden, wie z. B. bei einem Kraftwerk mit zwei alternativen Brennstoffen muß der Prozeß, ähnlich wie in *EFOM*, in virtuelle Prozesse zerlegt werden.

In *NetWork* sind diese Einschränkungen nicht notwendig, da die Erstellung des Realmodells und die des formalen Models in zwei Stufen stattfindet. Das Realmodell beschreibt die Topologie des Energiesystems mit Hilfe des RES und enthält keine implizite Anweisungen für die Erstellung eines formalen Modells. Die dafür benötigten zusätzlichen Spezifikationen des Gleichungsystems werden in dem jeweiligen Planungsmodul durchgeführt. Auf diese Weise können unterschiedliche formale Modelle für dasselbe RES definiert werden.

Abb. 4-14 zeigt, wie die Topologie des Energiesystems für die verschiedene Konzepte in das Gleichungssystem des formalen Modells übersetzt wird. Der RES-Ansatz braucht dazu noch eine zusätzliche, modulspezifische "Gleichungsspezifikation", die bei *EFOM* und *MARKAL* schon implizit in die Notation für die Topologiebeschreibung eingebettet ist. Um die Massenbilanzen in einem RES zu bilden, verwenden alle drei Konzepte ähnliche Ansätze. Die Transformationsgleichungen beschreiben die Flußumsetzungen in Prozessen. Für Güter gelten Erhaltungsgleichungen. Restriktionen können für einzelne Flüsse (hier eine Obergrenze für die heimische Kohle, eine Untergrenze für die Importkohle und eine Begrenzung des CO_2-Ausstoßes) oder für Güter festgelegt werden. In *EFOM* werden dazu aus den Flüssen die Gütervariable des "Upstream-Nodes" bestimmt. Für die "Downstream-Nodes" gelten Erhaltungsgleichungen. In *MARKAL* werden Gleichungen für alle Gütervariablen erstellt und dabei alle proportionalen Flüsse eines Prozesses im Gleichungssystem durch ihre Relation zum "Main Fuel" ersetzt. Die Transformationsgleichungen werden auf diese Weise in die Erhaltungsgleichungen eingearbeitet.

Weil das formale Modell bereits in der Topologie und damit in der Datenstruktur enthalten ist, können die *EFOM*- und *MARKAL*-Datenbanken nicht für andere Planungsinstrumente genutzt werden. Das Verständnis des formalen Modells ist Voraussetzung, um den Inhalt der Datenbank zu interpretieren - die Datenbank ist daher nicht als Informationssystem nutzbar. Hinzu kommt, daß alle in der Datenbank gespeicherten Informationen für die Erstellung des Gleichungssystems verwendet werden: *EFOM* und *MARKAL* verwenden eine datengetriebene Modellspezifikation, d. h. neue Zeitreihen bewirken die Erstellung zusätzlicher Gleichungen. Ihre Datenbanken können daher nur modellspezifische Daten verwalten und sind nicht in der Lage, Daten für mehrere Instrumente bereitzustellen.

NetWork soll als Modellierungsdatenbank für unterschiedliche Energiesystemmodelle und als modellunabhängiges Informationssystem genutzt werden können und darf daher nur die Spezifikation des Realmodells beinhalten. Für jedes Planungsinstrument wird eine zusätzliche Gleichungsspezifikation benötigt, mit der die im RES existierenden Freiheitsgrade zur Erstellung eines mathematischen Gleichungssystems festgelegt werden. Eine Gleichungsspezifikation besteht aus fest programmierten Regeln zur Erstellung von Gleichungen für Gruppen von RES-Objekten (Sets). Für die Simulation der Flüsse eines Energiesystems umfaßt die Gleichungsspezifikation Erhaltungsgleichungen für alle Güter, Transformations-

gleichungen 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 weggelassen würden. Wahlmöglichkeiten bei der Erstellung bestimmter Gleichungen (z. B. der Transformationsgleichungen) werden vom Modellierer festgelegt. Die modulspezifische Gleichungsspezifikation hat den Vorteil, daß alle Entscheidungen des Modellierers nur ein Modul betreffen und explizit dokumentiert werden. In *EFOM* oder *MARKAL* werden solche Entscheidungen implizit durch das Hinzufügen oder Weglassen bestimmter Zeitreihen (z. B. "upper bound") in der Datenbank getroffen, ein Verfahren, das nur dann möglich ist, wenn die Datenbank ausschließlich Daten eines Modelles verwaltet und wenn als Konvention vereinbart ist, daß alle vorhandenen Daten für einen Berechnungslauf verwendet werden.

Die drei Ebenen der *PlaNet*-Architektur bestehend aus Realmodell, formalem Modell und Daten werden in Abb. 4-15 gezeigt. Das RES als Topologie des Energiesystems ist dabei das wesentliche Strukturierungselement und für Daten und Gleichungen und damit die gemeinsame Schnittstelle. RES und Daten werden von *NetWork* verwaltet, während die Gleichungsspezifikation von den einzelnen Planungsinstrumenten verwaltet wird. Auf diese Weise wird es möglich, unterschiedliche Planungsinstrumente an das gleiche RES zu koppeln.

Zur Durchführung eines Modellaufes werden die Schritte, die der Matrixgenerator bei klassischen Modellen durchführt, in zwei Stufen unterteilt: die Erstellung und die Lösung des Gleichungssystems. Gleichungssysteme bestehen immer aus Gleichungen, Ungleichungen, Parametern und Variablen. Deshalb wurde eine standardisierte Vorgehensweise für Gleichungsgeneratoren konzipiert, die RES-Topologie, Gleichungsspezifikation und Daten zusam-

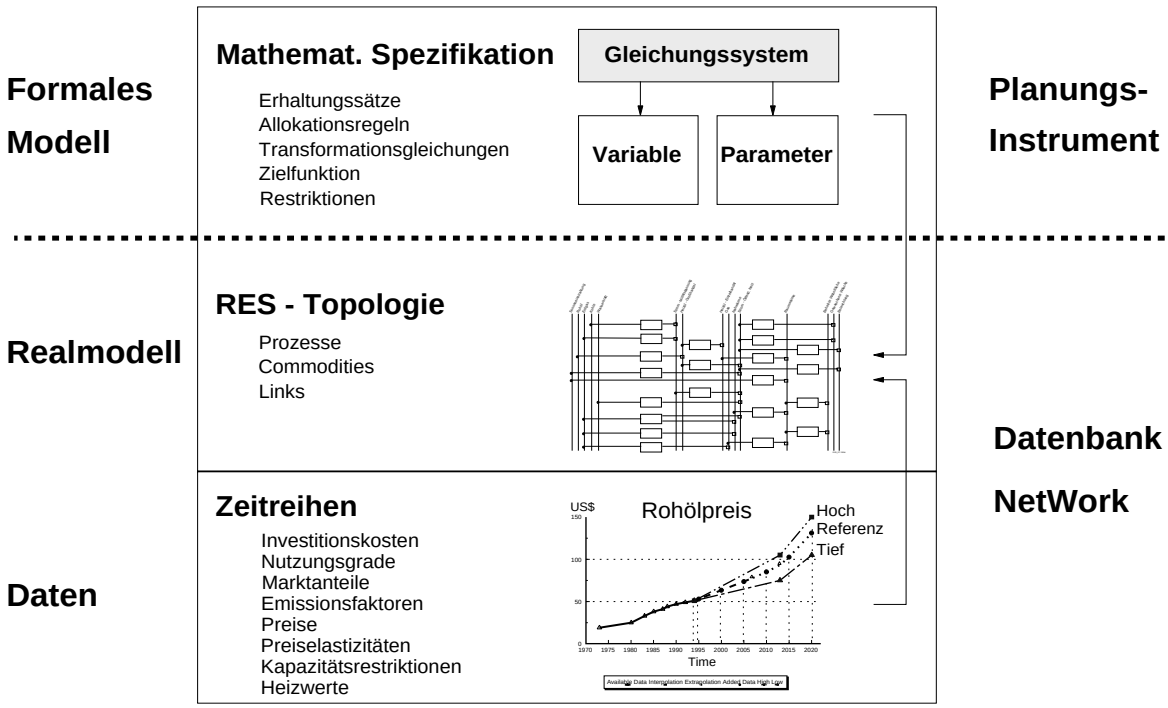


Abb. 4-15: Trennung von Daten und Gleichungen in der Datenbank *NetWork*

menbringt und das zu lösende Gleichungssystem erstellt. Der Gleichungsgenerator erstellt aus Gleichungsspezifikation und RES drei Listen mit den notwendigen Parametern, Variablen und Gleichungen. Parameter und Variable fungieren als Platzhalter im Gleichungssystem. Über den RES-Zugriffsschlüssel findet der Gleichungsgenerator für jede Variable und jeden Parameter die entsprechende Zeitreihe in *NetWork* und trägt die Referenz auf die Zeitreihe in die jeweilige Liste ein. Das komplette Gleichungssystem wird an einen allgemeinen, nicht modulspezifischen "Solver" zur Berechnung übergeben. Dieser ersetzt vor der Berechnung die Platzhalter durch die Werte aus den entsprechenden Zeitreihen. Der Gleichungsgenerator muß also nur dann ausgeführt werden, wenn sich das RES oder die Gleichungsspezifikation ändert. Werden nur Daten modifiziert, so hat dies keine Änderungen in den drei Listen zur Folge und der Solver kann sofort wieder neu gestartet werden.

Die Vorgehensweise des Gleichungsgenerators wird exemplarisch in Abb. 4-16 für das kleine Beispiel aus Kapitel 4.3.8, Seite 103 dargestellt. In diesem Beispiel wird der Einfachheit halber angenommen, daß für jeden Prozeß ein eigenes Modul zur Berechnung der Flüsse existiert. Die Module 1, 2 und 3 berechnen aus Nachfrage, Marktanteilen, Nutzungsgraden und Emissionsfaktoren die Flüsse der jeweiligen Prozesse. Modul 4 erstellt die Mengenbilanz für den Gasverbrauch und die CO_2-Emissionen. Berechnete Flüsse und Mengen

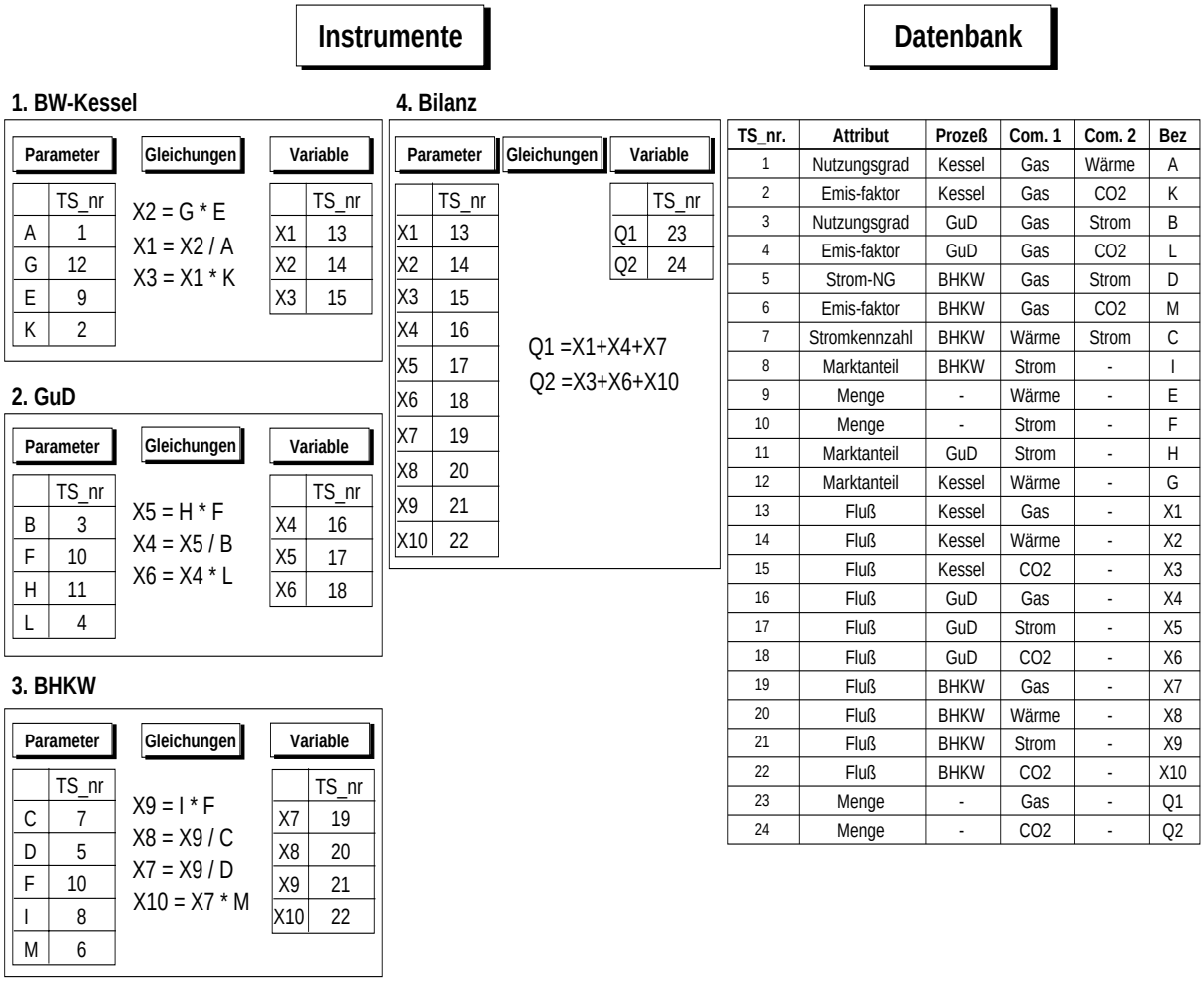


Abb. 4-16: Beispielschema der Modellschnittstelle von *NetWork*

werden in der Datenbank abgespeichert. Für jedes Modul erkennt man die drei Listen der Parameter, Variablen und Gleichungen mit den entsprechenden Verweisen auf die Datenbank. Das Beispiel zeigt, wie zwei Module auf die gleichen Daten zurückgreifen und wie Module gekoppelt werden. Die Stromnachfrage (Parameter F) kommt in den beiden Modulen "GuD" und "BHKW" als Parameter vor, ist in der Datenbank jedoch nur einmal gespeichert. Beide Module verweisen in ihrer Parameterliste auf die gleiche Zeitreihe und nutzen auf diese Weise dieselben Daten. Eine Änderung der Stromnachfrage wird in beiden Rechenmodulen berücksichtigt. Das Modul "Bilanz" ist an die Module 1, 2 und 3 angekoppelt. Die Variablen, die von den Modulen 1, 2 und 3 berechnet werden, sind Inputparameter für das Modul 4. Beide verweisen auf die gleichen Zeitreihen (13 - 22), so daß die Ergebnisse der ersten drei Module sofort als Input für Modul 4 zur Verfügung stehen. Die Definition der Gleichungssysteme der einzelnen Module stellt implizit sicher, daß die nachgekoppelten Module immer die aktuellen Ergebnisse verwenden.

Die Koppelung von Planungsinstrumenten durch dieses sogenannte "Hard Linking" war bisher nur mit hohem Programmieraufwand zu erreichen, da die Ergebnisse eines Moduls in das Datenformat des zweiten Moduls übertragen werden mußten und jedes Datenformat unterschiedlich war. Module, die sich an die *NetWork*-Datenbankschnittstelle halten, sind dagegen sofort koppelbar. Existieren ein Simulations- und ein Optimierungsinstrument, wird es z. B. möglich, das optimierte Energiesystem zu simulieren, also die Module parallel zu koppeln. Die mit Hilfe der Optimierung bestimmte kostengünstigste Lösung des Ausbaus eines Energiesystems kann dabei als Ausgangspunkt für die Simulation dienen. So wird es möglich, vorgegebene simulierte Strategien mit kostenoptimalen Strategien zu vergleichen. Ein Beispiel für eine sequentielle Koppelung von Planungsinstrumenten ist, die durch Optimierung bestimmte Flußbilanz eines RES mit dem Kostenmodul des Simulationsinstruments einer detaillierten Kostenanalyse zu unterziehen.

4.3.10 Vorteile eines standardisierten Datenbanksystems

Ein einheitliches Datenbanksystem für RES-basierte Planungsinstrumente ermöglicht

- die gleichzeitige Nutzung eines Datenbestandes durch mehrere Planungsinstrumente,
- eine einfachere Koppelung von Planungsinstrumenten durch einheitlichen Datenaustausch,
- eine höhere Wiederverwertbarkeit von Fallstudiendaten,
- die Harmonisierung der Entwicklung von Planungsinstrumenten,
- reduzierten Aufwand für die Softwareentwicklung durch Mehrfachnutzung von Modulen.

Die gleichzeitige Nutzung eines Datenbestandes und die Koppelung unterschiedlicher Planungsinstrumente wird durch einen institutionalisierten Datenaustausch erreicht. Zur Erstellung des Datensatzes besitzt jedes Instrument eine Liste, welche Inputparameter und berechneten Variablen welchen Zeitreihen in der Datenbank entsprechen. Benötigen zwei

Instrumente A und B den gleichen Parameter, verweisen A und B auf die gleiche Zeitreihe in der Datenbank. Verwendet das Instrument B Ergebnisse des Instruments A, so wird die Zeitreihe, die die Ergebnisvariable von A speichert, in B als Inputparameter definiert. In jedem Fall ist die Information in der Datenbank physikalisch nur einmal vorhanden. Damit ist die sonst nur manuell mögliche parallele oder sequentielle Koppelung realisiert.

Die Standardisierung vereinfacht den Datenaustausch zwischen Fallstudien, da trotz unterschiedlicher Planungsinstrumente immer die gleiche Datenstruktur verwendet wird. Wegen der einheitlichen Retrievalmöglichkeiten "versteht" der Modellierer auch Datenbanken, die mit ihm unbekannten Planungsinstrumenten erstellt wurden und kann geeignete Daten in die eigene Fallstudie übertragen. Kenntnisse des Planungsinstrumentes waren bisher eine notwendige Voraussetzung zum Verständnis des Datenformates. Eine bessere Wiederverwertung aufwendig erhobener Datenbestände ist ein wichtiger wirtschaftlicher Gesichtspunkt.

Erfahrungen in der Informatik haben bestätigt, daß eine genormte Datenschnittstelle zu einer besseren Modularisierbarkeit der Programme und zu einer Harmonisierung der einzelnen Module führt. Weil die Lebensdauer der Daten viel länger als die der Programme ist, ist es inzwischen die Regel, erst das Datenmodell zu definieren, die Daten zu kapseln und dann die Module an das Datenbanksystem zu koppeln. Modulare Bauweise und ähnliche Programmstrukturen erleichtern den Know-How-Transfer zwischen Modellentwicklern und führen langfristig zu einer Harmonisierung der methodischen Weiterentwicklung von Instrumenten.

Planungsinstrumente enthalten Dialogmasken zur Gleichungspezifikation, Regeln zur Konsistenzprüfung und Programme zur Berechnung des Gleichungssystems. Das Datenbanksystem enthält Module zur Dateneingabe, -verwaltung, -retrieval und -analyse. Verwenden verschiedene Instrumente das gleiche Datenbanksystem, müssen diese aufwendigen Module nur einmal entwickelt werden. Die Entwicklungskosten im Bereich Software-Engineering sinken.

4.4 Die Berechnungsmodule

PlaNet besitzt zwei Berechnungsmodule: *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost*. *PlaNet-Flow* ist ein lineares Netzwerkmodell zur Energiebedarfsanalyse, zur Simulation von Energiesystemen und zur Analyse von Umweltbelastungen. Das untersuchte Energiesystem wird von der volkswirtschaftlichen Aktivität bis zum Primärenergieverbrauch als Referenzenergiesystems abgebildet. *PlaNet-Flow* simuliert die physikalischen Flüsse des RES nach dem "accounting" Prinzip für eine vorgegebene Nachfrage und verschiedene Marktdurchdringungsstrategien der Umwandlungstechnologien und bestimmt die Energie- und Schadstoffbilanz des gesamten Energiesystems. Eingriffe in das Energiesystem werden durch Veränderungen der Marktanteile modelliert. *PlaNet-Cost* setzt auf der von *PlaNet-Flow* berechneten physikalischen Flußbilanzierung auf, bestimmt die erforderlichen Kapazitäten der Umwandlungstechnologien im RES und führt eine detaillierte Kostenrechnung durch. *PlaNet-Cost* berechnet die jährlichen Investitionskosten, Brennstoffkosten, fixen und variablen Betriebskosten für jede Technologie im RES. Zusätzlich werden für alle Güter (Commodities) des RES die spezifischen Gestehungskosten bestimmt. Zuletzt werden die über den Beobachtungszeitraum abdiskontierten Gesamtkosten des Energiesystems berechnet. Beide Module sind an das Datenbanksystem *NetWork* angebunden und können über diese Koppelung Daten austauschen. Typische Bestimmungsgrößen, die mit den Berechnungsmodulen von *PlaNet* ermittelt werden können, sind z. B.

- die Anteile der verschiedenen Energieträger in der Zukunft,
- das wirtschaftliche Potential dezentraler Stromerzeugung und seine Auswirkungen auf die zentrale Stromerzeugung,
- der Importbedarf an Rohöl und Mineralölprodukten,
- das wirtschaftliche Potential von Biomasse zur Reduzierung der fossilen Importe,
- das wirtschaftliche Potential für Wind- und Sonnenenergie,
- die Auswirkungen wirtschaftlichen Wachstums auf den Energieverbrauch,
- die Auswirkungen von Verhaltensänderungen der Verbraucher auf das Energiesystem.

Für eine Vielzahl von Maßnahmen lassen sich die Auswirkungen auf Energieverbrauch, Kosten und Schadstoffemissionen des Energiesystems analysieren. Dies sind z. B.

- Brennstoffsubstitution (z. B. 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,
- Einführung von Luftreinhaltungsmaßnahmen (Entschwefelung, Entstickung).

4.4.1 Architektur eines Berechnungsmoduls

Die Architektur der Rechenmodule in *PlaNet* resultiert aus der in Kapitel 4.3.9 beschriebenen Schnittstelle. Rechenmodule bestehen aus sechs Komponenten: der Dialogkomponente zur Festlegung der *Gleichungsspezifikation (I)*, dem *Konsistenzchecker (II)*, dem *Gleichungssystemgenerator (III)*, dem *Zeitreihengenerator (IV)*, der *Mappingroutine (V)* zur Datenaufbereitung und dem *Solver (VI)*. Die Durchführung eines Modellaufs, d. h. die Berechnung eines sogenannten *Case*, verläuft für jedes Rechenmodul nach dem in Abb. 4-17 dargestellen Schema. Die grau unterlegten Komponenten gehören dabei zum Rechenmodul, die weißen zum Datenbanksystem *NetWork*. Die Komponenten I bis III sind modulspezifisch, die anderen Komponenten sind für alle Berechnungsmodule gleich.

Nachdem der Benutzer in *NetWork* das RES definiert hat, legt er über eine modulspezifische Eingabemaske die Spezifikation des Gleichungssystems fest. Dies ist nur für diejenigen Bereiche notwendig, in denen sich das Gleichungssystem nicht implizit aus dem RES ergibt, wie z. B. die Erhaltungssätze für Güter, sondern Gestaltungsfreiraum vorhanden ist. Die Spezifikation wird in der modulspezifischen Tabelle *Modul*_STRUCT gespeichert. Der *Konsistenzchecker* prüft, ob das Gleichungssystem vollständig und korrekt definiert wurde und liefert ein detailliertes Fehlerprotokoll. Der *Gleichungssystemgenerator* erstellt nach dem Schema in Abb. 4-18 aus RES und Gleichungsspezifikation mit Hilfe modulspezifischer festprogrammierter Regeln ein lineares Gleichungssystem mit Platzhaltern für Parameter und Variable. Die resultierenden Gleichungen werden in Tabelle *Modul*_EQ, die Liste der Parameter in Tabelle *Modul*_PAR und die Liste der Variablen in Tabelle *Modul*_VAR gespei-

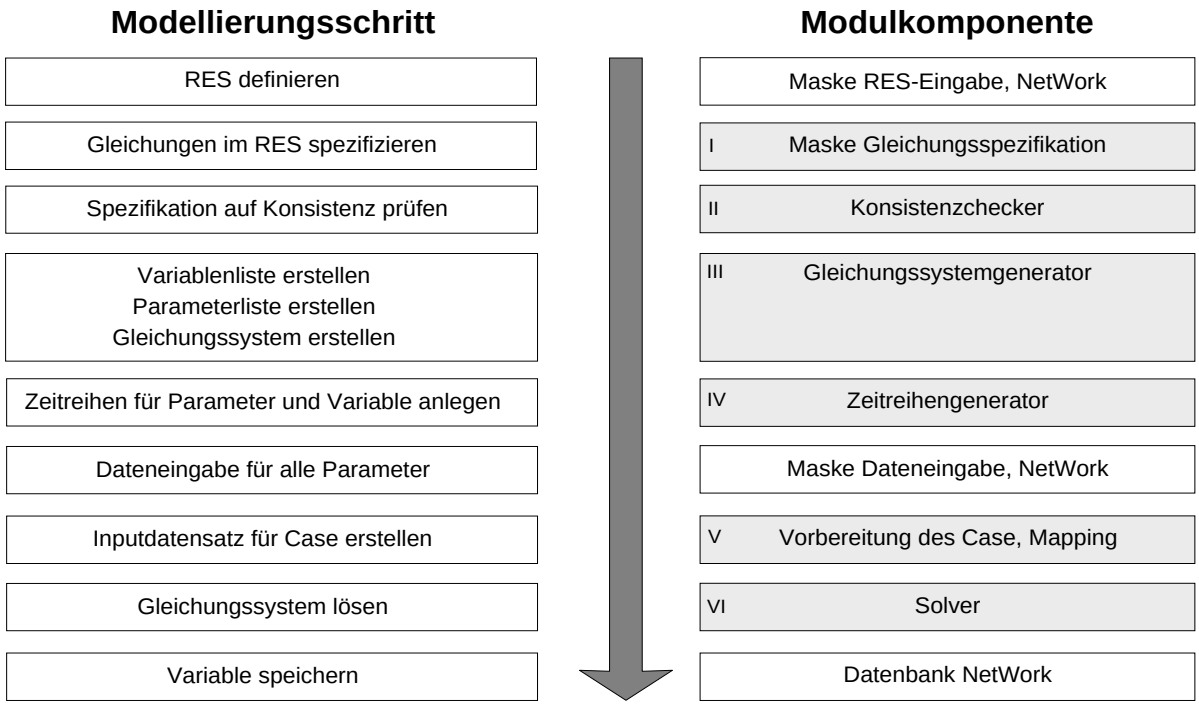


Abb. 4-17: Die sechs Komponenten eines Rechenmoduls in *PlaNet*

chert. Das Gleichungssystem muß für den momentanen PlaNet-Solver sequentiell auflösbar sein. Die Lösungsreihenfolge der Gleichungen wird vom *Sequencer* des Gleichungsgenerators ermittelt. Anschließend prüft der *Zeitreihengenerator*, ob für alle Parameter und Variablen des Gleichungssystems Zeitreihen in R_TS existieren und legt fehlende an. Die zum Parameter bzw. zur Variable korrespondierende Zeitreihennummer wird in den entsprechenden Listen vermerkt. Auf diese Weise wird aus RES und Gleichungsspezifikation das vollständiges Profil der notwendigen Eingabedaten erstellt, die vom Benutzer geliefert und in R_DATA eingetragen werden müssen.

Da eine Zeitreihe für unterschiedliche Hypothesen definiert sein kann, muß für jeden Parameter aus *Modul*_PAR eine Hypothese festgelegt werden, die zur Berechnung eines Cases verwendet werden soll. Die Belegung der Parameterliste mit Hypothesen wird vom *Case-Manager* verwaltet (vgl. Kapitel 4.5). Vor der Berechnung des Gleichungssystems für einen Case wird durch die *Mappingroutine* der eigentliche Inputdatensatz für diesen Case erstellt. Dazu werden alle vom Benutzer eingegebenen Werte aus R_DATA in die richtige Maßeinheit umgerechnet, dann werden für die gewählten Hypothesen die Vererbungsregeln und die Interpolation der vorhandenen Werte auf die Modellierungsperiode ausgeführt. Die so ermittelten Werte werden unter der Casenummer in R_RESULT abgespeichert, damit die für die Berechnung verwendeten Inputdaten dokumentiert sind. Der *Solver* fügt die Inputdaten in die entsprechenden Parameter des Gleichungssystems ein, berechnet die Werte der Variablen und speichert sie unter der Casenummer in R_RESULT ab. Der Solver in *PlaNet* ist standardisiert und arbeitet mit allen Modulen zusammen, die ein lineares Gleichungssystem sequentiell berechnen (vgl. Kapitel 4.4.4).

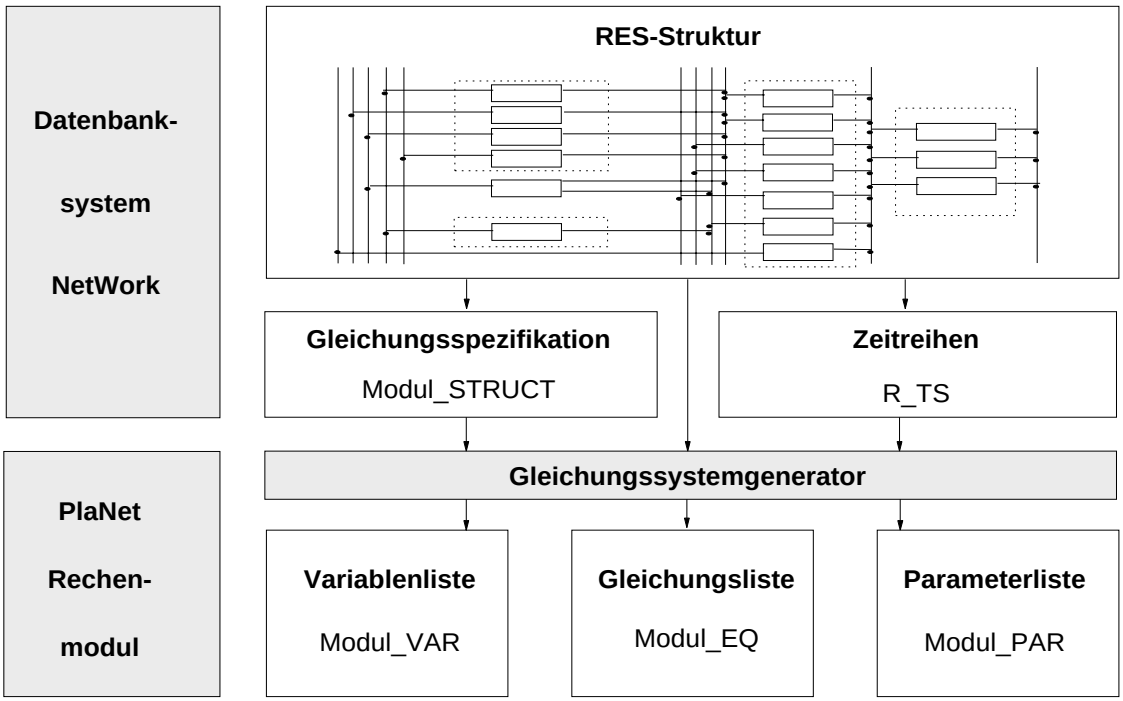


Abb. 4-18: Prinzip des Gleichungssystem-Generators

4.4.2 *PlaNet-Flow*: Simulation der Flüsse des Energiesystems

Das Rechenmodul *PlaNet-Flow* ist ein technologieorientiertes Simulationsmodell, welches Energiesysteme von der Aktivität über die Energiedienstleistung bis zur Primärenergie abbilden kann. *PlaNet-Flow* ist ein "Accounting Framework", das die physikalischen Flüsse (Energie, Material, Emissionen, Schadstoffe) im Referenzenergiesystem "buchhalterisch" bilanziert. Entscheidungsvariablen sind die Marktanteile konkurrierender Technologien, die exogen vorzugeben sind. Durch Vorgabe der zeitlichen Entwicklung der Nachfrage und durch eine Variation der Marktanteile ist es möglich, Veränderungen und Eingriffe in die zukünftige Entwicklung des Systems zu simulieren.

Das Schema der Flußberechnung wird in Abb. 4-19 vorgestellt. Die Bilanzierungsperiode kann in *PlaNet* frei gewählt werden und ist in den meisten Fallstudien 1 Jahr. Inputs (Parameter) für die Berechnung in *PlaNet-Flow* sind

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

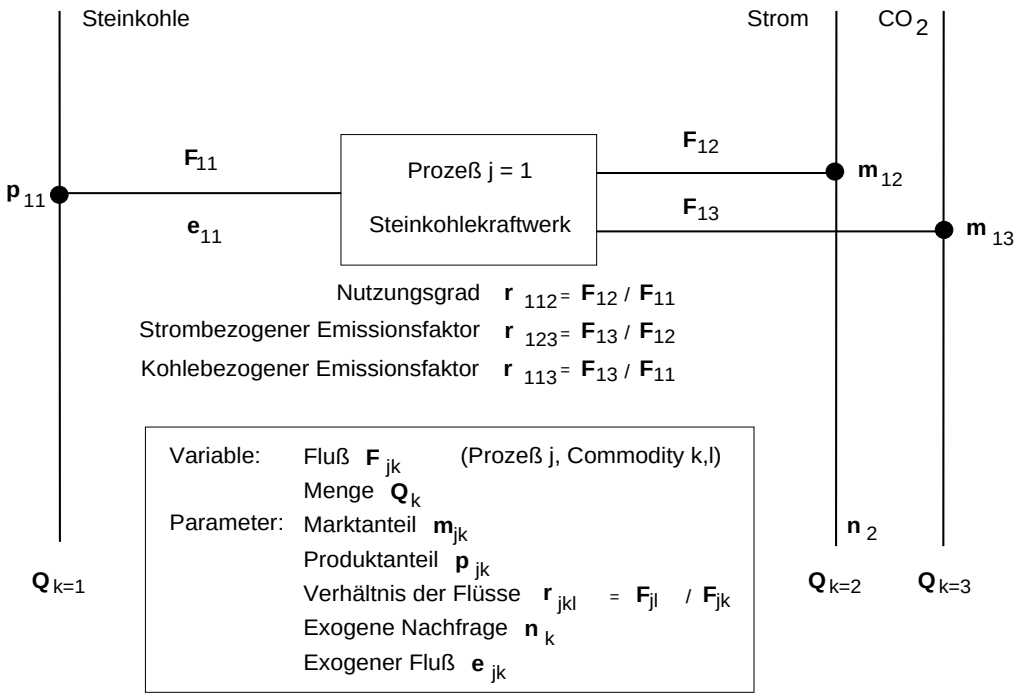


Abb. 4-19: Parameter und Variable zur Berechnung der Flüsse im RES

In *PlaNet-Flow* gibt es zwei Klassen von Variablen:

- die Mengen der Güter, bezogen auf eine Bilanzierungsperiode,
- die Flüsse der Gützer (pro Bilanzierungsperiode) in oder aus den Prozessen.

PlaNet-Flow verwendet fünf Typen von Gleichungen zur Berechnung der Flußbilanz. Mit exogenen Vorgabegleichungen lassen sich die Mengen von Gütern oder von Flüssen für die Berechnung fest vorgeben. Allokationsgleichungen beschreiben, wie die Menge eines Gutes auf verschiedene Prozesse aufgeteilt wird. Geschieht dies für Prozesse, die ein Gut erzeugen, spricht man von Marktallokation. Bei Prozessen, die ein Gut verbrauchen spricht man von Produktallokation. Transformationsgleichungen beschreiben für einen Prozeß die Umwandlungen der Güter. *PlaNet-Flow* verwendet die lineare Übertragungsfunktion als Umwandlungsgleichung. Die Bilanzgleichungen werden in produktions- und verbrauchsseitige aufgeteilt, um die Mengenvariable der Güter explizit in das Gleichungssystem einführen zu können. Die Richtung der Flüsse im RES sowie die Unterscheidung zwischen produktions- und nachfrageseitigen Variablen ist für die mathematische Formulierung irrelevant. Tabelle 4-8 listet alle Parameter, Variable und Gleichungstypen auf, die in *PlaNet-Flow* vorkommen.

Tabelle 4-8: Variable, Parameter und Gleichungstypen des Moduls *PlaNet-Flow*

Indices	j	Prozesse
	k	Commodities
Variable = Modul-Outputs	Q_k	Menge der Commodity k
	F_{jk}	Fluß der Commodity k in oder aus dem Prozeß j
Parameter = Modul-Inputs	n_k	Exogen vorgegebene Nachfrage nach Commodity k
	e_{jk}	Exogen vorgegebener Fluß einer Commodity k in/aus Prozeß j
	m_{jk}	Marktanteil des Prozesses j an der Produktion der Commodity k
	p_{jk}	Produktanteil des Prozesses j am Verbrauch der Commodity k
	r_{jkl}	Verhältnis zweier Flüsse F_{jl} / F_{jk} eines Prozesses j bei der Umwandlung einer Commodity l in eine Commodity k (l <> k)
Gleichungstypen	EX	Exogene Vorgabegleichungen
	AL	Allokationsgleichungen
	TR	Transformationsgleichungen
	CP	Bilanzgleichungen für die Produktion von Commodities
	CC	Bilanzgleichungen für den Verbrauch von Commodities

Wendet man die fünf Gleichungstypen aus *PlaNet-Flow* auf das RES in Abb. 4-19 an, lassen sich die folgenden Gleichungen aufstellen:

Exogene Vorgabegleichungen (EX):

$$\begin{aligned} Q_1\ (t) &= n_1\ (t)\ :\ \textit{Exogene Vorgabe des Kohleverbrauchs} \\ Q_2\ (t) &= n_2\ (t)\ :\ \textit{Exogene Vorgabe der Stromnachfrage} \\ Q_3\ (t) &= n_3\ (t)\ :\ \textit{Exogene Vorgabe der } CO_2\textit{–Emissionen} \end{aligned} \tag{4-9}$$

Allokationsgleichungen (AL):

$$\begin{aligned} F_{12}\ (t) &= m_{12}\ (t) * Q_2\ (t)\ ,\ \textstyle\sum_j m_{j2}\ (t) = 1\ :\ \textit{Marktanteil}_j\ \textit{an Stromerzeugung} \\ F_{13}\ (t) &= m_{13}\ (t) * Q_3\ (t)\ ,\ \textstyle\sum_j m_{j3}\ (t) = 1\ :\ \textit{Marktanteil}_j\ \textit{an } CO_2\textit{–Erzeugung} \\ F_{11}\ (t) &= p_{11}\ (t) * Q_1\ (t)\ ,\ \textstyle\sum_j p_{j1}\ (t) = 1\ :\ \textit{Produktant}_j\ \textit{am Steinkohleverbrauch} \end{aligned} \tag{4-10}$$

Transformationsgleichungen (TR):

$$\begin{aligned} F_{12}\ (t) &= r_{112}\ (t) * F_{11}\ (t)\ :\ \textit{Nutzungsgradgleichung} \\ F_{13}\ (t) &= r_{123}\ (t) * F_{12}\ (t)\ :\ \textit{Strombezogene Bestimmung der Emissionen} \\ F_{13}\ (t) &= r_{113}\ (t) * F_{11}\ (t)\ :\ \textit{Kohlebezogene Bestimmung der Emissionen} \end{aligned} \tag{4-11}$$

Bilanzgleichungen für die Produktion eines Gutes (Commodity Production, CP):

$$\begin{aligned} Q_2\ (t) &= \sum_j F_{j2}\ (t)\ :\ \textit{Produktions–Bilanzgleichung Strom} \\ Q_3\ (t) &= \sum_j F_{j3}\ (t)\ :\ \textit{Produktions–Bilanzgleichung } CO_2 \end{aligned} \tag{4-12}$$

Bilanzgleichungen für den Verbrauch eines Gutes (Commodity Consumption, CC):

$$Q_1\ (t) = \sum_j F_{j1}\ (t)\ :\ \textit{Verbrauchs–Bilanzgleichung Kohle} \tag{4-13}$$

Das Gleichungssystem in dem Beispiel aus Abb. 4-19 hat drei Mengenvariable Q_1, Q_2, und Q_3 und drei Flußvariable F_{11}, F_{12} und F_{13}. Insgesamt lassen sich für diese 6 Variablen 12

Tabelle 4-9: Notwendige Gleichungsspezifikationen für *PlaNet-Flow*

Prozesse	Klassifizierung der Flußvariablen: exogen, abhängig, unabhängig
	Angabe der Transformationsgleichungen
Commodities	Markierung der exogen vorgegebenen Commodities
	Festlegung der linksseitigen und rechtsseitigen Allokationstypen
	Angabe der Rest-Flußvariablen (Residuals)

Gleichungen formulieren. Da nur 6 Gleichungen zur Lösung notwendig sind, läßt sich das Gleichungssystem leicht überbestimmen. Um dies zu verhindern, muß der Benutzer vorgeben, welche Gleichungen gebildet werden sollen. In der Gleichungsspezifikation, die in Tabelle 4-9 zusammengefaßt ist, wird für jeden Prozeß der Typ aller Flußvariablen festgelegt. Der Benutzer entscheidet, welche Flußvariable exogen vorgegeben werden. Für die anderen, endogen errechneten Flußvariablen legt er fest, ob sie unabhängig oder abhängig sind. Dann werden die Flußvariablen durch Transformationsgleichungen verknüpft. Unabhängige Flußvariable werden außerhalb der Transformationsgleichungen bestimmt und dem Prozeß vorgegeben. Sie entsprechen in Optimierungsmodellen den Entscheidungsvariablen und können im Simulationsmodell durch Marktanteile gesteuert werden. Abhängige Flußvariable errechnen sich mit Hilfe der Transformationsgleichungen aus den unabhängigen Flußvariablen. Für die Mengenvariablen der Güter wird festgelegt, ob sie exogen vorgegeben oder endogen bestimmt werden. Für Güter, die von mehr als einer unabhängigen Flußvariable erzeugt bzw. verbraucht werden, muß der linksseitige bzw. rechtsseitige Allokationstyp (Marktallokation bzw. Produktallokation) festgelegt werden. Prinzipiell sind an dieser Stelle alternative Allokationstypen möglich, vom Erhaltungssatz (Summe der Verknüpfungen = Menge des Gutes) bis zu komplexeren Algorithmen, wie z. B. einer Allokation, die sich aus einer Dauerlinie ableitet (Lastallokation). Bisher wurden zwei Typen implementiert: Marktanteil / Produktanteil, die den Erhaltungssatz erfüllen und Marktaufteilung/Produktaufteilung, bei der die Summe aller Verknüpfungen nicht gleich der Menge des Gutes sein muß. Beim ersten Typ muß zusätzlich angegeben werden, welche Flußvariable als Restgröße (Residual) genommen werden soll. Diese wird dann endogen aus dem Erhaltungssatz bestimmt.

Die verschiedenen Schritte bei der Durchführung eines Modellaufs sollen exemplarisch an dem Beispiel in Abb. 4-20 durchgeführt werden. Der erste Schritt ist die Gleichungsspezifikation (Komponente I) für das Gleichungssystem dieses RES, das 10 Flußvariable und 4 Mengenvariable enthält. Die Flußvariablen F_{12} (Wärmeproduktion des Brennwertkessels), F_{23} (Stromproduktion des GuD-Kraftwerks) und F_{33} (Stromproduktion des BHKW) werden als unabhängig definiert, die anderen 7 Flußvariablen als abhängig. Kein Fluß soll exogen vorgegeben werden. Für 7 abhängige Flußvariable muß der Modellierer 7 linear unabhängige Transformationsgleichungen definieren, z. B. wie folgt:

Brennwertkessel	Wärme	= Nutzungsgrad * Gas	$F_{12} = r_{112} * F_{11}$
	CO_2	= Emissionsfaktor * Gas	$F_{14} = r_{114} * F_{11}$
GuD-Kraftwerk	Strom	= Nutzungsgrad * Gas	$F_{23} = r_{213} * F_{21}$
	CO_2	= Emissionsfaktor * Gas	$F_{24} = r_{214} * F_{21}$
Blockheizkraftwerk	Strom	= Stromnutzungsgrad * Gas	$F_{33} = r_{313} * F_{31}$
	Wärme	= (1/Stromkennzahl) * Strom	$F_{32} = (1/r_{323}) * F_{33}$
	CO_2	= Emissionsfaktor * Gas	$F_{34} = r_{314} * F_{31}$

Die Güter Strom und Wärme werden exogen vorgegeben. Ein Allokationstyp muß nur für die Produktion von Strom vergeben werden, da dies das einzige Gut ist, das von zwei unabhängigen Flußvariablen erzeugt wird, nämlich vom GuD-Kraftwerk und vom Blockheizkraftwerk. Alle anderen Güter haben linksseitig und rechtsseitig nur eine bzw. keine unabhängige Flußvariable. Die residuale Flußvariable für Strom soll die des GuD-Kraftwerks sein. Für die Wärmeerzeugung ist die einzige unabhängige Flußvariable (die des Brennwertkessels) automatisch die residuale Variable.

Als zweiter Schritt läuft der Konsistenzcheck (Komponente II) ab. Er prüft anhand mehrerer Regeln für Prozesse und Güter, ob die Gleichungsspezifikation zu einem lösbaren Gleichungssystem führt. Diese Regeln umfassen für jeden Prozess,

- ob alle Flußvariablen in den Transformationsgleichungen vorkommen,
- ob keine Flußvariable zweimal in einer Transformationsgleichung vorkommt,
- ob die Zahl der Transformationsgleichungen der Zahl der unabhängigen Flußvariablen entspricht,
- ob zwei Transformationsgleichungen nicht linear abhängig voneinander sind.

Der Konsistenzcheck für Güter prüft,

- ob bei mehr als einer unabhängigen Flußvariable ein Allokationstyp festgelegt wurde,
- ob die residuale Flußvariable eine unabhängige Flußvariable ist.

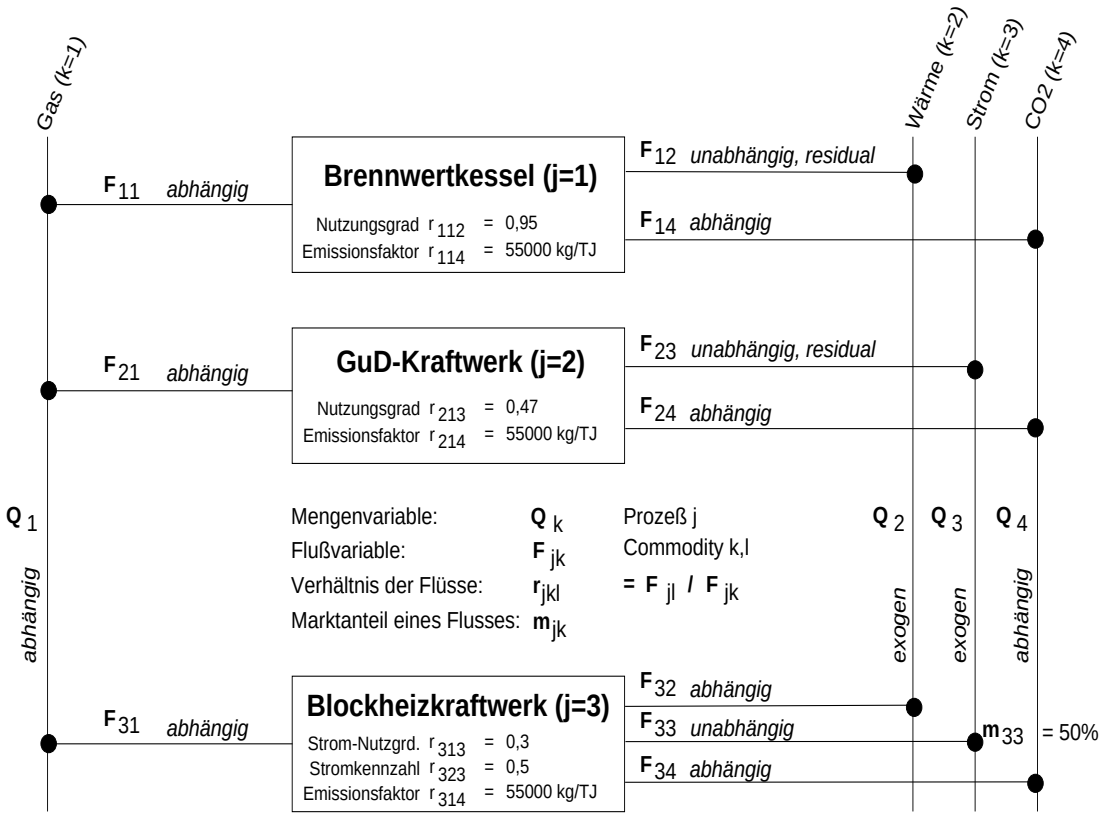


Abb. 4-20: Flußberechnung für ein RES mit drei Prozessen

Danach wird für die drei Klassen "nur produzierte Güter" (Nachfrage, Endprodukte), "nur verbrauchte Güter" (Ressourcen) sowie für "erzeugte und verbrauchte Güter" (Zwischenprodukte) geprüft, ob sie exogen vorgegeben werden müssen oder nicht:

- Ressourcen und Endprodukte müssen exogen vorgegeben werden, wenn es eine oder mehrere unabhängige Flußvariablen in der Bilanzgleichung gibt,
- Ressourcen und Endprodukte können nicht exogen vorgegeben werden, wenn es keine unabhängige Flußvariable in der Bilanzgleichung gibt,
- Zwischenprodukte müssen mindestens eine unabhängige Flußvariable in einer Bilanzgleichung haben,
- besitzen Zwischenprodukte auf der Erzeugerseite oder auf der Verbraucherseite nur abhängige Flußvariable, können sie nicht exogen vorgegeben werden,
- besitzen Zwischenprodukte auf der Erzeugerseite und auf der Verbraucherseite eine unabhängige Flußvariable, müssen sie exogen vorgegeben werden.

Liefert der Konsistenzcheck ein positives Ergebnis, kann im dritten Schritt das Gleichungssystem erstellt werden. Der *Gleichungsgenerator* (Komponente III) stellt dabei zuerst für jeden Prozeß die Transformationsgleichungen auf, so wie sie der Modellierer spezifiziert hat. Dann wird für jedes als exogen markiertes Gut bzw. Fluß eine exogene Vorgabegleichung erstellt, d. h. die Variable wird mit derjenigen Zeitreihe gleichgesetzt, die den exogen

Tabelle 4-10: Gleichungssystem für ein RES mit drei Prozessen (Lösungsweg)

Nr	**Typ**	**Gleichung** (VARIABLE, *Parameter*)				
8	EX	Q_STROM	= *Nachfrage*			
9	EX	Q_WÄRME	= *Nachfrage*			
14	AL	BHKW_STROM	= *Marktanteil*	* Q_STROM		
5	TR	BHKW_STROM	= *Nutzungsgrad*	* BHKW_GAS		
6	TR	BHKW_STROM	= *Stromkennzahl*	* BHKW_WÄRME		
7	TR	BHKW_CO2	= *Emissionsfaktor*	* BHKW_GAS		
11	CP	Q_WÄRME	= KESSEL_WÄRME	+ BHKW_WÄRME		
12	CP	Q_STROM	= GUD_STROM	+ BHKW_STROM		
1	TR	KESSEL_WÄRME	= *Nutzungsgrad*	* KESSEL_GAS		
2	TR	KESSEL_CO2	= *Emissionsfaktor*	* KESSEL_GAS		
3	TR	GUD_STROM	= *nutzungsgrad*	* GUD_GAS		
4	TR	GUD_CO2	= *Emissionsfaktor*	* GUD_GAS		
10	CC	Q_GAS	= KESSEL_GAS	+ GUD_GAS	+	BHKW_GAS
13	CP	Q_CO2	= KESSEL_CO2	+ GUD_CO2	+	BHKW_CO2

vorgegebenen Parameter enthält. Anschließend werden für die Güter die links- und rechtsseitigen Bilanzgleichungen erstellt. Zuletzt wird für jede unabhängige Flußvariable, die nicht residual ist, eine Allokationsgleichung erstellt. Der *Sequencer* durchläuft die aufgestellten Gleichungen und stellt die sequentielle Reihenfolge fest, in der die Gleichungen gelöst werden müssen. Die Gleichungen für das Beispiel aus Abb. 4-20 sind in Tabelle 4-10 aufgelistet, und zwar in der vom *Sequencer* festgestellten Lösungsreihenfolge, wobei die Spalte Nr die Aufstellungsreihenfolge der Gleichung beschreibt. Parameter sind hier *kursiv* und VARIABLE mit Großbuchstaben dargestellt.

Wie aus der Lösungsreihenfolge ersichtlich ist, wird das RES in *PlaNet-Flow* nicht wie bei anderen Simulationsinstrumenten von der rechten Seite (Nachfrage) nach links (Ressourcen) durchgerechnet. In dem gezeigten Beispiel wird zuerst die Menge der nachgefragten Güter berechnet. Über die Allokationsgleichung wird die Stomerzeugung des BHKW und daraus der Wärme- Gas- und Stromfluß des BHKWs bestimmt. Der nächste Schritt ermittelt aus der Wärmebilanzgleichung die vom Kessel zu erzeugende Wärme (Residualvariable) und aus der Strombilanzgleichung den vom GuD-Kraftwerk zu erzeugenden Strom. Schon hier wird die Rechts-Links-Vorzugsrichtung durchbrochen, da der Wärmeoutput des BHKW auf die nachgefragte Wärmemenge nach rechts übertragen wird. Anschließend werden aus den Transformationsgleichungen für Kessel und GuD-Kraftwerk die entsprechenden Gas- und CO_2-Flüsse bestimmt, um zuletzt mit der Gas- und CO_2-Bilanzgleichung die jeweiligen Mengen zu bestimmen. Der Solver von *PlaNet-Flow* besitzt keine Vorzugsrichtung, weil er das Gleichungsystem mathematisch löst, statt das RES von rechts nach links "abzuarbeiten" wie andere Simulationsinstrumente. Das RES wird ausschließlich vom Gleichungssystem-Generator benutzt, um die Gleichungen zu erstellen. Der Solver löst anschließend dieses Gleichungsystem völlig unabhängig vom RES. Da keine Richtung der Lösung festgelegt ist, wird es z. B. möglich, auf der Ressourcenseite Potentiale fest vorzugeben oder Kraft-Wärme-Koppelungsprozesse einzuführen, wie in dem gezeigten Beispiel.

Im vierten Schritt erstellt der *Zeitreihengenerator* (Komponente IV) die Zeitreihen für 10 Parameter und 14 Variable in der Datenbank. Die Liste der erstellten Parameterzeitreihen entspricht dabei dem Inputdatenprofil des Moduls. Für alle diese Zeitreihen müssen in der Datenbank Werte vorliegen, bevor das Gleichungssystem berechnet werden kann. Die 14 Variablen dagegen stellen die Ergebnisse der Berechnung dar. Auf die vor einem Modellauf durchgeführte Datenaufbereitung für einen Case durch die Mappingroutine (Komponente V) und auf die Funktionsweise des Solvers (Komponente VI) wird in Kapitel 4.4.4 eingegangen, da diese Schritte für *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* identisch sind.

4.4.3 *PlaNet-Cost*: Berechnung der Kosten des Energiesystems

Das Modul *PlaNet-Cost* bilanziert die gesamten Kosten des Energiesystems. Dabei werden alle im Energiesystem anfallenden Kosten berücksichtigt. Dies umfaßt die prozeßspezifischen Investitionskosten, Brennstoffkosten, fixe und variable Betriebskosten sowie die Summe der Kosten der Güter, die in das System eingeführt werden. Zur Bestimmung der Investititions-kosten wird eine leistungsproportionale Annuität ermittelt, indem die leistungsbezogenen Investitionskosten gleichmäßig auf die technische Lebensdauer verteilt werden. Die installierte Leistung wird über Vollastbenutzungsstunden aus dem kapazitätsrelevanten Fluß des Prozesses ermittelt. Zusätzlich können Steuern, externe Kosten oder DSM-Programmkosten (Demand Side Management) berücksichtigt werden. Das Kostenmodul baut auf den Ergebnissen der Flußberechnung mit *PlaNet-Flow* auf und errechnet für das dort dimensionierte RES verschiedene Kostengrößen. Als **Ergebnisse für jedes Stützjahr** werden ermittelt:

- für jeden Prozeß: die installierte Leistung,
  die Investitionskosten (jährlicher Kapitaldienst)
  die fixen Betriebskosten,
  die variablen Betriebskosten,
  die Brennstoffkosten,
  die Gesamtkosten des Prozesses,
  die spezifischen Gestehungskosten der erzeugten Güter,
  die Steuern, externe Kosten, DSM-Programmkosten,
- für jedes Gut: die durchschnittlichen spezifische 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.

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

- an der Systemgrenze: die Preise der Güter,
- für jeden Prozeß: der Fluß durch jede Verknüpfung,
  die Investitionskosten (bezogen auf die Kapazität),
  die fixen Betriebskosten (bezogen auf die Kapazität),
  die variablen Betriebskosten (flußbezogen),
  die Auslastung (Vollastbenutzungsstunden),
  die durchschnittliche technische 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 Güter: mengenbezogene Steuer,
  geldwertbezogene prozentuale Steuer.

Viele Gleichungen werden nur bei Bedarf angelegt. Daher kann der Benutzer in einer Spezifikation angeben, welche Gleichungen gebildet werden sollen. Für Güter kann gewählt werden, ob es keine Steuer, eine mengenbezogene Steuer oder eine geldwertbezogene Steuer geben soll. Für Prozesse kann definiert werden,

- ob der Prozeß kostenrelevant ist (Dummy-Prozesse 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 außer den Brennstoffkosten belegt ist,
  ob er mit externen Kosten belegt ist,
  ob er mit einer mengen- oder geldwertbezogenen Steuer 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.

Aus diesem Anforderungsprofil werden die notwendigen Gleichungen für die Berechnung der Kosten im RES angelegt, die auf den folgenden Seiten erläutert werden. Auch hier werden die *Parameter* der Berechnung wieder in kursiven Kleinbuchstaben und die VARIABLEN in Großbuchstaben dargestellt. Tabelle 4-11 zeigt eine Übersicht über alle Parameter (Inputs) und Variable (Outputs) der Kostenberechnung. Alle Gleichungen werden für jedes Stützjahr t der Modellierungsperiode berechnet.

Bestimmung der Prozeßkosten

Der **jährliche Kapitaldienst** $COSTNIN_j$, d. h. die anteiligen jährlichen Investitionskosten für einen Prozeß j in jedem Stützjahr t des Modellierungszeitraums, wird mit der Annuitätenmethode aus den leistungsspezifischen Investitionen $scinv_j$, der installierten Kapazität CAP_{jk} und des vorschüssigen Wiedergewinnungsfaktors CRF_j (Annuitätenfaktor) berechnet:

$$COSTNIN_j\ (t) = CRF_j\ (t) * scinv_{jk}\ (t) * CAP_{jk}\ (t) \tag{4-14}$$

Die **installierte Kapazität** wird aus den Vollastbenutzungsstunden flh_j und dem von *PlaNet-Flow* berechneten Fluß f_{jk} des vom Benutzer als kapazitätsrelevant bezeichneten Gutes berechnet oder alternativ exogen vom Benutzer vorgegeben:

$$CAP_{jk}\ (t) = \frac{f_{jk}\ (t)}{flh_j\ (t)}\ \ oder\ \ alternativ\text{:}\ \ CAP_{jk}\ (t) = cap_{jk} * (t) \tag{4-15}$$

Der **vorschüssige Wiedergewinnungsfaktor** (Annuitätenfaktor) bestimmt sich aus dem Kalkulationszinssatz d und der durchschnittlichen technischen Lebensdauer $tleb_j$ von Prozeß j:

$$CRF_j = \frac{(1 + d)^{tleb_j - 1} * d}{(1 + d)^{tleb_j - 1} - 1} \tag{4-16}$$

Die **jährlichen fixen Betriebskosten** $COSTFIX_j$ erhält man durch die Mulitiplikation der leistungsbezogenen fixen Betriebskosten $scfix_j$ mit der berechneten Kapazität CAP_{jk}:

$$COSTFIX_j\ (t) = scfix_{jk}\ (t) * CAP_{jk} * (t) \tag{4-17}$$

Die **jährlichen Brennstoffkosten** $COSTFUE_j$ errechnen sich über die Produkte der Inputgüterflüsse (eingesetzte Brennstoffmengen) f_{jk} mit den auf die Flußmengen bezogenen, aufgrund der vorgelagerten Prozesse berechneten Kosten SCC_j:

$$COSTFUE_j\ (t) = \sum_{k\ (Input\ von\ j)} (f_{jk}\ (t) * SCC_k\ (t))\ ;\ k\ ist\ Inputflow \tag{4-18}$$

Die **jährlichen sonstigen variablen Kosten** $COSTOVC_j$ errechnen sich über die Produkte aller Güterflüsse f_{jk} mit den auf die Flußmengen bezogenen Kosten $scovc_{jk}$:

$$COSTOVC_j\ (t) = \sum_k (f_{jk}\ (t) * scovc_{jk}\ (t)) \tag{4-19}$$

Die **jährlichen Steuern** $COSTTAX_j$ errechnen sich über die Produkte aller Güterflüsse f_{jk} mit den auf die Flußmengen bezogenen Steuern $sctaxf_{jk}$ oder für Inputgüter m auch alternativ über eine prozentuale, auf den Geldwert bezogene Rate $rattaxf_{jl}$:

$$\begin{aligned} COSTTAX_j\ (t) = & \sum_k (f_{jk}\ (t) * sctaxf_{jk}\ (t)) \\ & + \sum_{m\ (input\ von\ j)} (f_{jm}\ (t) * SCC_m\ (t) * rattaxf_{jm}\ (t)) \end{aligned} \tag{4-20}$$

Die **jährlichen externen Kosten** $COSTEXT_j$ errechnen sich über die Produkte aller Güterflüsse f_{jk} mit den auf die Flußmengen bezogenen externen Kosten $scext_{jk}$:

$$COSTEXT_j\ (t) = \sum_k (f_{jk}\ (t) * scext_{jk}\ (t)) \tag{4-21}$$

Die **jährlichen DSM-Kosten** setzen sich zusammen aus den exogen vorgegebenen absoluten DSM-Kosten $fixdsm_j$ und den auf die installierte Leistung CAP_{jk} bezogenen fixen DSM-Kosten $scdsm_{jk}$:

$$COSTDSM_j\ (t) = scdsm_{jk}\ (t) * CAP_{jk}\ (t) + fixdsm_j\ (t) \tag{4-22}$$

Die **gesamten Prozeßkosten** setzen sich aus den einzelnen Kostenarten zusammen:

$$\begin{aligned} COSTPRO_j\ (t) = & COSTNIN_j\ (t) + COSTFIX_j\ (t) + COSTFUE_j\ (t) \\ & + COSTOVC_j\ (t) + COSTTAX_j\ (t) + COSTEXT_j\ (t) \\ & + COSTDSM_j\ (t) \end{aligned} \tag{4-23}$$

Für Prozesse, die vom Benutzer als nicht kostenrelevant markiert wurden, die also keine zusätzlichen Kosten im RES erzeugen (sogenannte Dummy-Prozesse), werden außer den Brennstoffkosten keine weiteren Größen ermittelt. Die gesamten Prozeßkosten ergeben sich daher aus den Brennstoffkosten.

$$COSTPRO_j\ (t) = COSTFUE_j\ (t) \tag{4-24}$$

Übertragung der Prozeßkosten auf kostenrelevante Outputflüsse

Die gesamten Prozeßkosten werden auf diejenigen vom Prozeß erzeugten Güterflüsse umgelegt, die vom Benutzer als kostenrelevant markiert wurden. Die kostenrelevanten Outputflüsse transportieren die aufgelaufenen Kosten im RES von der Ressource zur Nachfrage weiter. Sind mehrere kostenrelevante Outputflüsse vorhanden, z. B. bei Kuppelproduktion von Strom und Fernwärme, muß ein Kostenanteilsfaktor cf_{jk} definiert werden. Die Kostenanteilsfaktoren cf_{ij} müssen sich zu 1 addieren. Hat ein Prozeß j nur ein einziges kostenrelevantes Outputgut k, so ist cf_{jk} trivialerweise gleich 1. Liegen die Outputgüter in der gleichen Maßeinheitenklasse vor, so kann anstatt der direkten Eingabe der Kostenanteilsfaktoren die mengenproportionale Bewertungsmethode ausgewählt werden: Dann errechnen sich die **Kostananteilsfaktoren** für jeden Outputfluß k automatisch als Verhältnis des Flusses zum Gesamt-Output aller kostenrelevanten Outputflüsse:

$$cf_{jk}(t) = \frac{f_{jk}(t)}{\sum\limits_{k\ (relevanter\ Output\ von\ j)} f_{jk}(t)} \quad ; \quad \sum_k cf_{jk}(t) = 1 \tag{4-25}$$

Die **Gesamtkosten eines Outputflusses** errechnen sich durch Multiplikation der Gesamtkosten von Prozeß j mit dem Kostenanteilsfaktor des Gutes k zuzüglich einer VAT-artigen Steuer $ratvat_{jk}$:

$$COSTFLOW_{jk}(t) = COSTPRO_j(t) * cf_{jk}(t) * (1 + ratvat_{jk}(t)) \tag{4-26}$$

Die **auf die Flußmengen bezogenen Kosten eines kostenrelevanten Outputflusses** $SCFLOW_k$ errechnen sich durch anschließende Division mit der Outputmenge f_{jk}:

$$SCFLOW_{jk}(t) = \frac{COSTFLOW_{jk}(t)}{f_{jk}(t)} \tag{4-27}$$

Bestimmung der Kosten von Gütern

Die **Gesamtkosten eines Gutes** $COSTCOM_k$ berechnen sich aus der Summe der Kosten der einzelnen Flüsse $costflow_{jk}$, die das Gut erzeugen, plus der auf das Gut erhobenen Steuer $TAXCOM_k$:

$$COSTCOM_k\ (t) = \sum_k costflow_{jk}\ (t) + TAXCOM_k\ (t) \tag{4-28}$$

Die **auf Güter erhobene Steuer** $TAXCOM_k$ errechnet sich mengenbezogen aus q_k oder geldwertbezogen aus der Summe der Kosten der einzelnen Flüsse $costflow_{jk}$:

$$\begin{aligned} TAXCOM_k\ (t) &= q_k\ (t) * sctaxc_k\ (t)\ ;\ mengenbezogene\ Steuer \\ TAXCOM_k\ (t) &= rattax_k\ (t) * \sum_k COSTFLOW_{jk}\ (t)\ ;\ wertbezogene\ Steuer \end{aligned} \tag{4-29}$$

Die **mengenbezogenen Kosten eines Gutes** SCC_k, die den spezifischen Gestehungskosten entsprechen, errechnen sich zu:

$$SCC_k\ (t) = \frac{COSTCOM_k\ (t)}{f_{jk}\ (t)} \tag{4-30}$$

Bestimmung der Kosten von primären Gütern

Die **Gesamtkosten eines primären Gutes** $COSTCOM_k$ (Ressource) auf der linken Seite des RES, errechnen sich aus den mengenbezogenen Kosten SCC_k zu:

$$COSTCOM_k\ (t) = SCC_k\ (t) * q_k\ (t) \tag{4-31}$$

Die **mengenbezogenen Kosten eines primären Gutes** SCC_k errechnen sich je nach gewählter Steueroption zu:

$$\begin{aligned} SCC_k &= preis_k\ (t) + sctaxc_k\ (t)\ ;\ mengenbezogene\ Steuer \\ SCC_k\ (t) &= preis_k\ (t) * (1 + rattaxc_k\ (t))\ ;\ wertbezogene\ Steuer \end{aligned} \tag{4-32}$$

Die auf **primäre Güter erhobenen Steuern** $TAXCOM_k$ errechnen sich je nach Option zu:

$$\begin{aligned} TAXCOM_k &= sctaxc_k\ (t) * q_k\ (t)\ ;\ mengenbezogene\ Steuer \\ TAXCOM_k\ (t) &= COSTCOM_k\ (t) * rattaxc_k\ (t)\ ;\ wertbezogene\ Steuer \end{aligned} \tag{4-33}$$

Jährliche Gesamtkosten des Systems

Bei der Berechnung der **Gesamtkosten des Energiesystems** für ein Stützjahr t dürfen nicht die Gesamtkosten aller Prozesse aufaddiert werden, da die Brennstoffkosten eines Prozesses die Systemkosten der vorgelagerten Prozesse im RES enthalten. Statt dessen gibt es zwei mögliche Berechnungsverfahren. Das erste Verfahren summiert Investitionskosten, fixe und sonstige variable Betriebskosten, Steuern, externe Kosten und DSM-Kosten über alle Prozeße und addiert die Kosten der primären Güter k, die in das System eingehen:

$$\begin{aligned} COSTSYS\ (t) = \sum_j\ & [COSTNIN_j\ (t) + COSTFIX_j\ (t) + COSTOVC_j\ (t) \\ & + COSTTAX_j\ (t) + COSTEXT_j\ (t) + COSTDSM_j\ (t)] \\ & + \sum_{k\ (Primäre\ Commodity)} COSTCOM_k\ (t) \end{aligned} \tag{4-34}$$

Das zweite Verfahren bildet die Summe der Kosten der Güter k, die im RES nicht weiter verarbeitet werden, also ganz rechts im RES Nachfrage des Gesamtsystems sind:

$$COSTSYS\ (t) = \sum_{k\ (Nachfrage-Commodity)} COSTCOM_k\ (t) \tag{4-35}$$

Die **jährlichen Prozeßkosten werden nach Kostenarten** über alle Prozesse summiert: Investitionskosten SYSNIN, fixe Kosten SYSFIX, andere variable Kosten SYSOVC, Steuern SYSTAXP, externe Kosten SYSEXT und DSM-Kosten SYSDSM:

$$\begin{aligned} SYSNIN\ (t) &= \sum_j COSTNIN_j\ (t) \\ SYSFIX\ (t) &= \sum_j COSTFIX_j\ (t) \\ SYSOVC\ (t) &= \sum_j COSTOVC_j\ (t) \\ SYSTAXP\ (t) &= \sum_j COSTTAXP_j\ (t) \\ SYSEXT\ (t) &= \sum_j COSTEXT_j\ (t) \\ SYSDSM\ (t) &= \sum_j COSTDSM_j\ (t) \end{aligned} \tag{4-36}$$

Die **gesamten Brennstoffkosten des Systems** sind die Summe der primären Güter:

$$SYSFUE\ (t) = \sum_{k\ (Primäre\ Commodity)} preis_k\ (t) * q_k\ (t) \tag{4-37}$$

Die **Summe aller erhobenen Steuern auf Güter** wird gebildet durch:

$$SYSTAXC\ (t) = \sum_k TAXCOM_k\ (t) \tag{4-38}$$

Die **Summe der erhobenen Mehrwertsteuer auf Outputs k von Prozessen j** ist:

$$SYSVAT\ (t) = \sum_j \sum_k COSTPRO_j\ (t) * cf_{jk}\ (t) * ratvat_{jk}\ (t) \tag{4-39}$$

Barwert der Gesamtkosten über die Modellierungsperiode

Für die Berechnung des Barwerts (Present Value) der Gesamtkosten des Systems PV-SYS über den Modellierungszeitraum werden die zwischen den Stützjahren fehlenden Werte der Zwischenjahre exponentiell interpoliert. Die so vervollständigte Zeitreihe der jährlichen Gesamtkosten COSTSYS(t) wird durch abzinsen auf das Basisjahr mit dem Zinssatz d in eine barwertige Zeitreihe umgewandelt und schließlich über den Modellierungszeitraum aufaddiert:

$$PVSYS = \sum_{t = t_0}^{t_{max}} COSTSYS\ (t) * (1 + d)^{(t_0 - t)} \tag{4-40}$$

Tabelle 4-11: Parameter und Parameter des Moduls *PlaNet-Cost* (Teil 1)

Indices	j	Prozesse
	k	Commodities
Parameter (Inputs)	$q_k(t)$	Menge der Commodity k
	$f_{jk}(t)$	Fluß der Commodity k in oder aus dem Prozeß j
	d	Kalkulationszinssatz
	$cap_{jk}(t)$	exogen vorgegebene Kapazität des Prozesses j
	$flh_j(t)$	Auslastungsfaktor des Prozesses j (in h pro Jahr)
	$tleb_j$	durchschnittliche technische Lebensdauer des Prozesses j
	$scinv_{jk}(t)$	leistungsbezogene Investitionskosten des Prozesses j
	$scfix_{jk}(t)$	leistungsbezogene fixen Kosten des Prozesses j
	$scovc_{jk}(t)$	mengenbezogene sonstige variable Kosten des Prozesses j
	$sctaxc_k(t)$	mengenbezogene Steuer einer Commodity k
	$sctaxf_{jk}(t)$	mengenbezogene Steuer eines Flusses k des Prozesses j
	$scext_{jk}(t)$	mengenbez. externe Kosten eines Flusses k des Prozesses j
	$fixdsm_{jk}(t)$	absolute DSM-Kosten des Prozesses j
	$scdsm_j(t)$	leistungsbezogene, fixe DSM-Kosten des Prozesses j
	$preis_k(t)$	Preis einer Commodity k
	$cf_{jk}(t)$	Kostenanteilsfaktor bei Kuppelproduktion in Prozess j
	$rattaxf_{jk}(t)$	wertbezogene Steuer eines Flusses k des Prozesses j
	$rattaxc_k(t)$	wertbezogene Steuer einer Commodity k
	$ratvat_{jk}(t)$	VAT-Steuer auf Gesamtkosten eines kostrelev. Outputfluß
Variable (Prozesse)	$CRF_j(t)$	vorschüssiger Wiedergewinnungsfaktor
	$CAP_{jk}(t)$	Installierte Kapazität des Prozesses j bezogen auf Fluß k
	$COSTNIN_j(t)$	jährliche Investitionskosten des Prozesses j
	$COSTFIX_j(t)$	jährliche fixe Betriebskosten des Prozesses j
	$COSTFUE_j(t)$	jährliche Brennstoffkosten des Prozesses j
	$COSTOVC_j(t)$	jährliche sonstige variable Kosten des Prozesses j
	$COSTTAX_j(t)$	jährliche Steuern des Prozesses j
	$COSTEXT_j(t)$	jährliche externe Kosten des Prozesses j
	$COSTDSM_j(t)$	jährliche DSM-Kosten des Prozesses j
	$COSTPRO_j(t)$	jährliche Gesamtkosten des Prozesses j
Variable (Flows)	$COSTFLOW_{jk}(t)$	Gesamtkosten eines Outputlinks jk
	$SCFLOW_{jk(t)}$	mengenbezogene Kosten eines Flusses k des Prozesses j
Variable (Commodi-ties)	$SCC_k(t)$	mengenbezogene Kosten einer Commodity k
	$COSTCOM_k(t)$	Gesamtkosten einer Commodity k
	$TAXCOM_k(t)$	Steuern auf eine Commodity k

Tabelle 4-12: Parameter und Parameter des Moduls *PlaNet-Cost* (Teil 2)

Variable (System)	COSTSYS (t)	Gesamtkosten des Energiesystems
	SYSNIN (t)	Gesamte Investitionskosten des Energiesystems
	SYSFIX (t)	gesamte Fixkosten des Energiesystems
	SYSOVC (t)	gesamte andere variable Kosten des Energiesystems
	SYSTAXP (t)	gesamte auf Prozesse erhobene Steuern im Energiesystem
	SYSEXT (t)	gesamte externe Kosten des Energiesystems
	SYSDSM (t)	gesamte DSM-Kosten des Energiesystems
	SYSFUE (t)	gesamte Brennstoffkosten des Energiesystems
	SYSTAXC (t)	gesamte auf Commodities erhobene Steuern im Energiesyst.
	SYSVAT (t)	gesamte auf Prozesse erhobene Mehrwertsteuer im ES
Variable (Barwerte)	PVSYS	Barwert: Gesamtkosten des Energiesystems
	PVNIN (t)	Barwert: gesamte Investitionskosten des Energiesystems
	PVFIX (t)	Barwert: gesamte Fixkosten des Energiesystems
	PVOVC (t)	Barwert: gesamte andere variable Kosten des Energiesystems
	PVTAXP (t)	Barwert: gesamte auf Prozesse erhobene Steuern im ES
	PVEXT (t)	Barwert: gesamte externe Kosten des Energiesystems
	PVDSM (t)	Barwert: gesamte DSM-Kosten des Energiesystems
	PVFUE (t)	Barwert: gesamte Brennstoffkosten des Energiesystems
	PVTAXC (t)	Barwert: gesamte auf Commodities erhobene Steuern im ES
	PVVAT (t)	Barwert: gesamte auf Prozesse erhobene Mehrwertsteuer

4.4.4 Architektur des Solvers

Zur Lösung von *PlaNet-Flow* und *Planet-Cost* wird ein gemeinsamer Solver eingesetzt, der lineare Gleichungssysteme sequentiell auflöst. Der Solver benötigt als Input die Liste der Parameter, der Variablen und der Gleichungen sowie die Daten aus *NetWork* und berechnet die Variablenwerte. Ein Solverlauf ist in 6 Stufen unterteilt, die in Abb. 4-21 dargestellt sind.

1. Für alle Parameter in *Modul*_PAR, deren Daten sich seit dem letzten Rechenlauf geändert haben, wird die Mapping-Routine ausgeführt, die aus Maßeinheitenumrechnung, Vererbung und Interpolation besteht. Die Ergebnisse des Mappings werden hypothesenbezogen in der Tabelle R_MAP zwischengespeichert.
2. Der *Case-Manager* ermittelt, welche Hypothesen für die einzelnen Parameter in der Parameterliste für die Berechnung verwendet werden sollen und kopiert den so gebildeten Inputdatensatz unter Referenz auf die Casenummer von R_MAP in R_RESULT.
3. Die Werte aller Parameter aus *Modul*_PAR werden für den zu berechnenden Case aus R_RESULT in einen Array geladen. Ein leerer Array wird für die Variablen dimensioniert. Die eindimensionalen Arrays werden über die Variablen- bzw. Parameternummer, die Subregionnummer und die Periodennummer indiziert. Sei R_{max} die Anzahl der Subregionen, und P_{max} die Anzahl der Perioden einer Fallstudie, dann bestimmt sich der Index für den Wert in der Zeitreihe TS, der Region R_i und der Periode P_t wie folgt:

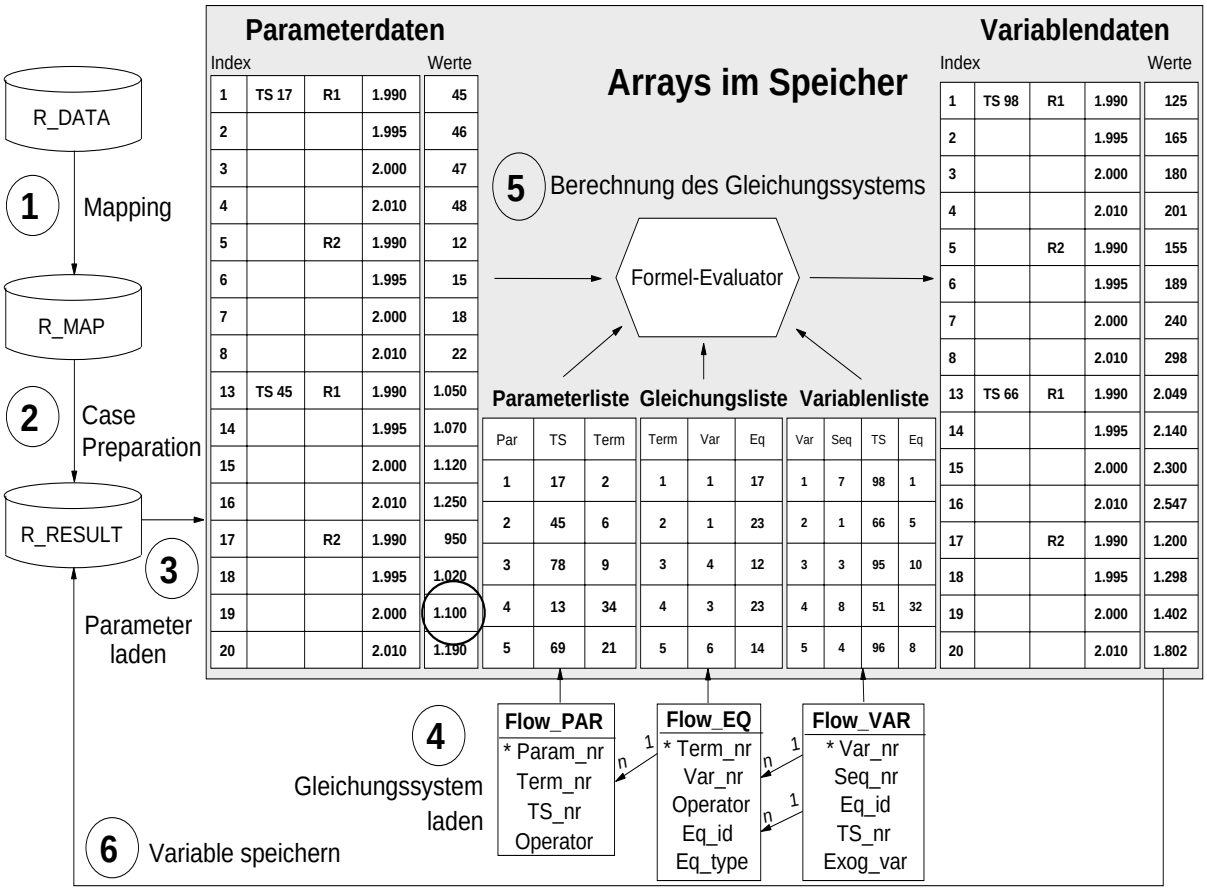


Abb. 4-21: Architektur des *PlaNet*-Solver

$$Index = (TS - 1) * R_{\max} * P_{\max} + (R_i - 1) * P_{\max} + P_t \qquad (4\text{-}41)$$

Der Index für den Wert der 2. Zeitreihe, 3. Region und 2. Periode (N=2, R_i=3, P_t=2), der in dem Beispiel in Abb. 4-21 (R_{max}=3 und P_{max}=4) durch einen Kreis markiert ist, berechnet sich zu 22, d. h. der Wert steht an der 22.ten Stelle im eindimensionalen Array.

4. Die Tabellen *Modul*_PAR, *Modul*_EQ und *Modul*_VAR werden in entsprechende Arrays in den Speicher geladen.
5. Zur Berechnung des Gleichungssystems wird die Variablenliste nach der Sequenznummer (Seq_nr) abgearbeitet, die der Generator während der Erstellung des Gleichungssystems ermittelt hat. Das Feld Eq_id in der Variablenliste liefert die Gleichung, mit der die zu bestimmende Variable berechnet werden kann. In der Gleichungsliste werden alle Terme dieser Gleichung gesucht. Zu jedem Term werden die zugehörigen Parameter und die schon bekannten (da vorher berechneten) Variablen in der Parameter- bzw. Variablenliste festgestellt. Über die Zeitreihennummern werden die Daten in den Arrays gefunden. Zusammen mit den Operatoren in *Modul*_PAR und *Modul*_EQ wird daraus eine vollständige Gleichung gebildet, die von einem Formel-Evaluator interpretiert ("geparsed") und berechnet wird.
6. Der Solverlauf ist beendet, wenn die Variablenliste vollständig abgearbeitet wurde. Danach werden die Werte der Variablen aus dem Array in die Tabelle R_RESULT kopiert und der Solverlauf ist beendet.

Prinzipiell ist es möglich, aus Gleichungs- Parameter- und Variablenlisten ein Matrixformat (z. B. MPS-Format) zu erstellen, das mit kommerziell verfügbaren Gleichungssolvern numerisch gelöst wird. Die Matrixdarstellung ist eine spezielle Form zur Beschreibung von Gleichungssystemen. Abb. 4-22 zeigt die Matrixdarstellung des Gleichungssystems aus Tabelle 4-13. Die in der Matrix vorkommenden, von 1 und -1 verschiedenen Werte entsprechen den Parametern aus der Tabelle *Modul*_PAR. Die Spalten der Matrix repräsentieren die Variablen und entsprechen damit der Variablenliste *Modul*_VAR. Die Zeilen der Matrix entsprechen den Gleichungen aus *Modul*_EQ. Der Unterschied zwischen den beiden Konzepten ist, daß in der Matrix Zahlenwerte stehen, während sich in den Tabellen nur Verweise auf Zeitreihen in *NetWork* befinden. Erst der Solver (Schritte V und VI) fügt Werte und Gleichungen zusammen. Das hat den Vorteil, daß das Gleichungssystem nur dann neu gebildet werden muß (Schritte II - IV), wenn sich das RES oder die Spezifikation ändert und nicht, wie bei herkömmlichen Matrixgeneratoren, wenn sich ein einziger Wert im Datensatz ändert.

Soll der *PlaNet*-Solver in dem hier vorgestellten Rechenmodul durch einen kommerziellen Solver ersetzt werden, müssen nur geringfügige Änderungen vorgenommen werden. Der Sequencer des Gleichungssystemgenerators, der die sequentielle Lösungsreihenfolge ermittelt, ist dann überflüssig. Der *PlaNet*-Solver (VI) wird durch einen Algorithmus ersetzt, der die Informationen aus den drei Tabellen *Modul*_EQ, _PAR und _VAR mit den Werten aus R_DATA zu einer Matrix zusammenfügt und dem kommerziellen Solver übergibt.

$$
\begin{array}{ll}
 & \begin{array}{cccccccccccccc}
\text{Menge Gas} & \text{Menge Wärme} & \text{Menge Strom} & \text{Menge CO2} & \text{Kessel Gas} & \text{Kessel Wärme} & \text{Kessel CO2} & \text{GuD Gas} & \text{GuD Strom} & \text{GuD CO2} & \text{BHKW Gas} & \text{BHKW Wärme} & \text{BHKW Strom} & \text{BHKW CO2}
\end{array} \\
\begin{array}{ll}
1 & \text{TR} \\
2 & \text{TR} \\
3 & \text{TR} \\
4 & \text{TR} \\
5 & \text{TR} \\
6 & \text{TR} \\
7 & \text{TR} \\
8 & \text{EX} \\
9 & \text{EX} \\
10 & \text{CC} \\
11 & \text{CP} \\
12 & \text{CP} \\
13 & \text{CP} \\
14 & \text{AL}
\end{array}
\begin{pmatrix}
 & & & & -0{,}95 & 1 & & & & & & & & \\
 & & & -55.000 & & & 1 & & & & & & & \\
 & & & & & & & -0{,}47 & 1 & & & & & \\
 & & & & & & & -55.000 & & 1 & & & & \\
 & & & & & & & & & & -0{,}3 & & 1 & \\
 & & & & & & & & & & -0{,}5 & & 1 & \\
 & & & & & & & & & -55.000 & & & & 1 \\
 & & 1 & & & & & & & & & & & \\
 & 1 & & & & & & & & & & & & \\
1 & & & & -1 & & & -1 & & & -1 & & & \\
 & 1 & & & & -1 & & & & & & -1 & & \\
 & & 1 & & & & & & -1 & & & & -1 & \\
 & & & 1 & & & -1 & & & -1 & & & & -1 \\
 & & -0{,}5 & & & & & & & & & & 1 &
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
\text{Q_GAS} \\
\text{Q_WÄRME} \\
\text{Q_STROM} \\
\text{Q_CO2} \\
\text{KESSEL_GAS} \\
\text{KESSEL_WÄRME} \\
\text{KESSEL_CO2} \\
\text{GUD_GAS} \\
\text{GUD_STROM} \\
\text{GUD_CO2} \\
\text{BHKW_GAS} \\
\text{BHKW_WÄRME} \\
\text{BHKW_STROM} \\
\text{BHKW_CO2}
\end{pmatrix}
=
\begin{array}{c}
\text{RHS} \\
\begin{pmatrix}
0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 500 \\ 1000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0
\end{pmatrix}
\end{array}
\end{array}
$$

Abb. 4-22: Matrixdarstellung eines *PlaNet-Flow* Gleichungssystems

Tabelle 4-13: Gleichungssystem für ein RES mit drei Prozessen (nach Typ sortiert)

Nr	**Typ**	**Gleichung** (VARIABLE, *Parameter*)	**Parameterwert**
1	TR	KESSEL_WÄRME = *Nutzungsgrad* * KESSEL_GAS	0,95
2	TR	KESSEL_CO2 = *Emissionsfaktor* * KESSEL_GAS	55000 kg/TJ
3	TR	GUD_STROM = *Nutzungsgrad* * GUD_GAS	0,47
4	TR	GUD_CO2 = *Emissionsfaktor* * GUD_GAS	55000 kg/TJ
5	TR	BHKW_STROM = *Stromnutzungsgrad* * BHKW_GAS	0,3
6	TR	BHKW_STROM = *Stromkennzahl* * BHKW_WÄRME	0,5
7	TR	BHKW_CO2 = *Emissionsfaktor* * BHKW_GAS	55000 kg/TJ
8	EX	Q_STROM = *Nachfrage*	500
9	EX	Q_WÄRME = *Nachfrage*	1000
10	CC	Q_GAS = KESSEL_GAS + GUD_GAS + BHKW_GAS	-
11	CP	Q_WÄRME = KESSEL_WÄRME + BHKW_WÄRME	-
12	CP	Q_STROM = GUD_STROM + BHKW_STROM	-
13	CP	Q_CO2 = KESSEL_CO2 + GUD_CO2 + BHKW_CO2	-
14	AL	BHKW_STROM = *Marktanteil* * Q_STROM	0,5

4.5 Der Case-Manager zur Strukturierung von Modellrechnungen

Jedes Gleichungssystem eines formalen Modells besteht aus Parametern, Variablen und Gleichungen. Jedem Parameter und jeder Variable ist eine Zeitreihe in *NetWork* zugeordnet. Da Zeitreihen mehrere Hypothesen besitzen können, muß vor einem Rechenlauf für jeden Parameter genau eine Hypothese festgelegt werden. Die Summe dieser Parameterhypothesen bildet einen Case - einen Rechenlauf. Diese Inputdaten sowie die berechneten Variablen werden nach einem Rechenlauf mit Bezug auf den Case in der Datenbank gespeichert.

4.5.1 Die Szenariotechnik

Ziel der Modellierung ist nicht die einmalige Berechnung des Energiesystems. Vielmehr werden alternative Berechnungen (Cases) durchgeführt, um einen direkten Vergleich der Entscheidungsalternativen zu ermöglichen. 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 /113/. Szenarien sind Zukunftsbilder, die mögliche Entwicklungen der Rahmenbedingungen 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 und damit der exogenen Einflüsse auf das Energiesystem dar, wie z. B. Wirtschaftswachstum, Bevölkerungswachstum, Entwicklung der verfügbaren Ressourcen, Weltmarktpreise. Für die Qualität der Analyse sind Plausibilität, Konsistenz und Vollständigkeit der Szenarien von entscheidender Bedeutung. Szenarien werden auch verwendet, um robuste Elemente, unausweichliche Entwicklungen und strukturelle Unterschiede erkennen zu können /114/.

Die Szenariotechnik erlaubt es, den Modellierungszeitraum sehr viel weiter in die Zukunft auszudehnen, als es mit Trendextrapolationen des Status-Quo möglich wäre. "A scenario is a plausible energy future. Scenarios are not forecasts or predictons; they are chosen to span a range of possible futures and lead to different estimates of energy demand and supply. Several scenarios are defined. For each scenario, values of exogeneous key variables are specified and the consequent energy picture evaluated. When significant findings remain unchanged under several different scenarios, confidence in those findings is increased. The real world of energy is a highly complex and interactive one. Scenarios can only roughly approximate this real world." /115/.

Der *Referenzcase* ("Business As Usual") beschreibt die wahrscheinlichste Entwicklung des Energiesystems für den Fall, daß die Trends der Vergangenheit unverändert anhalten und keine gezielten Veränderungseingriffe in das System vorgenommen werden. Der Referenzcase gibt einen Ausblick auf die zu erwartende Entwicklung des Energiesystems und erlaubt es, die untersuchten Probleme zu quantifizieren. Für die Szenarioanalyse bildet der Referenzcase die Meßlatte, an der der Erfolg der Handlungsalternativen gemessen wird.

Der *Case-Manager* unterstützt den Modellierer dabei, die Aufgabenstellung des Entscheidungsträgers in seine Sprache und in Modellrechnungen umzusetzen. So wird eine vergleichende Bewertung von Handlungsalternativen (Strategien) unter wechselnden Rahmenbedingungen (Szenarien) erreicht. Der *Case-Manager* strukturiert Rechenläufe und ist die Schnittstelle zwischen inhaltlicher Formulierung und mathematischer Quantifizierung.

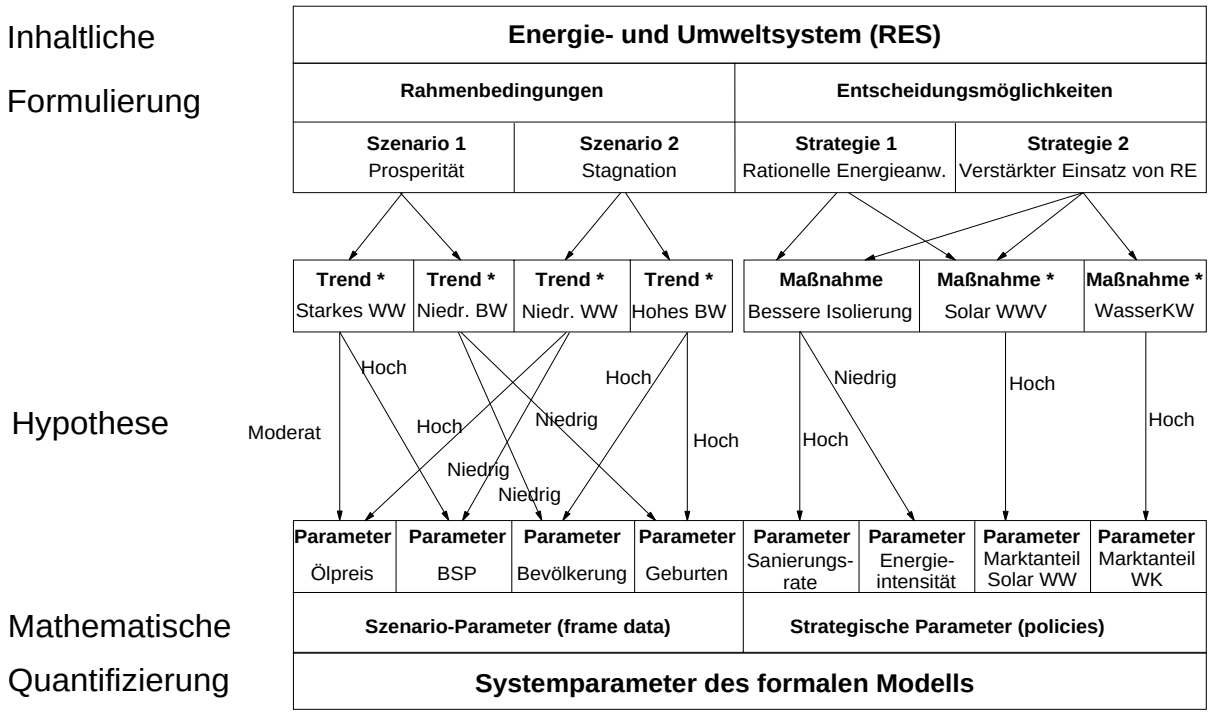
4.5.2 Komponenten eines Case

Der *Case-Manager* teilt die Bestimmungsgrößen eines Energiesystems in zwei Bereiche. Auf der einen Seite sind die Größen, die der Entscheidungsträger mit seinen Entscheidungsmöglichkeiten nicht beinflussen kann, sie legen die Rahmenbedingungen fest. Auf der anderen Seite befinden sich die Größen, die der Entscheidungsträger durch seine Entscheidung verändern kann, d. h. der strategische Bereich, den er aktiv gestalten kann, um Energienachfrage, Technologiemix, Energieverbrauch und Umweltschäden zu beeinflussen. Ein Case besteht dabei aus den Komponenten Szenarien, Szenariotrends, Strategien und Maßnahmen.

Ein *Szenario* beschreibt nach der in dieser Arbeit verwendeten Sprachregelung eine mögliche zukünftige Entwicklung der vom Entscheidungsträger nicht beeinflußbaren Rahmenbedingungen (siehe auch /116/). Szenarien lassen sich in Szenariotrends untergliedern, z. B. in Trends für die Preisentwicklung, für die Bevölkerungsentwicklung und für die wirtschaftliche Entwicklung. Ein *Szenariotrend* beschreibt die Entwicklung einer oder mehrerer Größen aus dem gesamten Szenario. Die Gesamtheit aller Trends beschreibt ein Szenario. Ein optimistisches Szenario kann z. B. aus den Trends "niedrige Preisentwicklung", "mäßiges Bevölkerungswachstum" und "starkes Wirtschaftswachstum" gebildet werden.

Im Gegensatz dazu kann der Entscheidungsträger im strategischen Bereich des Energiesystems eingreifen und Marktanteile von Technologien beeinflussen (z. B. durch gezielte Tarife), neue Technologien und Brennstoffe fördern und andere mit Grenzwerten und Steuern einschränken. *Strategien* sind alternative Aktionskurse und 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 /117/. Eine Strategie besteht dabei aus der Gesamtheit aufeinander abgestimmter Maßnahmen und dient dazu, die in der Fallstudie gesteckten Zielsetzungen zu erreichen. Eine *Maßnahme* ist ein gezielter Eingriff in das System, der in der Regel auf einen Energieträger bzw. Schadstoff, eine Technologie oder einen bestimmten Sektor abzielt. Eine Strategie zur Verringerung der CO_2-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 Investititonsverhaltens der Verbraucher" zusammensetzen.

Szenarien beschreiben also die Rahmenbedingungen der Zukunftsanalyse, Strategien formulieren, welche Handlungsalternativen untersucht werden sollen. Der nächste Schritt quantifiziert diese inhaltlichen Vorgaben, um sie durch Modellrechnungen überprüfen zu können.



* WW = Wirtschaftswachstum, BW = Bevölkerungswachstum, WWV = Warmwasserversorgung, KW = Kraftwerk

Abb. 4-23: Die Szenariotechnik zur Strukturierung der Systemberechnung

4.5.3 Quantifizierung von Szenarien und Strategien

Eine mathematische Quantifizierung der inhaltlichen Vorgaben ist Voraussetzung für die Modellierung und strategische Analyse des Energiesystems. Im oberen Teil der Abb. 4-23 wird gezeigt, wie Szenarien und Strategien inhaltlich beschrieben werden. Das Szenario "Prosperität" z. B. setzt sich zusammen aus den Szenariotrends "Positive Wirtschaftsentwicklung" und "Schwaches Bevölkerungswachstum". Im unteren Teil wird gezeigt, wie die Quantifizierung strukturiert wird. Der Trend "Positive Wirtschaftsentwicklung" legt für den Ölpreis die Hypothese "Moderat" und für das Bruttosozialprodukt die Hypothese "Hoch" fest.

Die Topologie des RES führt zusammen mit der mathematischen Spezifikation zu einem eindeutigen Gleichungssystem, das wie schon gesagt Gleichungen, Systemparameter und Systemvariable enthält. *Systemparameter* sind diejenigen Größen des Gleichungssystems, die vor der Berechnung exogen vom Modellierer festgesetzt werden. Im Gegensatz dazu sind *Systemvariable* berechnete Größen. Bei der linearen Simulation eines RES z. B. enthält das Gleichungssystem Erhaltungssätze, exogene Vorgaben für Güter, Transformationsgleichungen und Allokationsgleichungen. Marktanteile, Nutzungsgrade, Nachfrage und Aktivitäten sind Systemparameter während alle Materialflüsse des RES Systemvariable sind.

Systemparameter lassen sich in Szenarioparameter und strategische Parameter einteilen. *Szenarioparameter* sind diejenigen Systemparameter, die die Entwicklung der Rahmenbedingungen, also der Szenariotrends, beschreiben. Tabelle 4-14 zeigt ein Beispiel für die Strukturierung von Szenarien und Strategien. In diesem Beispiel wird der Szenariotrend "Stagnieren-

Tabelle 4-14: Strukturierung von Szenarien und Strategien

Szenario	Szenarioelement	Szenarioparameter	Hypothese
Stagnation	Hohes Bevölkerungswachstum	Geburtenrate	hoch
		Sterberate	moderat
	Stagnierende Wirtschaftsentwicklung	BSP	niedrig
		Sektoraktivitäten	niedrig
	Hohe Preissteigerungen	Ölpreis	hoch
		Kohlepreis	hoch
Prosperität	Mäßiges Bevölkerungswachstum	Geburtenrate	moderat
		Sterberate	niedrig
	Positive Wirtschaftsentwicklung	BSP	hoch
		Sektoraktivitäten	hoch
	Niedrige Preissteigerungen	Ölpreis	moderat
		Kohlepreis	moderat

Strategie	Maßnahme	Strategischer Parameter	Hypothese
Rationelle Energieanwendung in den Haushalten	Verbreitung energiesparender Kochsysteme	Marktanteil verbesserter Holzkohleherd	hoch
		Martktanteil Gasherd	hoch
	Verbreitung energiesparender Beleuchtungssysteme	Marktanteil Leuchtstoffröhren	hoch
		Marktanteil Energiesparlampen	moderat
	Verstärkte Wärmedämmung	Spezifischer Wärmebedarf Neubauten	niedrig
		Nachrüstung von Altbauten	hoch
	Verbreitung energiesparender Heizungssysteme	Marktanteil Solarheizung	moderat
		Marktanteil Gasbrennwertheizung	hoch
Verstärkter Einsatz regenerativer Energiequellen	Erhöhung des Anteils der RE-Technologien bei den Haushalten	Marktanteil Solarthermische Heizungen	hoch
		Marktanteil Photovoltaikanlagen	moderat
		Spezifischer Wärmebedarf Neubauten	niedrig
	Verstärkte Stromerzeugung aus RE	Marktanteil der Windkraftanlagen an der Stromerzeugung	moderat
		Marktanteil der Kleinwasserkraft an der Stromerzeugung	hoch

de Wirtschaftsentwicklung" durch die Parameter "BSP" und "Sektoraktivitäten" quantifiziert. Weitere Szenarioparameter sind die "Geburtenrate", die "Sterberate" und die "Brennstoffpreise". *Strategische Parameter* sind diejenigen Systemparameter, die vom Entscheidungsträger beeinflußt werden können. Im mathematischen Modell beschreiben strategische Parameter die Maßnahmen des Entscheidungsträgers. Die Maßnahme "Verbreitung energiespa-

render Kochsysteme", die zur Strategie "Rationelle Energieanwendung in den Haushalten" gehört, läßt sich durch die Parameter "Marktanteil verbesserter Kochherde" und "Marktanteil elektrischer Herde" quantifizieren. Andere strategische Parameter sind z. B. die "Marktanteile" moderner Kraftwerke, energiesparender Autos, effizienter Heizungssysteme oder isolierter Häuser zur Beschreibung des technischen Fortschritts. Optimierungsmodelle verwenden zur Modellierung bestimmter Maßnahmen Restriktionen (z. B. eine maximale jährliche Wachstumsrate für verbesserte Kochherde) oder führen zusätzliche Kosten (Steuern) ein.

4.5.4 Strukturierung eines Case

Szenarien beschreiben die Rahmenbedingungen des untersuchten Systems und werden aus Szenariotrends gebildet. Politische Handlungsalternativen des Entscheidungsträgers werden durch Strategien beschrieben, die sich in einzelne Maßnahmen untergliedern lassen. Szenarien, Szenariotrends, Strategien und Maßnahmen sind die Komponenten eines Case und werden, wie in Tabelle 4-14 gezeigt, durch Systemparameter quantifiziert. Jedem Systemparameter entspricht eine Zeitreihe im Datenbanksystem *NetWork* (vgl. zum Konzept der Zeitreihe auch Abb. 4-6). Die zukünftige Entwicklung des Systemparameters wird durch die Auswahl einer Hypothese (Zukunftsprojektion) festgelegt. Die Zukunft "beginnt" dabei im Basisjahr der Modellierungsperiode. Da die Anzahl der Hypothesen in *NetWork* unbegrenzt ist, kann für jede Zeitreihe eines Case eine unterschiedliche Hypothese gewählt werden. Zur Bestimmung eines vollständigen und eindeutigen Modelldatensatzes für einen Case (Rechenlauf) muß jedem Systemparameter genau eine Hypothese zugeordnet werden.

Inhaltlich wird ein Case durch die Kombination der zu berechnenden Strategien und Szenarien beschrieben. Jede Strategie und jedes Szenario wird quantifiziert, indem den betroffenen Systemparametern des Modelldatensatzes die gewünschten Hypothesen zugeordnet werden. Tabelle 4-15 zeigt, wie durch die Kombination der Szenarien und Strategien in Tabelle 4-14 vier Cases entstehen und welche Hypothesen den Systemparametern für den Modelldatensatz zugeordnet werden. Allen Systemparametern, die in einem Case nicht explizit mit einer Hypothese belegt werden, wird die Referenzhypothese zugeordnet. Eine besondere Rolle spielt der Referenzcase, in dem für jeden Systemparameter die Referenzhypothese angenommen wird.

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 die Bildung von Komponenten, denen Paare aus Systemparametern und Hypothesen zugeordnet werden können. Diese Komponenten lassen sich dann kombinieren, wobei in einem ersten Schritt Trends zu Szenarien gruppiert und Maßnahmen zu Strategien gebündelt werden können. Strategien und Szenarien lassen sich dann in Form eines Entscheidungsbaums kombinieren. Die daraus resultierende "*Case-Familie*" ist in Abb. 4-24 dargestellt. Es ist jedoch darauf zu achten, daß die Kombinationen zueinander passen müssen, um ein konsistentes Gesamtbild abzugeben. Szenarien und Strategien bilden die Knoten

Tabelle 4-15: Bildung von Cases für einen Berechnungslauf

Case	Szenario	Strategie	Systemparameter	Hypothese
Referenz	-	-	alle	Referenz
Case A	Stagnation	Rationelle Energieverwendung in den Haushalten	Geburtenrate Sterberate BSP, Sektoraktivitäten Ölpreis, Kohlepreis MktA Holzkohleherd, Gasherd MktA Energiesparlampe Wärmebedarf Neubauten Nachrüstung Altbauten MktA Solarheizung MktA Gasbrennwertheizung	hoch moderat niedrig hoch hoch moderat niedrig hoch moderat hoch
Case B	Stagnation	Verstärkter Einsatz von RE	Geburtenrate Sterberate BSP, Sektoraktivitäten Ölpreis, Kohlepreis MktA Solarthermische Heizung MktA Photovoltaik Wärmebedarf Neubauten MktA Wind, Kleinwasserkraft	hoch moderat niedrig hoch hoch hoch niedrig hoch
Case C	Prosperität	Rationelle Energieverwendung in den Haushalten	Geburtenrate Sterberate BSP, Sektoraktivitäten Ölpreis, Kohlepreis MktA Holzkohleherd, Gasherd MktA Energiesparlampe Wärmebedarf Neubauten Nachrüstung Altbauten MktA Solarheizung MktA Gasbrennwertheizung	moderat niedrig hoch moderat hoch moderat niedrig hoch moderat hoch
Case D	Prosperität	Verstärkter Einsatz von RE	Geburtenrate Sterberate BSP, Sektoraktivitäten Ölpreis, Kohlepreis MktA Solarthermische Heizung MktA Photovoltaik Wärmebedarf Neubauten MktA Wind, Kleinwasserkraft	moderat niedrig hoch moderat hoch hoch niedrig hoch

dieses Baumes. Jeder Knoten des Baumes steht aber auch gleichzeitig für einen Case, der sich aus denjenigen Szenarien und Strategien zusammensetzt, die sich auf dem Pfad zwischen ihm und der Wurzel der *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 Gesamtheit der Definitionen gebildet. Ein Konsistenzcheck prüft, ob ein Parameter nicht zweimal mit unterschiedlichen Hypothesen belegt wird.

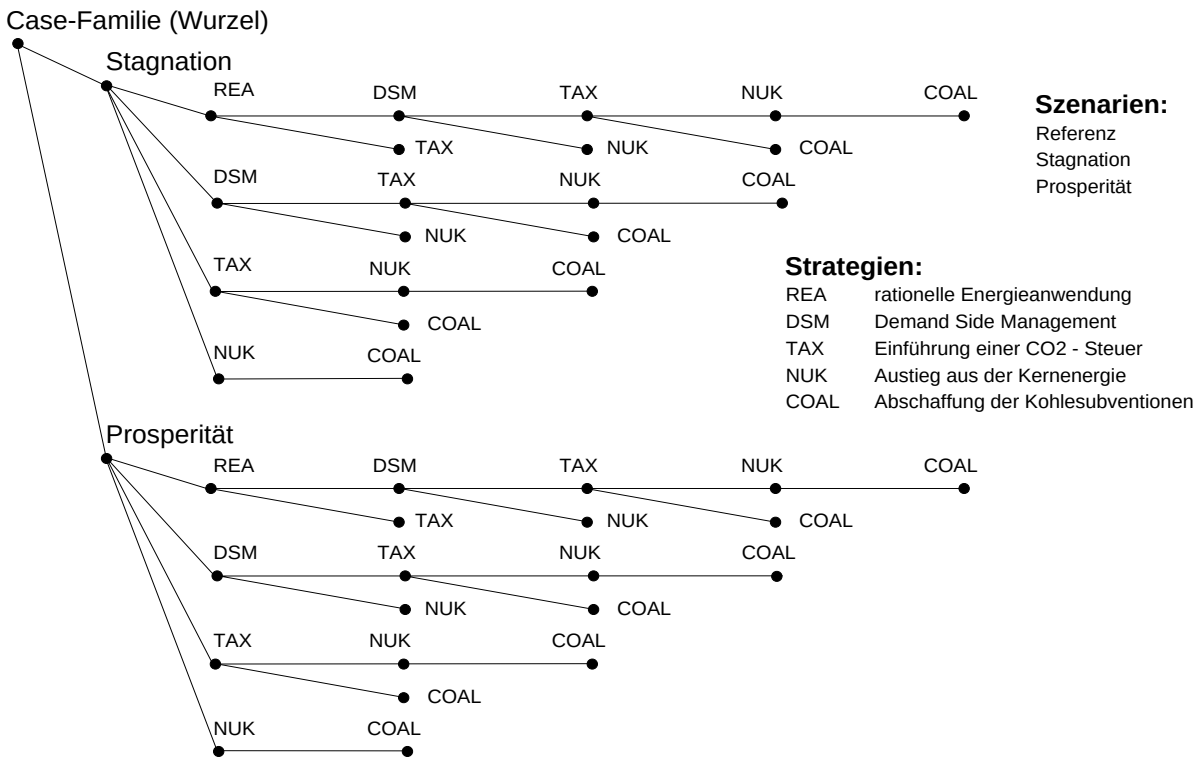


Abb. 4-24: Der Entscheidungsbaum einer Case-Familie

Der *Case-Manager* kann also die für einen Rechenlauf notwendige Liste der Zuordnungen von Hypothesen zu den Systemparametern automatisch aus der hierarchischen Struktur der Case-Familie erstellen. Die sich aus der *Case-Familie* ergebende Hypothese wird während der Vorbereitung eines Rechenlaufs (Komponente VI eines Rechenmoduls) für jeden Parameter in der Systemparameterliste eingetragen. Für alle Systemparameter, denen der *Case-Manager* in dieser Liste keine Hypothese zuordnet, gilt die Referenzhypothese. Damit ist der numerische Modelldatensatz eindeutig festgelegt und die Berechnung kann ausgeführt werden. Durch die vielfältige Kombinationsmöglichkeit einzelner Komponenten in der *Case-Familie* wird es ermöglicht, eine Vielfalt von Cases zu erstellen, ohne die Hypothesenzuordnung jedesmal komplett neu zu definieren.

Die zweite Funktion des *Case-Managers* ist die Dokumentation der inhaltlichen Vorgehensweise bei der strategischen Analyse und beim Aufbau der Cases. Mit dem *Case-Manager* kann die Bedeutung aller Komponenten 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. Die Baumstruktur der *Case-Familie* dokumentiert dann, welche Komponenten für einen Case miteinander kombiniert werden. Weiterhin kann der *Case-Manager* Reports ("Szenariotabellen") erzeugen, die alle quantitativen Unterschiede in den Annahmen zweier Cases sowie deren Abweichungen vom Referenzcase ausweisen.

4.6 Ergebnisanalyse mit dem Analyst

Aufgabe des Analyst ist die schnelle, übersichtliche und im Hinblick auf Veränderungen oder Ergänzungen flexible Aufbereitung und Visualisierung von Daten im Rahmen einer Fallstudie. Der Analyst kann Ergebnisse aus verschiedenen Cases vergleichend darstellen, Annahmen und Ergebnisse gegenüberstellen und Ergebnisse in Bezug zur historischen Entwicklung setzen. Dabei werden immer die aktuellen Daten aus der Datenbank dargestellt.

4.6.1 Konzeption des Analyst

Zur Darstellung und Visualisierung der Daten aus *NetWork* lassen sich mit dem Analyst standardisierte Berichtsformate, sogenannte Reports erstellen. Ein Report besteht aus einer beliebigen Anzahl von Tabellen und Grafiken, die vom Benutzer definiert werden. Tabellen enthalten Daten und besitzen eine logische Verknüpfung zu den entsprechenden Zeitreihen aus *NetWork*. Grafiken visualisieren die Daten der Tabellen und beziehen sich deshalb auf Bereiche des Reports. Ein Report ist im wesentlichen ein Darstellungsformat, das die logischen Bezüge zur Erstellung der Tabellen und Grafiken enthält. Gespeichert werden nicht die Daten der Zeitreihe sondern die Referenz auf die Datenbank. Beim Laden oder Refresh des Reports werden immer die aktuellen Daten aus der Datenbank angezeigt.

Prinzipiell gibt es zwei Sorten von Reports. In zeitabhängigen Reports stellt eine Achse die Zeitachse dar, während die andere Achse die Bedeutung der Zeitreihen beschreibt. Zeitreihenorientierte Reports können eine vertikal oder horizontal angeordnete Zeitachse besitzen. In zeitpunktbezogenen Reports dagegen werden in der x-Achse und der y-Achse zwei Objekte für einen Zeitpunkt in einer Kreuztabelle gegenübergestellt (Matrixformat). Diese Reports enthalten ebenfalls logische Verweise auf Zeitreihen in *NetWork*, allerdings werden jeweils nur einzelne Werte aus den entsprechenden Zeitreihen dargestellt.

Für alle Tabellen und Grafiken in einem Report gilt die gleiche Zeitachse, die sogenannte *Analyseperiode*, die den dargestellten Zeitbereich definiert. Die Stützstellen der Analyseperiode müssen nicht mit den Stützstellen der Modellierungsperiode übereinstimmen, um auch hier Unabhängigkeit zwischen Datenanalyse und Modellierung zu gewährleisten. Fehlende Zeitreihenwerte können durch Interpolation ergänzt werden. Die Analyseperiode kann jedoch nicht über die Modellierungsperiode hinausreichen, damit nicht der falsche Eindruck erweckt wird, die analysierten Daten stammten aus der Zukunftsanalyse eines Modells.

Reports können sowohl Inputdaten (Parameterwerte) als auch Modellergebnisse (Variablenwerte) enthalten, wobei sich Zeitreihen aus mehreren Fallstudien kombinieren lassen. Aggregationen über Prozess- und Gütergruppen, z. B. zur Bestimmung von Energie- oder Emissionsbilanzen, werden automatisch in Summen über die entsprechenden Zeitreihen umgesetzt. Dabei lassen sich die Daten in andere Maßeinheiten derselben Klasse umrechnen.

Der Analyst arbeitet wie ein Spreadsheet und bietet entsprechende Funktionen zur Gestaltung des Layouts und zur Durchführung zusätzlicher Berechnungen, wie z. B. die

Bestimmung bezogener Werte (Energieverbrauch pro Kopf etc.). Alle in Spreadsheets üblichen mathematischen Funktionen stehen zur Verfügung. Zur Vervollständigung des Reports können Texte, Kommentare und Einzelwerte im Report eingetragen werden. Reports und Grafiken lassen sich frei gestalten (Fonts, Rahmen, Layout). Der teilweise oder vollständige Ausdruck eines Reports auf einem Drucker ist möglich, wobei Ränder und Orientierung sowie ein Skalierungsfaktor vorgegeben werden können. Der gesamte Report kann zu anderen Tabellenkalkulationsprogrammen wie z. B. Microsoft Excel exportiert werden. Allerdings gehen dann die logischen Verknüpfungen zur Datenbank verloren, denn genau dies unterscheidet den Analyst von anderen Tabellenkalkulationsprogrammen.

4.6.2 Objekte eines Reports

In Abb. 4-25 werden anhand eines Beispiels für einen zeitabhängigen Report mit horizontaler Zeitachse und drei Tabellen die im Analyst verfügbaren Objekte dargestellt. Die Spalten des Reports werden eingeteilt in den *Wertebereich* RANGE (Spalte 3-6 in Abb. 4-25), der zur Darstellung der numerischen Werte der referenzierten Zeitreihen dient. Er besteht aus mehreren, zusammenhängenden Spalten. Jede dieser Spalten entspricht bei jährlicher Auflösung der Modellierung einem Jahr der Analyseperiode. Die Anzahl der Wertebereichsspalten ergibt sich aus der Definition der Analyseperiode. Der Wertebereich bildet einen untrennbaren Block, der nur vergrößert oder verkleinert werden kann, indem in der Analyseperiode Jahre hinzugefügt oder gelöscht werden. Diese Änderung gilt dann für alle Tabellen des Reports. Vor dem Wertebereichsblock können beliebig viele Spalten als Beschreibungsbereich freigelassen werden. Die *Unitspalte* UNIT (Spalte 2 in Abb. 4-25) zeigt die für eine Zeitreihe gewählte Maßeinheit an. Die UNIT-Spalte kann nur einmal, dafür jedoch an einer beliebigen Position des Reports plaziert werden.

Bei den Zeilen des Reports unterscheidet man drei Typen. Die *Titelzeile* TITLE (Zeile 1, 9, 15 in Abb. 4-25) enthält den Titel der Tabelle, der zur Übersicht in einem Inhaltsverzeichnis des Reports geführt wird. Die *Zeitachsenzeile* AXIS (Zeile 2, 10, 16 in Abb. 4-25) gibt die Stützstellen der Analyseperiode im Report aus und eignet sich als Spaltenüberschrift für den Wertebereich einer Tabelle. Die *Zeitreihenzeile* TS (Zeile 3-6 und 11-13 in Abb. 4-25) erlaubt es, Daten aus Zeitreihen im Report darzustellen. Die Werte der referenzierten Zeitreihe werden für alle Stützstellen der Analyseperiode bestimmt, wobei fehlende Werte durch Interpolation ergänzt werden, wenn diese Option vom Benutzer aktiviert ist. Die *Wertezelle* VALUE (Zeile 20 in Abb. 4-25) beinhaltet einen einzelnen Wert einer Zeitreihe, wobei ein Jahr als Zeitbezug vorgegeben wird. Die Maßeinheit der Wertezelle wird optional in der nächsten Zelle angezeigt.

In einem zeitunabhängigen Matrixreport gibt es keinen Wertebereich und keine Zeitreihenzeilen, sondern ausschließlich Wertezellen. Alle anderen Objekte des Reports sind gleich. Da in diesem Report nur ein einziger Zeitraum dargestellt wird, umfaßt die Analyseperiode bei jährlicher Auflösung genau ein einzelnes Jahr. Die Maßeinheiten der Wertezellen werden in einer festgelegten Zeile des Reports bestimmt und gelten jeweils für die gesamte Spalte.

Alle Objekte eines Reports werden in einer Datenbanktabelle von *NetWork* verwaltet. Für jedes Objekt wird dort die Position im Spreadsheet (Zeile / Spalte) und der Datenbankverweis (wenn vorhanden) gespeichert. Die Tabelle entspricht einer "doppelten Buchführung", die im Hintergrund vom Analyst mitgeführt wird und mit deren Hilfe es jederzeit möglich ist, alle Werte im Spreadsheet mit den Daten aus der Datenbank zu aktualisieren. Der Datenbankverweis auf eine Zeitreihe aus NetWork wird durch fünf Elemente festgelegt. Diese fünf Ele-

	Zeile	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Spalte	**Typ**	**-**	**UNIT**	**RANGE**				**-**
1	**TITLE**	**Endenergieverbrauch der Haushalte**						
2	**AXIS**			**1990**	**1995**	**2000**	**2010**	**Summe**
3	**TS**	Strom	MWh	1200	1600	1850	2300	@sum
4	**TS**	Heizöl	MWh	550	780	920	1230	@sum
5	**TS**	Gas	MWh	200	550	900	1500	@sum
6	**TS**	Kohle	MWh	800	500	340	220	@sum
7	**-**	**Gesamt**	**MWh**	**@sum(c3..c6)**	**@sum**	**@sum**	**@sum**	**@sum**
8	**-**							
9	**TITLE**	**Stromverbrauch Haushalte, Case-Vergleich**						
10	**AXIS**			**1990**	**1995**	**2000**	**2010**	
11	**TS**	Case Referenz	MWh	1200	1600	1850	2300	
12	**TS**	Case A	MWh	1200	1750	2100	2500	
13	**TS**	Case B	MWh	1200	1500	1700	1800	
14	**-**							
15	**TITLE**	**Index Stromverbrauch HH bezogen auf Referenzfall**						
16	**AXIS**			**1990**	**1995**	**2000**	**2010**	
17	**-**	Case A		c12/c11	d12/d11	e12/e11	f12/f11	
18	**-**	Case B		c13/c11	d13/d11	e13/e11	f13/f11	
19	**-**							
20	**Value**	Der Kohleverbrauch in Fantasia betrug 1995				**500**	MWh	

Abb. 4-25: Definition eines zeitabhängigen Reports mit horizontaler Zeitachse

mente beschreiben die Art des Verweises (direkter Verweis auf eine Zeitreihe oder Aggregation), den Datenbankzugriffsschlüssel (Zeitreihennummer oder Aggregationsvorschrift), die Herkunft der Zeitreihe (Name der Fallstudie), die Hypothese bei Inputdaten bzw. der Case bei Modelldaten und die Maßeinheit, in der die Zeitreihe dargestellt werden soll.

Aggregationsvorschriften bestehen aus einer Festlegung von Gruppen für Prozesse, Güter und Regionen sowie einem einzelnen Attribut, daß für diese Gruppe aggregiert werden soll. Gruppen werden durch Knoten in den jeweiligen hierarchischen Gliederungsbäumen definiert (vgl. Kapitel 4.3.7). Statt der Gruppen lassen sich auch einzelne Objekte vorgeben. Diese vier Bedingungen werden durch ein logisches "und" verknüpft und bestimmen den Filter für die Zeitreihen in der Datenbank, die aufsummiert werden sollen. Zusätzlich werden noch Unit, Hypothese bzw. Case und das Jahr bei Aggregationen von Einzelwerten (VALUE) angegeben. Die Aggregationvorschriften werden in einer eigenen Tabelle gespeichert.

4.6.3 Funktionen zum Aufbau eines Reports

Reports bestehen aus Datenbankreferenzen, Layout, Textelementen und Berechnungsfunktionen und werden zusammen mit den anderen Daten der Fallstudie in *NetWork* gespeichert. Das Hauptmenü des Analyst ermöglicht es, Reports zu öffnen, zu kopieren, zu schließen, zu löschen und zu sichern. Die vollständige Definition eines Reports umfaßt Reportnummer, Kurz- und Langname, Reporttyp (horizontal, vertikal, Matrix), Analyseperiode, Zeitschlüssel der Analyseperiode, Ersteller und Erstelldatum, Bearbeiter und Bearbeitungsdatum, Position der Unitspalte, Position der ersten Spalte des Wertebereichs sowie den Status der Interpolation (aktiv/deaktiviert). Jeder Report besitzt ein Inhaltsverzeichnis mit allen Tabellen und Grafiken, die er enthält.

Die Navigationsmöglichkeiten, Layoutfunktionen und verfügbaren mathematischen Formeln im Analyst orientieren sich an Microsoft-Excel, damit der Benutzer möglichst wenig neue Kommandos erlernen muß. Im gesamten Report kann der Benutzer wie in einem Spreadsheet frei mit den Cursortasten navigieren. Alle Zellen, in denen sich keine Analystobjekte befinden (außer die Titelzeilen), sind editierbar. Hier darf der Benutzer Texte, Zahlen und mathematische Formeln eintragen. Die Formeln umfassen eine Teilmenge aus den in Excel verfügbaren Formeln (Grundrechenarten + - * / und die gängigsten Funktionen ^, %, @sum, @avg, @std, @exp, @ln, @min, @max). Fonts und Zahlenformate lassen sich zellenweise festlegen. Linien und Boxen können beliebig plaziert werden.

Zum Aufbau einer Tabelle in einem Report stehen eine Reihe von Befehlen zur Verfügung. Zu beachten ist, daß bei zeitabhängigen Reports nur eine Dimension des Spreadsheets verändert werden kann. Bei einem vertikalen Layout läßt sich z. B. nur die Zeilenanordnung beeinflussen, da die Spaltenanordnung durch die Definition des Berichts festgelegt ist. In einem Report lassen sich leere Zeilen (INS-LINE), Titelzeilen (INS-TITLE), Zeitachsenzeilen (INS-AXIS), Zeitreihenzeilen (INS-TS) und Aggregationszeilen (INS-AGG) einfügen. Alle nachfolgenden Zeilen werden nach unten verschoben. Zeilen können gelöscht

(DEL), ausgeschnitten (CUT) und wieder eingefügt (PASTE) werden. Dieselben Funktionen lassen sich auch auf Wertezellen durchführen. Nach jeder Aktion wird die Position (Zeile / Spalte) aller Objekte des Reports automatisch in der Objektdatentabelle aktualisiert.

Im Report kann ein zusammenhängender Bereich von Zeitreihenzeilen nach einer Spalte aufsteigend oder absteigend sortiert werden. Dabei werden die Zeilen entsprechend der Sortierung vertauscht. Die neue Position wird in der Objekttabelle vermerkt. Alle Daten eines Reports können über eine Updatefunktion auf den aktuellen Stand gebracht werden. Dabei werden alle Datenbankverweise ausgeführt, die entsprechenden Werte aktualisiert und anschließend die Berechnungsformeln des Reports durchgerechnet und die Grafiken aktualisiert. Der Update einer Zeitreihenzeile wird in drei Schritten durchgeführt. Zuerst wird die Zeitreihennummer sowie die Hypothese und die gewünschte Maßeinheit ermittelt und die entsprechende Fallstudie geöffnet. Dann werden die Daten der Zeitreihe eingelesen. Dabei wird je nach Bedarf die Vererbung, das Mapping auf die Analyseperiode und die Umrechnung in die gewünschte Maßeinheit durchgeführt. Zum Schluß werden die Werte in die entsprechenden Spreadsheet-Zellen eingetragen.

Zusätzlich zu den Tabellen lassen sich Grafiken definieren. Verschiedene Grafikformate für die Tabellen eines Reports können festgelegt werden. Die Zeitachse der Grafik kann aus der Zeitachsenzeile übernommen werden. Zusätzlich können noch Titel, Legende, Achsenbeschriftungen, Achsenskalierung etc. festgelegt werden. Die Grafik kann beliebig in dem Report plaziert werden und wird zusammen mit dem Report gespeichert. Der Titel der Grafik wird im Inhaltsverzeichnis des Reports geführt. Die Definition einer Grafik umfaßt die Angabe des darzustellenden Tabellenbereiches im Report, die Darstellungsart (vertikales, horizontales, gestapeltes oder 3D Balkendiagramm, Punktdiagramm, Liniendiagramm, Flächendiagramm, X-Y-Diagramm, Kreisdiagramm), den Diagrammtitel, die Achsenbeschriftung und Achsenskalierung, die Legende sowie Layoutdeklarationen wie Gitternetzlinien, Farbe, Muster, Schraffuren, Rahmenart und Linienstärken.

Der Analyst stellt die Daten einer Fallstudie nicht nur tabellarisch und grafisch dar, sondern erstellt Berichtsformate, die auf die Struktur der Fallstudie Bezug nehmen. Die feste Verknüpfung mit der Datenbank gewährleistet, daß immer die aktuellen Daten im Report angezeigt werden. Die Aggregationsfunktionen garantieren, daß auch bei Änderungen des Referenzenergiesystems, wie z. B. dem Hinzufügen einer neuen Stromerzeugungstechnologie, die angezeigten Ergebnisse, z. B. die CO_2-Emissionen des Stromerzeugungssektors, korrekt berechnet werden. Die Konzeption des Analyst als Spreadsheet erleichert die Einarbeitung und ermöglicht ein hohes Maß an Flexibilität bei der Gestaltung der Reports.

4.7 Multikriterielle Ergebnisbewertung

Strategische Energieplanung ist ein politischer Entscheidungsprozeß, an dem Interessengruppen mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Präferenzen beteiligt sind. Zielsetzungen können untereinander in einem Zielkonflikt stehen, wenn z. B. umweltverträgliche Maßnahmen sehr teuer sind. Hinzu kommt, daß es in vielen Entscheidungsprozessen wichtige Aspekte gibt, die sich einer direkten monetären oder quantitativen Bewertung entziehen. So kann die politische Akzeptanz der Bevölkerung für die erfolgreiche Umsetzung der gewählten Strategie maßgebend sein. Zur Beurteilung energiepolitischer Lösungsstrategien sind daher in der Regel eine Vielzahl von monetären, quantitativen und subjektiven Kriterien zu berücksichtigen.

In diesem Kapitel wird ein multikriterieller Ansatz vorgestellt, der unterschiedliche Bewertungskriterien (Zielfunktionen) und individuelle Wichtungen zuläßt. Das Schema läßt sich benutzerspezifisch anpassen und kann nichtquantitative Bewertungskriterien und subjektive Einschätzungen (z. B. Risikoeinschätzung) integrieren. Wegen der unterschiedlichen Interessenlagen kann eine Bewertung von Entscheidungsoptionen nicht "wertfrei" sein. Statt eine möglichst neutrale Bewertung zu erreichen wird vorgeschlagen, alternative Bewertungen durchzuführen, wobei das Bewertungsschema helfen soll, die individuellen Präferenzen offen zu legen und die Schlußfolgerungen aus dem Bewertungsprozeß transparent und nachvollziehbar zu machen. Es ist das Ziel, dem Entscheidungsträger die Bedeutung der unterschiedlichen Bewertungen verständlich zu machen.

In *PlaNet* werden Entscheidungsoptionen durch Cases (Modelläufe) abgebildet. Die Ergebnisse dieser Cases müssen beurteilt werden. *Kriterien* sind Aspekte, die zur Bewertung der Modelläufe herangezogen werden können, wie z. B. Kosten, Umweltverträglichkeit, Ressourcenverbrauch, Versorgungssicherheit, Flexibilität (Fähigkeit, das System anpassen oder umstrukturieren zu können), politische Akzeptanz, Nachhaltigkeit oder Risiko. *Indikatoren* sind durch Modellrechnungen quantifizierbare Systemgrößen, die zur Festlegung der Kriterienausprägungen verwendet werden können, wie z. B. der Barwert der Systemkosten, der Investitionsbedarf, die CO_2-Emissionen, der Primärenergieverbrauch, etc. *PlaNet* berechnet die verursachten Kosten und die Auswirkungen auf die Energie- und Schadstoffbilanz. *Wichtungen* erlauben bei mehreren Kriterien eine zusammenfassende Beurteilung.

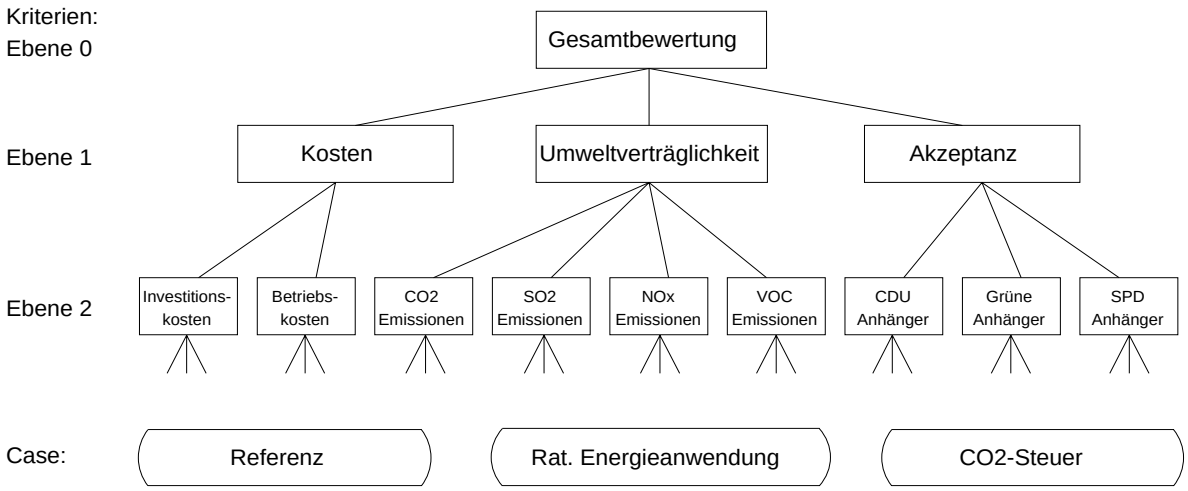
Das hier vorgestellte multikriterielle Bewertungsverfahren baut auf dem Analytical Hierarchy Process (AHP) /118/ auf, ein Verfahren, das für komplexe, schlecht strukturierte Entscheidungsprobleme mit qualitativen Entscheidungskriterien entwickelt wurde. Die AHP-Methode eignet sich als Grundlage für ein konsistentes Verfahren zur Bewertung verschiedener Cases (Modelläufe) anhand mehrerer Kriterien. Sie basiert auf einer Hierarchisierung der Bewertungskriterien, wobei die Gesamtbewertung durch die paarweise Gewichtung der Kriterien sowie eine paarweise Bewertung der Modelläufe erreicht wird. Das Verfahren besteht aus sechs Schritten:

1) Identifizierung aller Bewertungskriterien und Aufstellung der Hierarchie,
2) Paarweise Gewichtung der Kriterien bezogen auf das übergeordnete Kriterium,

3) Paarweise Bewertung der Cases bezogen auf die Kriterien der untersten Ebene,
4) Berechnung der relativen Gewichte der Kriterien einer Ebene,
5) Überprüfung der Konsistenz der Bewertungen einer Ebene,
6) Berechnung der Gesamtwertung der Cases aus der ganzen Hierarchie.

Zuerst wird der Bewertungsprozeß in mehrere Ebenen zerlegt, wie dies in Abb. 4-26 an einem Beispiel gezeigt wird (das Beispiel ist ausführlich im Anhang dokumentiert). Auf der obersten Ebene findet die Gesamtbewertung des Entscheidungsproblems statt, das die beste Alternative identifiziert. Auf den folgenden Ebenen befinden sich die einzelnen Kriterien, anhand derer die Modelläufe beurteilt werden sollen. Jede Kriterienebene läßt sich in beliebig viele Unterebenen gliedern, wobei die Anzahl der Ebenenelemente nicht begrenzt ist. Die Cases befinden sich auf der untersten Ebene der Hierarchie. Zur Ermittlung der Gesamtbewertung wird die Hierarchie von oben her abgearbeitet. Zuerst werden für alle Ebenen die Kriterien untereinander gewichtet, jeweils bezogen auf das übergeordnete Kriterium. Zuletzt werden die Cases anhand der Kriterien in der untersten Ebene bewertet. In unserem Beispiel werden die Cases anhand von neun Kriterien bewertet, die wiederum zu drei übergeordneten Kriterien zusammengefaßt werden. Die Kosten werden anhand des Investitionsbedarfs und der Betriebskosten bewertet. Für die Umweltverträglichkeit wird die emittierte Schadstoffmenge als Indikator herangezogen, während die Akzeptanz jeweils für Anhänger unterschiedlicher Parteien bewertet wird. Aus der Gewichtung der Kriterien und der Bewertung der Cases wird dann eine Gesamtbewertung ermittelt.

Da die direkte Gewichtung der einzelnen Kriterien einer Hierarchieebene unübersichtlich ist, wird eine Gewichtung im Paarvergleich vorgenommen. Dabei wird das Gewicht von zwei



Anzahl der Kriterienebenen:	Z = 2
Anzahl der Kriterien auf Ebene 1:	K1 = 3
Anzahl der Kriterien auf Ebene 2:	K2 = 9
Anzahl der Cases:	M = 3
Relationen Rij des Elements j in Ebene 1:	R11 = 2 , R12 = 4 , R13 = 3

Abb. 4-26: Beispiel einer hierarchischen Bewertungsstruktur

Elementen in Bezug auf ein höher stehendes Element bewertet. Weil Kriterien oft in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, wird zur Wichtung eine 9-stufige verbale Skala vorgeschlagen, deren Kategorien die Zahlen 1 bis 9 zugeordnet sind (vgl. Tabelle 4-16). Der Gewichtungsfaktor w_i/w_j ergibt sich aus der Wichtigkeit w_i des Elements i im Vergleich zur Wichtigkeit w_j des Elements j bezogen auf ein übergeordnetes Kriterium. Gleiche Wichtigkeit der Elemente i und j wird auf der Skala durch die 1 ausgedrückt, während 9 auf der Skala bedeutet, daß Element i absolut dominierend im Vergleich zu Element j ist. Ist Element i absolut unwichtig im Vergleich zu Element j wird diese reziproke Bedingung durch den Kehrwert 1/9 ausgedrückt. Um die Konsistenz der Gewichtung zu erhöhen, muß die Wichtung w_j/w_i immer der Kehrwert von w_i/w_j sein. Die Werte auf der Ordinalskala können vom Benutzer am Rechner z. B. durch die Länge eines Gewichtungsbalkens am Bildschirm angegeben werden. Auf diese Weise kann die aus der Psychophysik /119/ bekannte Fähigkeit des Menschen zur proportionalen Umsetzbarkeit von Empfindungsintensitäten auf Reaktionskontinua ausgenutzt werden. Die subjektiv empfundene Intensität des Bedeutungsunterschieds der Elemente des Paarvergleichs wird in eine objektiv-physikalische Intensität (Länge des Balkens) umgesetzt. Daraus läßt sich dann die Gewichtungszahl ableiten.

Alle paarweisen Vergleiche eines Bezugskriteriums lassen sich als quadratische Matrix A darstellen, wobei Zeilen die Elemente i und Spalten die Elemente j des Vergleichs sind. Die Hauptdiagonale dieser sogenannten *Paarvergleichsmatrix* enthält für alle in der Hierarchie etablierten Relationen eine "1" sonst "0". Nur zwischen den mit "1" markierten Elementen finden paarweise Vergleiche statt. Die Matrix A muß wegen der oben angesprochenen

Tabelle 4-16: Die Bewertungsskala des Analytical Hierarchy Process

Skala	**Bezogen auf das übergeordnete Kriterium**	
w_i / w_j	**ist Kriterium i im Vergleich zu Kriterium j**	**ist Case i im Vergleich zu Case j**
9	absolut dominierend	absolut besser
7	sehr viel wichtiger	sehr viel besser
5	wichtiger	besser
3	leicht wichtiger	leicht besser
1	gleich wichtig	gleich gut
1/3	leicht unwichtiger	leicht schlechter
1/5	unwichtiger	schlechter
1/7	sehr viel unwichtiger	sehr viel schlechter
1/9	absolut unwichtiger	absolut schlechter

Die fehlenden Werte 8, 6, 4, 2 und ihre Reziproken liegen jeweils in der Mitte zwischen den benachbarten Werten.

Konsistenzproblematik reziprok sein, d. h. es gilt $a_{ji} = 1 / a_{ij}$. Daher lassen sich die Werte unter der Hauptdiagonalen berechnen und nur der obere Teil der Matrix muß ausgefüllt werden. Für das Kriterium "Umweltverträglichkeit" der Ebene 1 in dem Beispiel aus Abb. 4-26 ergibt sich die folgende Paarvergleichsmatrix (rechts der Vektor der Kriterien der Ebene 2):

$$A = \begin{pmatrix} 0 & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & 0 & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & 1 & 5 & 7 & 9 & - & - & - \\ - & - & 1/5 & 1 & 4 & 3 & - & - & - \\ - & - & 1/7 & 1/4 & 1 & 3 & - & - & - \\ - & - & 1/9 & 1/3 & 1/3 & 1 & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & 0 & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & 0 & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 0 \end{pmatrix} \quad ; \quad w = \begin{pmatrix} Investitionskosten \\ Betriebskosten \\ CO_2\text{-}Emissionen \\ SO_2\text{-}Emissionen \\ NO_x\text{-}Emissionen \\ VOC\text{-}Emissionen \\ CDU\text{-}Anhänger \\ Grüne\text{-}Anhänger \\ SPD\text{-}Anhänger \end{pmatrix} \tag{4-42}$$

Nur vier Kriterien der Ebene 2 werden miteinander in Bezug gesetzt. Dabei ist das Kriterium CO_2-Emissionen "5 = wichtiger" als die SO_2-Emissionen, "7 = sehr viel wichtiger" als die NO_x-Emissionen und "9 = absolut dominierend" gegenüber den VOC-Emissionen.

Die Anzahl der auszufüllenden Gewichtungstabellen entspricht der Anzahl der Kriterien (in dem Beispiel aus Abb. 4-26 sind das 13 Tabellen). Die Anzahl V der durchzuführenden paarweisen Vergleiche läßt sich aus der Anzahl M der zu bewertenden Cases, der Anzahl Z der Kriterienebenen, der Anzahl K_i der Kriterien der Ebene i und der Anzahl R_{ij} der Relationen eines Elements j der Ebene i mit nachfolgenden Elementen ermitteln:

$$V = \frac{K_1^2 - K_1}{2} + [\sum_{i=1}^{Z-1} \sum_{j=1}^{K_i} \frac{R_{ij}^2 - R_{ij}}{2}] + K_Z * \frac{M^2 - M}{2}, \; für \; Z > 1 \tag{4-43}$$

Für Z = 1 fällt der mittlere Term weg. Für das Beispiel aus Abb. 4-26 ergeben sich 40 paarweise Vergleiche:

$$\begin{aligned} V &= \frac{3^2 - 3}{2} + [\sum_{i=1}^{1} \sum_{j=1}^{3} \frac{R_{1j}^2 - R_{1j}}{2}] + 9 * \frac{3 - 3}{2} \\ &= 3 + [\frac{2^2 - 2}{2} + \frac{4^2 - 4}{2} + \frac{3^2 - 3}{2}] + 27 = 40 \end{aligned} \tag{4-44}$$

Es läßt sich beweisen, daß der normalisierte Eigenvektor der reziproken (n, n)-Paarvergleichsmatrix **A** die Gewichtung **w** der miteinander verglichenen Elemente bezogen auf das übergeordnete Kriterium widerspiegelt. **A** und **w** sind definiert als

$$A = \begin{pmatrix} w_1 / w_1 & w_1 / w_2 & . & . & w_1 / w_n \\ w_2 / w_1 & w_2 / w_2 & . & . & w_2 / w_n \\ : & : & : & : & : \\ w_n / w_1 & w_n / w_2 & . & . & w_n / w_n \end{pmatrix} \quad ; \quad w = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ : \\ w_n \end{pmatrix} \qquad (4\text{-}45)$$

Für **A** gilt $a_{ji} = 1 / a_{ij}$, wobei $a_{ij} = w_i / w_j$ ist. Multiplizieren wir **A** mit **w** erhalten wir n**w**, d. h. **Aw** = n**w** an. Dies ist die Gleichung zur Bestimmung der Eigenvektoren von Matrix **A**: jeder Vektor $\mathbf{w} \neq \mathbf{o}$, für den $\mathbf{Aw} = \lambda\mathbf{w}$ mit einer geeigneten Zahl λ gilt, ist *Eigenvektor* von **A**. λ ist der zu diesem Eigenvektor gehörende *Eigenwert* von **A**. Die Gleichung $\mathbf{Aw} = \lambda\mathbf{w}$ ist äquivalent zu $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E})\ \mathbf{w} = \mathbf{o}$. Dieses homogene lineare Gleichungssystem besitzt als nichttriviale Lösungen die gesuchten Eigenvektoren. $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E})\ \mathbf{w} = \mathbf{o}$ hat genau dann nichttriviale Lösungen, wenn der Rang der Matrix $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E}) < n$ ist, d. h. wenn die charakteristische Gleichung von **A**, i. e. $|\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E}| = 0$ ist. Die Lösungen λ_i dieser Gleichung sind die Eigenwerte von **A**. Die charakteristische Gleichung liefert eine Polynomgleichung n-ten Grades in der Variable λ und somit auch n Eigenwerte λ_i. Die nichttrivialen Lösungen $\mathbf{w}_i$ des homogenen linearen Gleichungssystems $(\mathbf{A} - \lambda_i\mathbf{E})\ \mathbf{w} = \mathbf{o}$ sind die zu λ_i gehörenden Eigenvektoren.

Bei der Durchführung von paarweisen Vergleichen ist es leicht, inkonsistente Bewertungen zu machen. Inkonsistent ist z. B. die folgende Bewertung: B ist gleich gut wie A, C ist sehr viel besser als A, B ist besser als C. Um die Qualität der Gesamtbewertung beurteilen zu können, muß eine Prüfung der logischen Konsistenz möglich sein. Auch hier bietet sich eine Lösung an. Da jede Zeile von **A** ein Vielfaches der ersten Zeile ist, besitzt **A** den Rang 1 und hat demzufolge nur einen einzigen, von Null verschiedenen Eigenwert λ_{max}. Weiterhin ist bekannt, daß die Summe aller Eigenwerte gleich der Summe der diagonalen Elemente ist. Daher gilt $\lambda_{max} = n$. Es läßt sich zeigen, daß für eine inkonsistente Paarvergleichsmatrix $\lambda_{max} > n$ wird. Saaty definiert $\mu = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ als Maß für die Konsistenz. Eine konsistente reziproke Paarvergleichsmatrix **A** mit positiven Elementen besitzt $\lambda_{max} = n$, d. h. $\mu = 0$. Je weiter μ von Null entfernt ist, desto inkonsistenter die Bewertung. Bei inkonsistenten Paarvergleichtsmatrizen ergeben sich zum Teil auch komplexe Eigenwerte λ_i. λ_{max} ist in diesem Fall der größte, reelle, positive Eigenwert. Der zu λ_{max} gehörige normierte Eigenvektor ergibt den gesuchten Gewichtungsvektor **w** (siehe auch /120/ für eine exakte Darstellung des Berechnungsmodus).

Sind alle Paarvergleichsmatrizen konsistent, werden die daraus ermittelten Eigenvektoren einer Ebene zu einer Gewichtungsmatrix zusammengesetzt. Wie in Abb. 4-27 dargestellt ist, ergibt sich dadurch auf der Ebene der Modelläufe die (3, 9)-Matrix **C**, auf der 2. Ebene die

(9, 3)-Matrix **B** und auf der 1. Ebene die (3, 1)-Matrix **A** (die paarweisen Vergleiche sind im Anhang dokumentiert). Die Gesamtbewertung der Cases ergibt sich aus der Matrixmultiplikation **C** * **B** * **A**. Die Gesamtwertung ergibt für das Beispiel 55% für den Referenzcase, 29% für den Case "Rationelle Energieanwendung" und 16% für den Case "CO_2-Steuer". In der Matrix **A** erkennt man, daß das Kriterium "Kosten" mit 72% am wichtigsten eingeschätzt wird, gefolgt von "Akzeptanz" (20%) und "Umweltverträglichkeit" (8%). Auf der zweiten Ebene wird aus der Matrix **B** ersichtlich, daß die Investitionskosten mit 83% den Löwenanteil am Kriterium "Kosten" haben, ebenso wie die CO_2-Emissionen mit 67% an der "Umweltverträglichkeit" und die CDU mit 64% an der "Akzeptanz". In der Matrix **C** kann die Bewertung der drei Modelläufe bezüglich der neun Bewertungskriterien abgelesen werden.

Eine Bewertung der Cases ist zwangsläufig subjektiv, da sie im Rahmen eines zielgruppenabhängigen Wertesystems stattfindet. Der Vorteil der AHP-basierten multikriteriellen Bewertungsmethode ist, daß sie die subjektive Bewertung der Cases strukturiert und die Bewertungen transparent und damit nachvollziehbar macht. Die 9-stufige verbale Skala macht es möglich, auch qualitative Aspekte in die Bewertung mit einzubeziehen, die sich nicht direkt aus berechneten Indikatoren ableiten lassen. Die freie Strukturierung des Bewertungsprozesses, die paarweise Betrachtung, die Konsistenzprüfung und die Matrizenbasierte Berechnungsmethode macht die AHP-Methode flexibel, einfach, robust und schnell. Wird die Bewertung parallel von unterschiedlichen Zielgruppen durchgeführt, hilft das AHP-basierte Verfahren, Übereinstimmungen und kontroverse Standpunkte zu identifizieren und die Diskussion bei der Entscheidungsfindung zu versachlichen.

Gewichtung der Kriterien der 1. Ebene

	Gesamt
Kosten	72%
Umwelt	8%
Akzeptanz	20%
	100%

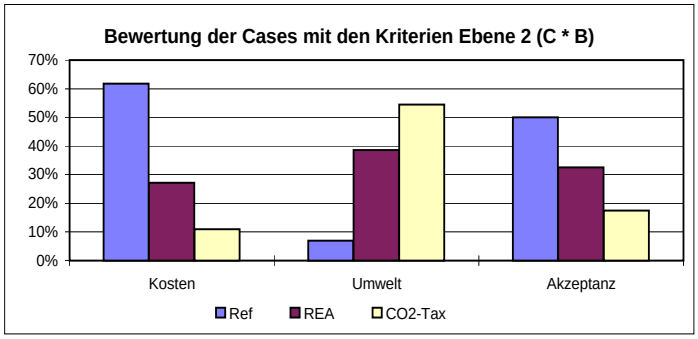
Legende der Matrix-Multiplikationen

A			Ebene 1
B * A	B		Ebene 2
C * B * A	C * B	C	Ebene 3

Die Matrizen A, B und C werden aus den Eigenvektoren der paarweisen Vergleichsmatrix bestimmt.

Gewichtung der Kriterien der 2. Ebene

	Gesamt	Kosten	Umwelt	Akzeptanz
Inv.-K.	60%	83%		
Bet.-K.	12%	17%		
CO2	5%		67%	
SO2	2%		20%	
NOx	1%		7%	
VOC	1%		7%	
CDU	13%			64%
Grüne	5%			26%
SPD	2%			11%
	100%	100%	100%	100%



Bewertung der Modelläufe der 3. Ebene

	Gesamt	Kosten	Umwelt	Akzepta	Inv.-K.	Bet.-K.	CO2	SO2	NOx	VOC	CDU	Grüne	SPD
Referenz	55%	62%	7%	50%	73%	5%	6%	10%	7%	8%	75%	6%	6%
REA	29%	27%	39%	33%	19%	69%	23%	70%	69%	71%	18%	74%	20%
CO2-Tax	16%	11%	54%	17%	8%	25%	71%	20%	24%	21%	7%	20%	74%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Abb. 4-27: Beispiel für die Berechnung der Gesamtbewertung mit AHP

4.8 Dokumentation der Fallstudie

Die Dokumentation aller Phasen der strukturierten Planung ist eine wesentliche Anforderung an entscheidungsunterstützende Systeme. *PlaNet* dokumentiert daher die Struktur des modellierten Energiesystems, die Konzeption der Analyse, die mathematische Spezifikation des Systems, die Herkunft der Daten, die Annahmen für die Modelläufe sowie den Aktionsplan als Ergebnis des Entscheidungsprozesses. *PlaNet* ist so strukturiert, daß mit der Durchführung der Modellierung so weit wie möglich auch die Arbeit des Planers dokumentiert wird, d. h. daß kein zusätzlicher Aufwand für die Dokumentation nötig ist. Dort, wo sich die Dokumentation nicht aus der Gestaltung der Modellierung ergibt, sondern optional ist, stellt *PlaNet* angepaßte Werkzeuge zur Verfügung, die den Aufwand so weit wie möglich reduzieren, da die Erfahrung gezeigt hat, daß eine Dokumentation nur dann durchgeführt wird, wenn der Aufwand sich in einem vertretbaren Rahmen bewegt.

4.8.1 Modellierung des Energiesystems

PlaNet verwendet das Referenzenergiesystem (RES) zur Modellierung realer Energiesysteme. Alle Informationen im Datenbanksystem *NetWork* werden mit Bezug zum RES gespeichert. Auch die Rechenmodule *PlaNet-Flow* und *Planet-Cost* beziehen alle Gleichungen auf die Struktur des RES. Das RES ist damit der Ausgangspunkt jeder Fallstudie und der Schlüssel zum Verständnis der Analyse. Ohne RES kann keine Planungsstudie durchgeführt werden. Die Dokumentation des RES ist daher unerläßlich.

Das Datenbanksystem *NetWork* ist so angelegt, daß der Modellierer das RES beim Anlegen automatisch auch dokumentiert. Die Datenbank enthält eine Liste aller Prozesse, Güter und ihrer Verknüpfungen. Gruppierungen von Objekten werden durch hierarchische Gliederungsbäume dokumentiert. Alle Objekte des RES sowie die Gruppierungen können mit einem Kurz- und einem Langnamen versehen werden und lassen sich in Kommentarfeldern ausführlich beschreiben. Alle Definitionen lassen sich in verschiedenen Berichtsformaten ausdrucken.

4.8.2 Konzeption der Fallstudie

Die Konzeption der Fallstudie wird festgelegt durch die untersuchten Probleme, die angestrebten Ziele und die Szenarien und Strategien, den sogenannten Komponenten der Fallstudie. Eine genaue inhaltliche Festlegung dieser Komponenten ist unerläßlich für eine zielführende Bestimmung der Systemobjekte, der Systemgrenzen des RES und der Analysemethode. Die Konzeption einer Fallstudie wird dokumentiert, indem die einzelnen Komponenten mit Hilfe von Texten beschrieben werden, ihre inhaltliche Vernetzung aufgezeigt wird und sie mit Hilfe von Zeitreihen aus der Datenbank quantifiziert werden. Abb. 4-28 zeigt ein Beispiel für die Struktur der Komponenten und ihre Quantifizierung durch Indikatoren. Diese Dokumentation der Konzeption einer Fallstudie wird vom *Case-Manager* übernommen.

Die inhaltliche Formulierung der Analyse beginnt mit einer Aufstellung und Beschreibung aller Problemstellungen, die in der Fallstudie untersucht werden sollen. Die genaue Festlegung der Probleme ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, daß die Planungsaufgabe zielführend gelöst werden kann. Dann folgt eine Beschreibung der vom Entscheidungsträger verfolgten Zielsetzungen. Die Zielsetzungen nehmen dabei Bezug auf die Problemstellungen. Die Dokumentation der Probleme und Ziele erfolgt zunächst durch eine Textbeschreibung. Probleme und Ziele lassen sich hierarchisch gliedern. Hauptprobleme lassen sich in Unterprobleme strukturieren, die durch Problemindikatoren quantifiziert werden. Für die Zielsetzung läßt sich oft ein mehrstufiges, operationalisierbares Zielsystem aus Oberzielen, Zwischenzielen und Unterzielen erstellen, wie dies z. B. bei der zielorientierten Projektplanung ZOPP /121/ der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit mbH (GTZ) der Fall ist. Dabei ist darauf zu achten, daß man zu Unterzielen gelangt, die für sich einzeln meßbar sind (also eindeutige Indikatoren für die Zielerreichung besitzen), die sämtliche Aspekte des Oberziels ausschöpfen und die möglichst redundanzfrei sind. Die Zielhierarchie mit den zugehörigen Zielindikatoren stellt das Wertesystem der Analyse dar, mit dem die alternativen Lösungsstrategien für eine rationale Entscheidungsfindung bewertet werden.

In Szenarien werden die Randbedingungen festgelegt, in der sich die Analyse bewegen soll. Szenarien lassen sich dabei in verschiedene Trends untergliedern. Sowohl Szenarien als auch Trends werden durch beschreibende Texte dokumentiert und mit Hilfe von Verweisen auf Zeitreihen von Szenarioparametern in der Datenbank quantifiziert. Welche Strategien untersucht werden, ist abhängig von den Problemstellungen und Zielsetzungen der Fallstudie. Strategien setzen sich aus Einzelmaßnahmen zusammen, die die politischen

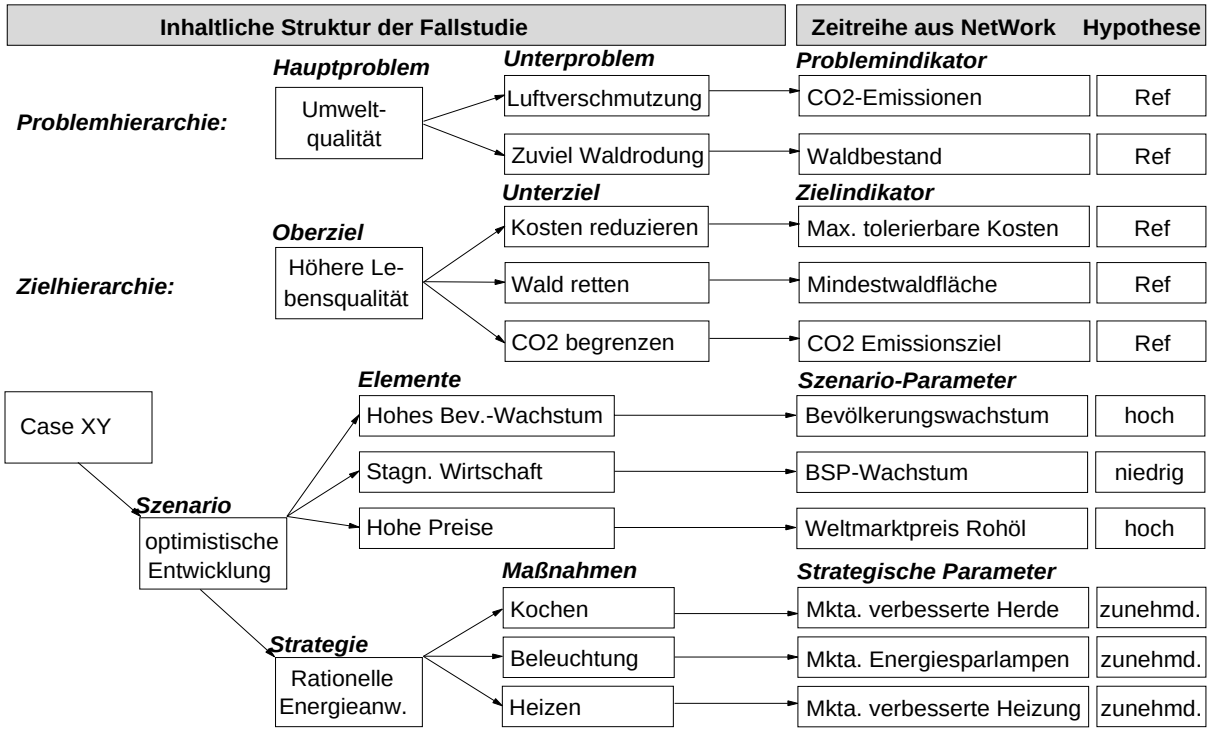


Abb. 4-28: Dokumentation der Komponenten einer Fallstudie

Handlungsalternativen des Entscheidungsträgers darstellen und die jeweils eine oder mehrere Zielsetzungen der Fallstudie verfolgen. Beide werden durch Texte beschrieben. Ihre Zuordnung zueinander wird dokumentiert, wobei einzelne Maßnahmen zu mehreren Strategien gehören können. Strategien und Maßnahmen werden mit Hilfe von Strategieparametern in der Datenbank quantifiziert, Szenarien und Trends durch Szenarioparameter. Da jede Zeitreihe in der Datenbank verschiedene Hypothesen für die zukünftige Entwicklung besitzen kann, muß zu jedem Parameter die zu verwendende Hypothese festgelegt werden. Diese Zuordnung wird von *Case-Manager* dokumentiert. Auf diese Weise läßt sich nachvollziehen, wie eine mit Worten formulierte Strategie in Zahlenwerte umgesetzt wurde.

Die Komponenten einer Fallstudie besitzen neben ihrer hierarchischen Struktur eine inhaltliche Verflechtung: Strategien verfolgen Zielsetzungen, um Probleme zu lösen und werden im Rahmen unterschiedlicher Szenarien evaluiert. Zu jedem Problem sollte es mindestens ein Ziel und zu jedem Ziel auch mindestens eine entsprechende Strategie geben, um dieses Ziel zu erreichen. Deshalb kann auch der Bezug von Zielen auf Probleme und der Bezug von Strategien und Maßnahmen auf bestimmte Ziele aus dem Zielsystem dokumentiert werden.

Für den *Case-Manager* ergeben sich daraus eine Reihe von Anforderungen. Er muß die Bedeutung der Komponenten beschreiben, ihre hierarchische Struktur und ihre inhaltliche Verflechtung dokumentieren und zur Dokumentation der quantitativen Annahmen Verweise auf numerische Zeitreihen in *NetWork* verwalten. Der *Case-Manager* speichert alle diese Informationen ebenfalls in *NetWork*. Die Datenbank für eine Fallstudie enthält damit eine vollständige Dokumentation der Analyse. Diese enthält mit dem RES die Struktur des Energiesystems, die numerischen Daten für die Modellierung und eine Dokumentation der inhaltlichen Vorgehensweise und der strategischen Aspekte der Fallstudie, nämlich die Beschreibung und Verflechtung der Probleme, Ziele, Szenarien und Strategien. Bisher enthielten Datenbanken von Planungsinstrumenten nur die numerischen Daten.

4.8.3 Gleichungsspezifikation

Rechenmodule wie z. B. *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* benötigen zusätzliche Angaben, um aus dem RES ein eindeutiges Gleichungssystem erstellen zu können. Sie bieten in der Regel entsprechende Formulare mit Wahlmöglichkeiten an, die vom Modellierer ausgefüllt werden müssen. Da die ausgefüllten Formulare zusammen mit der Fallstudie abgespeichert werden, ist seine Wahl automatisch dokumentiert. Reports stehen zur Verfügung, um diese benutzerdefinierte Spezifikation des Gleichungsystems gezielt auszuwerten. Das System erstellt aus dem RES und dieser Spezifikation das endgültige Gleichungssystem (siehe auch Kapitel 4.4.1), das ebenfalls dokumentiert werden kann. In der Regel ist dieser Ausdruck des Gleichungssystems in mathematischer Form besonders hilfreich für Anfänger, die dadurch die Funktionsweise und den logischen Aufbau von *PlaNet* leichter erfassen können.

4.8.4 Daten

Die Dokumentation von Herkunft und Qualität aller Daten ist ein wesentliches Merkmal einer vollständigen Datenbasis für die Modellierung. Daher ist in *NetWork* die Möglichkeit vorgesehen, für jede Zeitreihe und für jeden einzelnen Wert der Zeitreihe ein Literaturzitat für die Quelle, einen Qualitätsschlüssel und einen Kommentar anzugeben. Um die Dokumentation der Quellen zu erleichtern, besitzt *NetWork* eine bibliographische Datenbank, die die Zitate einer Fallstudie verwaltet, so daß nur noch Verweise auf diese Datenbank durchgeführt werden müssen. Zusätzlich werden die Literaturzitate aller Fallstudien in einer zentralen Datenbank verwaltet, so daß sie auch für neue Fallstudien zur Verfügung stehen.
Neben der Quelle einer Information speichert *NetWork* automatisch auch den Namen des Urhebers sowie Datum und Uhrzeit des Eingabe- oder Aktualisierungsvorgangs.

4.8.5 Modelläufe / Cases

In diesem Abschnitt geht es darum, die Gestaltung sowie den Status der einzelnen Cases zu dokumentieren. Dies ist neben der Dokumentation der Konzeption der Fallstudie die zweite Funktion des *Case-Managers*.

Die inhaltlichen Aussagen der Komponenten sind durch die Zuordnung von einzelnen Parameter-Hypothesenpaare bereits in Zahlenwerte für die Modellierung übersetzt, was vom *Case-Manager* dokumentiert wird. Mit Hilfe der *Case-Familie* wird dann die Zusammensetzung eines Case dokumentiert, d. h., welche Szenarien und Strategien zu einem Case kombiniert wurden. Schließlich ist der *Case-Manager* in der Lage, Reports (sogenannte "Szenariotabellen") zu erzeugen, in der alle gegenüber dem Referenzcase geänderten Parameter mit ihren Zahlenwerten in einer Tabelle dokumentiert sind. Der Benutzer kann auswählen, für welche Szenarien und Strategien, für welche Parameter und für welchen Zeitraum die Daten dargestellt werden sollen. Ähnliche tabellarische und grafische Darstellungen sind auch für die Ergebnisse möglich, um die quantitativen Unterschiede zweier Cases sowie deren Abweichungen vom Referenzcase auszuweisen.

Schlußendlich ist das System in der Lage, für jedes Rechenmodul zu dokumentieren, in welchem Zustand sich die Fallstudie befindet. Dies ist besonders wichtig, da der Modellierer an vielen Stellen Veränderungen vornehmen kann, die den Status beeinflussen. Er kann das RES verändern, die Gleichungsspezifikation umstellen, Daten eingeben, Maßeinheiten ändern, Cases verändern oder neu definieren. In jedem dieser Fälle muß das modulspezifische Statussystem aussagen können, ob das RES konsistent definiert ist, ob das Gleichungssystem widerspruchsfrei ist und ob die Ergebnisse für jeden einzelnen Case aktuell sind.

4.8.6 Aktionsplan

Im Aktionsplan werden als Ergebnis der Fallstudie die getroffenen Entscheidungen dokumentiert. Der Aktionsplan umfaßt die Liste der ausgewählten Strategien und Maßnahmen und dokumentiert anhand der ermittelten Bewertungsindikatoren die zu erwartenden Auswirkungen. Außerdem enthält er Vorschläge zur Umsetzung der verschiedenen Maßnahmen. Ein Operationsplan beschreibt die zeitliche Strukturierung der Maßnahmen.

NetWork ist so konzipiert, daß die Datenbank gleichzeitig den Grundstock für ein Fallstudieninformationssystem bildet, weshalb die Datenbasis sich sehr leicht aktualisieren und komplettieren läßt. Durch die Entkopplung der Datenbasis von der Modellierungsperiode lassen sich die Modellrechnungen für eine verschobene Zeitperiode leicht wiederholen, eine wichtige Voraussetzung für ein effektives Monitoring System. Zusammen mit den Zielindikatoren wird auf diese Weise eine kontinuierliche Begleitung und Erfolgskontrolle während der Umsetzung des Aktionsplans ermöglicht.

Eine ausreichende Dokumentation ist das Fundament für die Kontinuität der Planung, auf deren iterativen Charakter schon hingewiesen wurde. Soll eine Planungsstudie nach einem oder zwei Jahren aktualisiert werden, ist das nur möglich, wenn sie gut dokumentiert war, d. h. wenn die Ideen und die strategische Vorgehensweise des Planers wiedererkennbar sind. Eine gut strukturierte Dokumentation und Transparenz bei der Modellierung sind ebenfalls Voraussetzung für eine Qualitätskontrolle durch nicht am Projekt beteiligte Gutachter und für die Nachvollziehbarkeit der Planungsergebnisse für Außenstehende.

4.9 Benutzeroberfläche

Die Oberfläche der Software ist die Schnittstelle des Dialogsystems zum Benutzer von *PlaNet*. Diese Benutzerschnittstelle ermöglicht die Dateneingabe und Datenpflege, die Steuerung der Rechenmodule und die Auswertung der Ergebnisse. *PlaNet* besitzt im Unterschied zu herkömmlichen Planungsinstrumenten eine graphische Benutzerschnittstelle (Grafical User Interface, GUI), die unter dem PC-Betriebssystem Windows nach den Richtlinien von Microsoft zur Gestaltung von graphischen Oberflächen /122/ realisiert wurde (siehe auch das Beispiel in Abb. 4-29).

Die wesentliche Eigenschaft graphischer Oberflächen ist, daß sie ereignisgesteuert (event driven) statt prozedural sind. Die Abfolge eines Programms wird nicht, wie bei vielen in FORTRAN programmierten Planungsinstrumenten vom Programmierer festgelegt, sondern kann vom Benutzer gesteuert werden. Das Programm ist daher in Module und Ereignisse zerlegt, die vom Benutzer mit Mausunterstützung über Buttons oder Menüs ausgelöst werden. Sequenzen werden vom Programm nur dann vorgeschrieben, wenn sie inhaltlich notwendig sind, wie z. B. die Forderung, daß vor dem ersten Modellauf die mathematische Modellbeschreibung konsistent sein muß. Die Kommunikation mit dem Rechner läßt sich dadurch an den natürlichen Arbeitsrhythmus des Benutzers anpassen.

Graphische Oberflächen verwenden eine problemorientierte Informationsdarstellung. Daher sind für die Benutzung von *PlaNet* keine Betriebssystemkenntnisse erforderlich. Die Benutzerschnittstelle zeichnet sich durch eine einheitliche Bedienung aller Module sowie eine einheitliche Bildschirmgestaltung und Farbgebung aus. Die Dateneingabe erfolgt menügesteu-

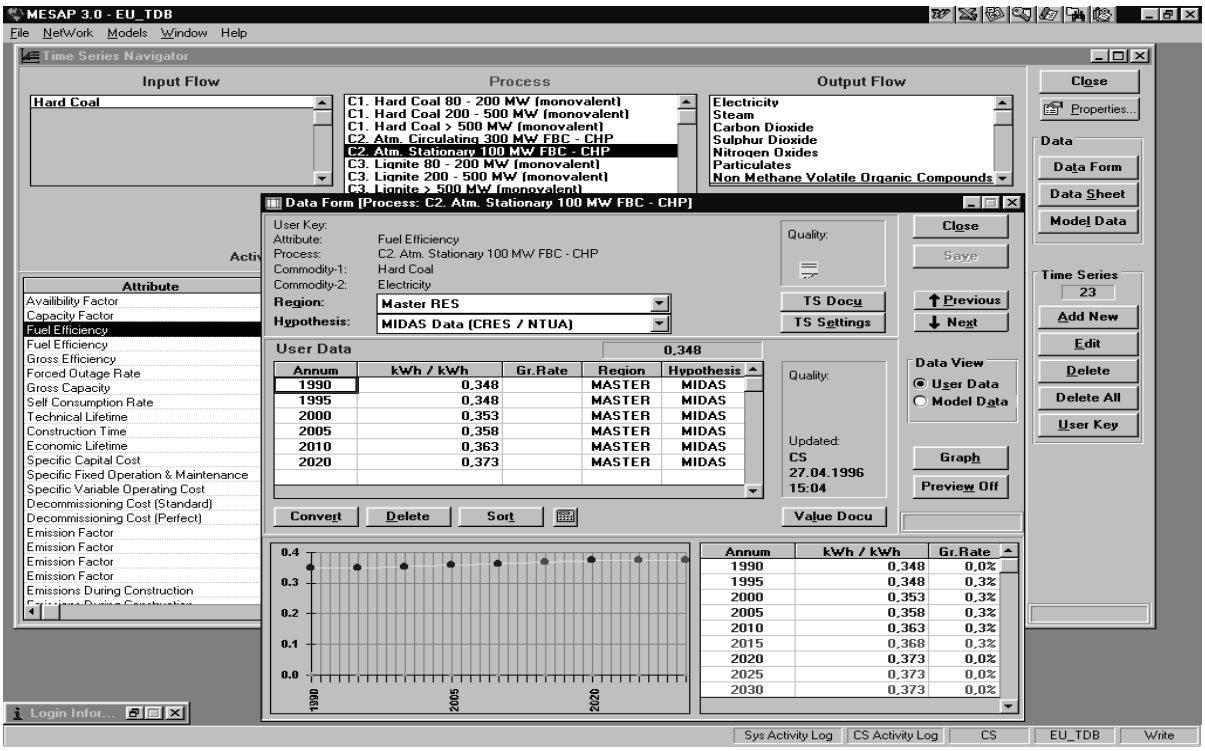


Abb. 4-29: Die Maske des *PlaNet-Navigators* als Beispiel für ein GUI

ert mit Hilfe von Bildschirmeingabemasken (Formularen), die vom Benutzer interaktiv ausgefüllt werden. Schon während der Eingabe wird eine Konsistenzprüfung durchgeführt. Eingabefehler können so lange vor der Modellberechnung bereits während der Dateneingabe aufgespürt und dem Benutzer angezeigt werden. Die langwierige Fehlersuche beim Aufbau eines Datensatzes für ein Planungsinstrument wird dadurch reduziert und der Modellierer kann die so gewonnene Zeit für inhaltliche Arbeit verwenden. Ein umfeldbezogenes (kontextsensitives) Hilfesystem liefert gezielte Hinweise bei auftauchenden Problemen und ersetzt das Benutzerhandbuch. Die Protokollierung aller vom Benutzer durchgeführten Aktivitäten gewährleistet jederzeit den Überblick über die Modellierungsarbeiten. Ein Statussystem zeigt den aktuellen Stand der Fallstudie und der Modellergebnisse auf einen Blick.

Die Wirkungsweise der in *NetWork* vereinbarten impliziten Regeln des Mappings und der Vererbung von Daten werden während der Dateneingabe visualisiert. Das Resultat dieser Algorithmen wird tabellarisch und graphisch am Bildschirm dargestellt. Berechnete Werte werden farblich von den eingegebenen Werten unterschieden. Vererbte Werte sind in der tabellarischen Darstellung grau hinterlegt und lassen sich nicht verändern, wogegen "echte" Werte schwarz dargestellt werden. Auf diese Weise werden alle Interpolationsregeln aus Tabelle 4-4 und Abb. 4-9 sowie die Vererbungsregeln aus Abb. 4-8 transparent vermittelt. Die graphische Darstellung aller Hypothesen einer Zeitreihe wie in Abb. 4-6 ermöglicht es, schon während der Eingabe die verschiedenen Annahmen für die zukünftige Entwicklung zu überprüfen. Die Visualisierung aller impliziten Regeln erlaubt dem Planer eine Plausibilitätskontrolle und Korrektur eventueller Fehleingaben schon während der Dateneingabe. Zusätzlich erlauben klare Fehlermeldungen während aller Phasen des Modellaufbaus und der Modellberechnung eine schnelle und eindeutige Lokalisierung und Behebung der Fehler.

Die Benutzerschnittstelle von *PlaNet* transportiert die Philosophie der strukturierten Planung. Die Menüstruktur orientiert sich an den Planungsphasen. Für jede Phase findet sich ein entsprechendes Modul in *PlaNet*. Die Strukturierung macht die Planungsarbeiten übersichtlich und nachvollziehbar. Ein Grundsatz von *PlaNet* ist, daß der Benutzer zuerst konzipiert und dann ausführt. Dies bedeutet, daß der Benutzer zuerst das RES erstellt und mit dieser Beschreibung des Energiesystems den Grundstein der Modellierung legt und auch dokumentiert. Nun erst kann die mathematische Spezifikationen erstellt werden, die genau festlegt, wie die einzelnen Gleichungen für die Objekte im RES aufgestellt werden sollen. Diese Spezifikation wird auf Konsistenz und Vollständigkeit geprüft und danach wird das Gleichungssystem erstellt. Aus der Spezifikation läßt sich außerdem das Datengerüst ableiten, das alle diejenigen Zeitreihen umfaßt, für die der Benutzer vor einem Modellauf Daten eingeben muß - dies sind alle Systemparameter. Diese Vorgehensweise stellt sicher, daß die Spezifikation dokumentiert, das Gleichungssystem lösbar und die Datenbank vollständig ist. Alle wichtigen strategischen Entscheidungen werden früh und bewußt getroffen und sind automatisch dokumentiert.

5 Fallstudie: Regionale Energieplanung in Madagascar

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der strukturierten Planung mit *PlaNet* am Beispiel einer Fallstudie in Madagascar illustriert. Von 1990 bis 1993 wurde im Nordwesten Madagascars eine regionale Energieplanungsstudie in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) im Rahmen des dortigen Sonderenergieprogramms (SEP) durchgeführt /123/, deren Schwerpunkt eine detaillierte Befragung von 3000 Haushalten war. Aus Platzgründen wird hier nur der wichtigste Aspekt des Energiesystems, nämlich die Brennholzversorgung der Haushalte beschrieben.

5.1 Beschreibung des untersuchten Energiesystems

Die untersuchte Region befindet sich im Nordwesten Madagascars. Das Klima ist tropisch und besitzt eine ausgeprägte Regenzeit. Die jährliche Durchnittstemperatur beträgt 25 Grad Celsius und variiert im Jahresverlauf nur wenig. Es gibt drei Flüsse mit sehr unregelmäßigem Wasserhaushalt. Natürlicher Urwald findet sich nur noch in entlegenen Bergregionen und ist in mehreren Naturparks geschützt. Der Rest der Region ist mit Sekundärwald und Savanne bedeckt. Die Region umfaßt eine Fläche von ca. 20 000 km^2 mit insgesamt 390 000 Einwohnern (1990) in 95 000 Haushalten. 38% der Bevölkerung lebten 1990 in den drei Städten der Region, davon allein 85 000 Einwohner (22%) in der Hafenstadt Diego Suarez. Das Bevölkerungswachstum ist mit 3,5% pro Jahr sehr hoch, insbesondere im städtischen Bereich (5%). Die Haushalte sind mit einem durchschnittlichen Einkommen von

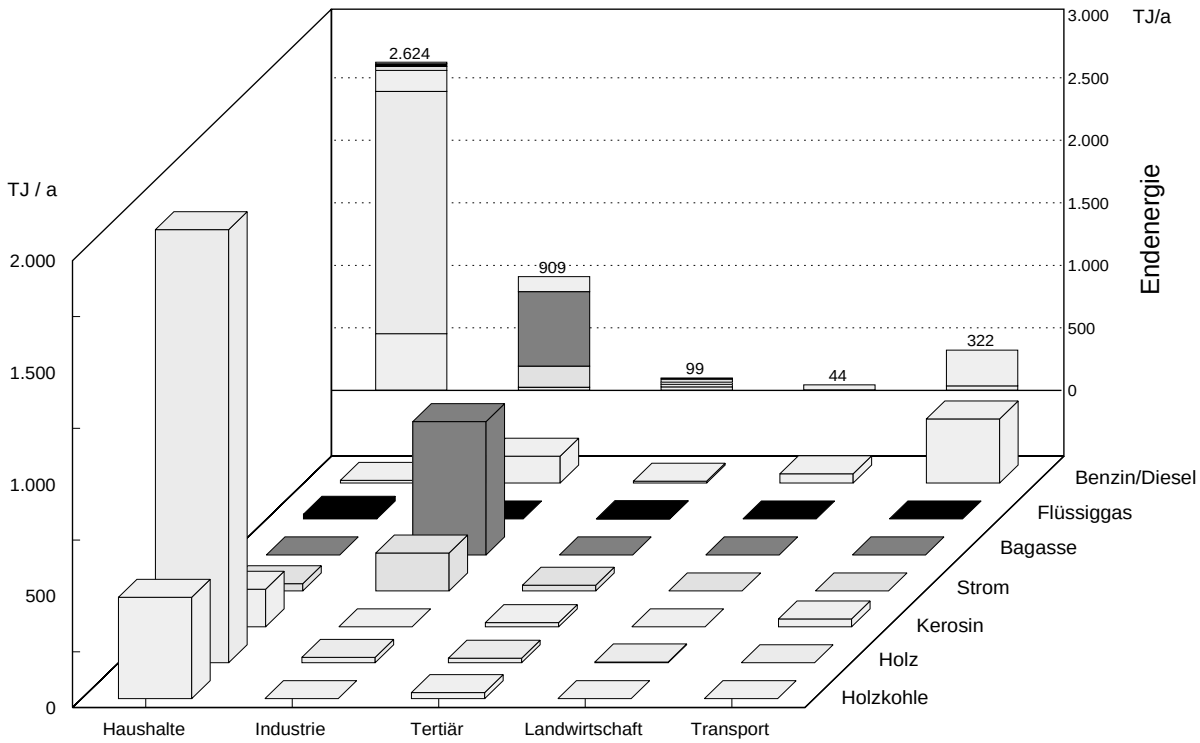


Abb. 5-1: Endenergiebilanz des Nordwesten Madagascars 1990 nach Sektoren

140 DM/Monat im Vergleich zu anderen Regionen Madagascars wohlhabender. Der Elektrifizierungsgrad ist mit 15% der Haushalte sehr niedrig. Eine zentrale Stromversorgung gibt es nur in den Städten. Die Landwirtschaft ist die wichtigste Einnahmequelle. Weitere Aktivitäten sind Kaffee-, Kakao-, Zucker- und Kokosnußplantagen, Viehzucht und Fischfang. Industrielle Aktivitäten sind neben der wichtigen Zuckerherstellung noch Nahrungsmittelverarbeitung, Holzverarbeitung, chemische Industrie und Maschinenbau hauptsächlich in Diego Suarez.

Die Endenergiebilanz für das Jahr 1990 ist in Abb. 5-1 dargestellt. Insgesamt werden in der Region knapp 4000 TJ pro Jahr verbraucht, das sind ca. 10,2 GJ pro Kopf. Im Vergleich dazu betrug der Endenergieverbrauch pro Kopf in der BRD 119 GJ /124/. Die Haushalte sind der größte Energieverbraucher mit einem Anteil von 65%, gefolgt von der Industrie (23%) und dem Transport (8%). Der Energieverbrauch des tertiären Sektors (3%) und der Landwirtschaft (1%) sind vernachlässigbar. 74% des Energieverbrauchs der Haushalte wird aus Holz gedeckt, 17% aus Holzkohle und 6% aus Kerosin. Der Stromanteil liegt bei 1%. Der Industriesektor verbraucht zu 66% Bagasse (landwirtschaftliches Abfallprodukt beim Zuckerrohranbau, das zur Erzeugung von Prozeßwärme bei der Zuckerherstellung verwendet wird), der Stromanteil beträgt 19%, gefolgt von Diesel (13%). Im Transportsektor werden hauptsächlich Mineralölprodukte (89%) und Kerosin (10%) für die Luftfahrt verbraucht.

Holz hat einen Anteil von 50% an der Endenergiebilanz, gefolgt von Bagasse (15%), Holzkohle (12%), Mineralölprodukte (12%) und Kerosin und Strom (jeweils 5%). Die Haushalte sind mit Abstand der größe Energieverbraucher, Holz die wichtigste Energiequelle. Holz bzw. die daraus erzeugte Holzkohle wird in den Haushalten in erster Linie zum Kochen genutzt, in den anderen Sektoren dient sie zur Erzeugung von Wärme.

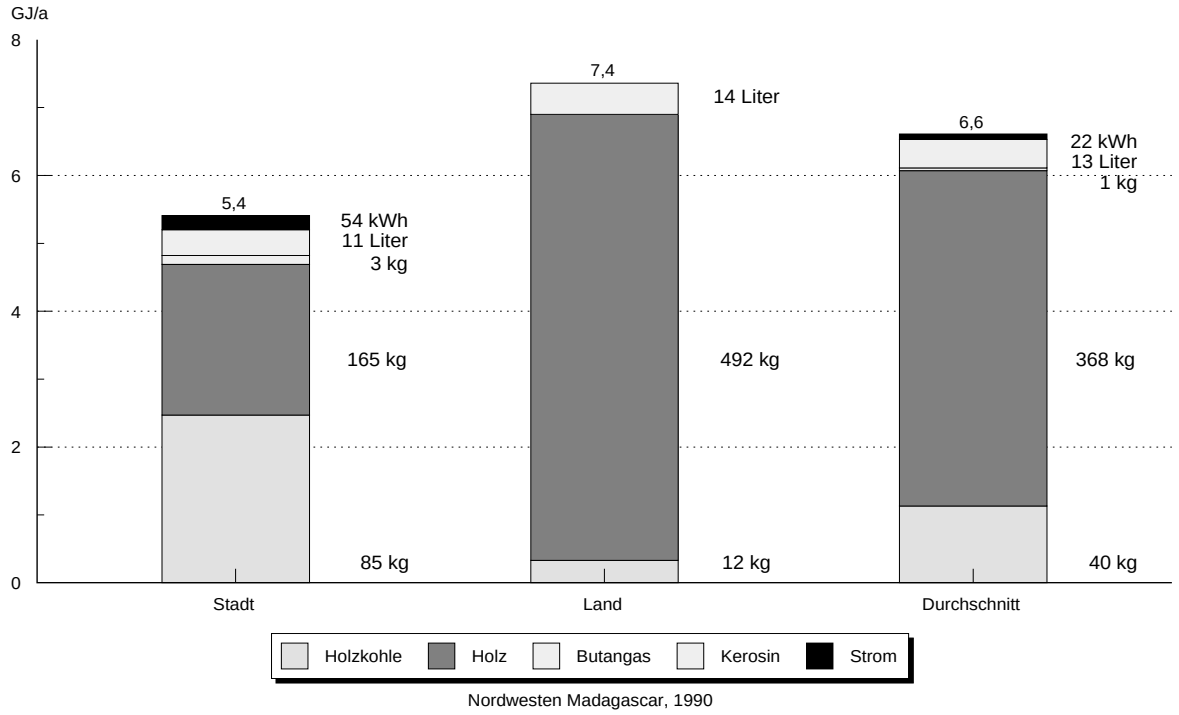


Abb. 5-2: Zusammensetzung des Pro-Kopf-Endenergieverbrauchs der Haushalte

Der jährliche Endenergieverbrauch eines Haushalts beträgt pro Kopf in der Stadt 5,4 GJ und im ländlichen Bereich 7,4 GJ. In ländlichen Haushalten wird fast ausschließlich Brennholz, in der Stadt zu einem großen Teil Holzkohle eingesetzt. Abb. 5-2 zeigt die Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs in den Haushalten. Der geringere Verbrauch der städtischen Haushalte deutet aber nur scheinbar auf einen rationelleren Umgang mit Energie hin. Er rührt daher, daß Holzkohleherde mit 25% einen besseren energetischen Wirkungsgrad haben als die für Brennholz eingesetzten Drei-Steine-Herde (12%). Der Systemvergleich der beiden Versorgungsketten in Abb. 5-3 bestätigt, daß zur Erzeugung von 1 GJ Nutzenergie mit Holz auf der Endenergieebene doppelt soviel Energie nötig ist. Berücksichtigt man jedoch den schlechten energetischen Wirkungsgrad der Holzkohleerzeugung (17%), stellt man fest, daß auf der Ebene der Primärenergie dreimal mehr Holz nötig ist, wenn man mit Holzkohle kocht anstatt das Holz direkt im Drei-Steine-Herd zu verbrennen. Obwohl Kochen mit Holzkohle sehr ineffizient ist, ist Holzkohle in den Städten der bevorzugte Energieträger. Das liegt daran, daß Holzkohle im Vergleich zu Holz leichter zu handhaben ist und eine geringere Rauchentwicklung hat. Außerdem nimmt Holzkohle aufgrund der höheren Energiedichte ein geringeres Volumen als Holz ein und läßt sich daher billiger transportieren. Die Analyse des Nutzenergiebedarfs zeigt wie erwartet, daß der Unterschied zwischen Stadt und Land verschwimmt. Man ermittelt in den städtischen Haushalten einen Nutzenergiebedarf pro Kopf von 1 GJ, während er in ländlichen Haushalten 0,9 GJ beträgt.

Der hohe Brennholzverbrauch, der eine starke Belastung für das regionale Ökosystem darstellt, beruht zu einem großen Teil auf einer enormen Energieverschwendung. Abb. 5-4 zeigt, daß die städtischen Bewohner mehr Holzenergie zum Kochen benötigen als die zahlrei-

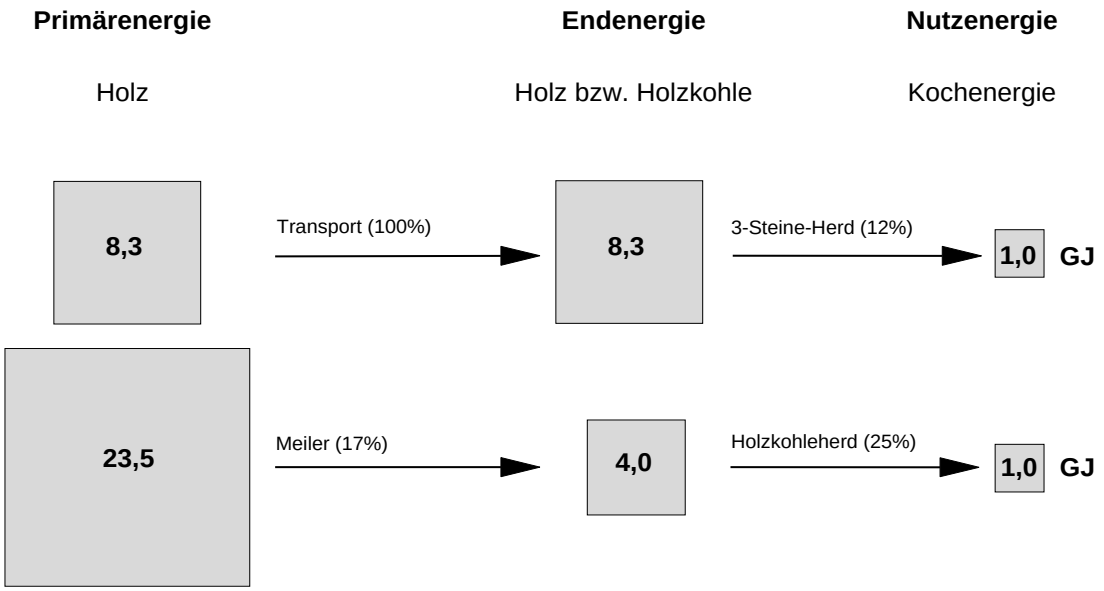


Abb. 5-3: Systemvergleich Technikkette Holz / Holzkohle zum Kochen

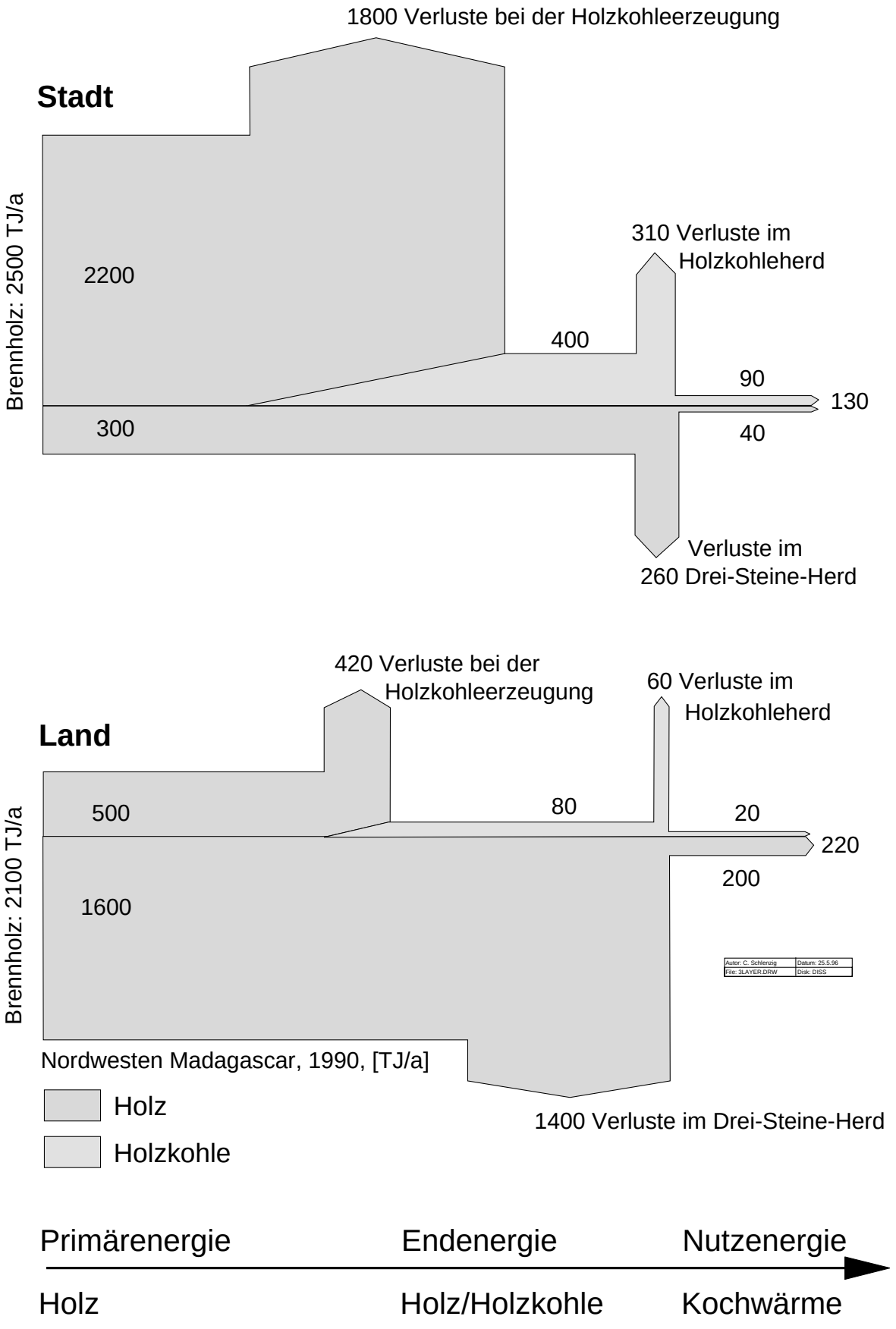


Abb. 5-4: Energiebilanz "Kochen" der städtischen und ländlichen Haushalte

cheren ländlichen Bewohner. Die jährlichen Verluste bei der Holzkohleerzeugung summieren sich auf 2200 TJ, die Verluste in den Herden betragen noch einmal 2000 TJ. Dies entspricht mehr als dem gesamten Endenergieverbrauch der Region (4000 TJ). Die Verluste verteilen sich dabei nicht proportional zur Bevölkerung. Während in der Stadt 150.000 Einwohner 2300 TJ Verluste beim Kochen erzeugen, sind es auf dem Land nur 1900 TJ bei 240.000 Einwohnern.

5.2 Problemstellung

Der Anteil von Brennholz und Holzkohle an der Endenergiebilanz ist mit 62% sehr hoch. Wegen des schlechten Wirkungsgrades bei der Holzkohleerzeugung beträgt der Holzanteil sogar 70% an der Primärenergiebilanz. Dieses Holz wird fast ausschließlich von den Haushalten zum Kochen verbraucht. Auch die Holzkohle wird vorwiegend in den Städten verbraucht. Holzkohle wird in erster Linie unerlaubt aus natürlichen, unter Naturschutz stehenden Wäldern rund um die Stadt Diego Suarez gewonnen, da es keine Holzplantagen für die Holzkohleerzeugung gibt. Die hohe Brennholz- und Holzkohlenachfrage hat heute bereits zu einer Übernutzung der umliegenden Holzressourcen geführt, so daß diese natürlichen Wälder inzwischen vom Verschwinden bedroht sind. Der Einzugsbereich für die Holzversorgung weitet sich ständig aus. Aufgrund der hohen Holznachfrage, der starken Abholzung und zusätzlicher Buschfeuer lassen sich rund um Diego Suarez schon starke Erosionsschäden feststellen. In einigen Bereichen wird bereits die landwirtschaftliche Nutzung des Bodens und die Viehzucht beeinträchtigt, da der Wasserspiegel sich abgesenkt hat. Auch die Sicherheit der Versorgung der Region mit Energie ist dadurch gefährdet, denn wenn die umliegenden Regionen in der Regenzeit schwerer zu erreichen sind, gibt es heute schon Engpässe bei der Holzversorgung. Der Preis für Holz und Holzkohle, der sowieso schon relativ hoch ist, steigt dann weiter an. Weitere Energieversorgungsprobleme, auf die hier jedoch nicht eingegangen wird, bestehen bei der Stromversorgung und der Versorgung mit Mineralölprodukten.

5.3 Zielsetzung der Fallstudie

Auf nationaler Ebene wurden in Madagascar im Rahmen eines von der Weltbank geförderten Masterplans /125/ die folgenden Ziele für die Energie- und Umweltpolitik festgesetzt:

- Erreichung einer wirtschaftlichen Energieversorgung,
- Sicherstellung der Deckung des zukünftigen Energiebedarfs,
- Förderung der wirtschaftlichen Entwicklung,
- Erhöhung der Versorgungssicherheit bei der Strom- und Mineralölversorgung,
- Reduzierung der Importbelastungen und der Importabhängigkeit des Landes,
- Reduzierung der Umweltbelastungen.

Allgemeine Ziele aller Sonderenergieprogramme der GTZ sind

- durch gezielten Ausbau der Energieversorgung neue wirtschaftliche Aktivitäten zu ermöglichen,
- regenerative Energiequellen zu fördern (Kleinwasserkraft, Photovoltaik, Windenergie),
- Energieeinsparpotentiale aufzuzeigen und zu nutzen und
- moderne Energiedienstleistungen einer größeren Bevölkerungsschicht zugänglich zu machen, um den materiellen Lebensstandard zu heben.

Aufgabe des GTZ-Projekts war es, die nationalen Zielsetzungen durch konkrete Maßnahmen in der Region umzusetzen. Das regionale Energieversorgungskonzept sollte untersuchen,

- wie sich die Energieversorgung in der Region sicherstellen läßt,
- wie sich der Druck auf die bestehenden Holzressourcen reduzieren läßt, um die natürlichen Wälder in der Projektregion zu schützen und
- wie ländliche Elektrifizierung den Lebensstandard der Bevölkerung erhöhen kann.

Zur Beurteilung der regionalen Situation wurden verschiedenen Studien durchgeführt:

- Studien zur Ermittlung des verfügbaren Potentials an erneuerbaren Ressourcen,
- Bestimmung des verfügbaren Bestands an Holz- und Biomasseressourcen,
- Energiebedarfsanalysen für die verschiedenen Wirtschaftssektoren, insbesonders eine repräsentative Befragung bei 3000 Haushalten,
- Analysen des Stromerzeugungssystems und der Versorgung mit Mineralölprodukten,
- Analyse der Schadstoffemissionen des Energiesystems.

Im folgenden werden nur noch die Aspekte der Brennholzversorgung und die sich darauf beziehenden Fragestellungen behandelt.

5.4 Modellierung des Energiesystems

Um die Entwicklung des Energiesystems für verschiedene Szenarien quantifizieren zu können und um die Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen besser vergleichen zu können, werden Modellrechnungen für das Energiesystem der untersuchten Region durchgeführt. Tabelle 5-1 zeigt die gewählten Rahmenbedingungen der Modellierung. Die Modellierungsperiode beginnt mit dem Basisjahr 1990 und reicht in Fünfjahresschritten bis in das Jahr 2010. Die untersuchte Region wird in vier Subregionen eingeteilt, die sich an den administrativen Grenzen der Distrikte orientieren, wobei zusätzlich nach ländlichem und städtischem Bereich unterschieden wird. Für die sektorale Untergliederung werden sechs Wirtschaftssektoren unterschieden, die noch in Subsektoren unterteilt sind: Haushalte, Industrie, tertiärer Sektor (Dienstleistungen), Landwirtschaft, informelle Industrie und Transportsektor.

Bei der Gestaltung des RES zur Abbildung des Energiesystems wurde besonderer Wert auf die Darstellung der Haushalte und hier insbesonders auf die Kochwärmeerzeugung gelegt. Abb. 5-5 zeigt den Ausschnitt des RES, der die Umwandlungskette von der Ressource Wald bis zur Nutzenergie Kochwärme darstellt und die Struktur des Haushaltssektors für die Energiebedarfsanalyse zeigt. In der Umfrage bei 3000 Haushalten wurde festgestellt, daß der Nutzenergiebedarf signifikant mit dem Haustyp korreliert werden kann. Deshalb werden drei Haustypen unterschieden: traditionelle Häuser, Häuser aus Wellblech und moderne Häuser. Als Endbenutzertechnologien gibt es in Abb. 5-5 neben den traditionellen Herden für Holz und Holzkohle noch Modelle mit verbessertem Wirkungsgrad (durch ein '+' gekennzeichnet) sowie Kerosin-, Butangas- und elektrische Herde. In jeder der vier Regionen kann jeder der drei Haustypen in Stadt und Land unterschiedliche Bedarfsintensitäten und seinen eigenen Technologiemix besitzen. Auf der Ebene der Holzkohleerzeugung kann der traditionelle Erd-

Tabelle 5-1: Zeitliche, räumliche und sektorale Strukturierung der Analyse

Modellierungsperiode:	1990, 1995, 2000, 2005, 2010	
Regionale Aggregation:	*Region*	*Milieu*
	Diego Suarez	städtisch
	Antsiranana II	städtisch, ländlich
	Ambanja	städtisch, ländlich
	Ambilobe	städtisch, ländlich
Sektorale Aggregation:	*Sektor*	*Subsektor*
	Haushalte	Haustyp: modern, Blechdach, traditionell
	Inform.Industrie	Schwerpunkt Wärme, Schwerpunkt Kraft
	Industrie	Zucker, Agro-Industrie, Andere, Öffentliche Bauten
	Tertiärer Sektor	-
	Landwirtschaft	Ackerbau, Viehzucht + Fischfang
	Transport	Personen, Fracht, Luft, Schiff

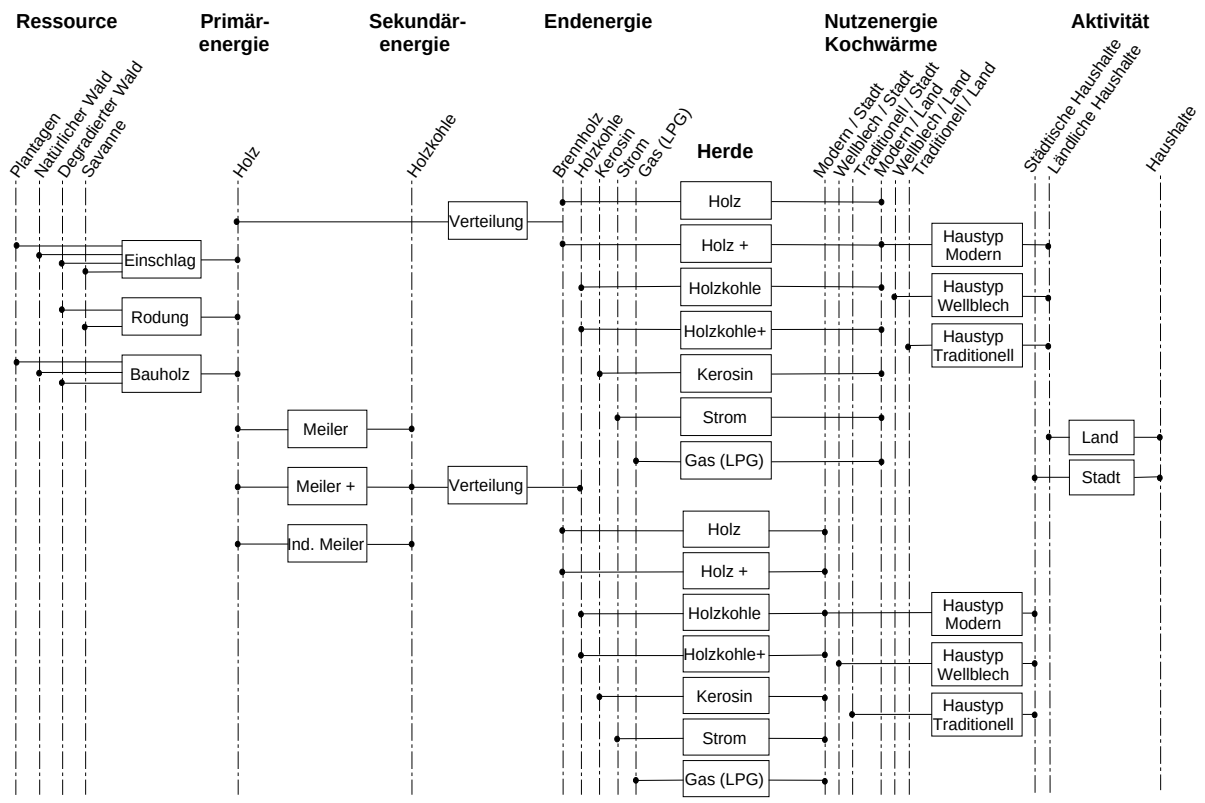


Abb. 5-5: Referenzenergiesystem für die Erzeugung von Kochwärme

meiler mit einem sehr schlechten energetischen Wirkungsgrad (17%) durch einen verbesserten Erdmeiler (WG = 22%) oder einen industriellen Meiler (WG = 30%) substituiert werden.

Als Ressource für Brennholz werden im Untersuchungsgebiet vier Quellen unterschieden: natürliche Wälder, Sekundärwälder, Savanne und als zukünftige Option Brennholzplantagen. Natürliche Wälder bestehen aus intaktem Primärwald, in den der Mensch nur wenig eingegriffen hat. Die Gewinnung von Edelhölzern und Bauholz sowie landwirtschaftliche Aktivitäten im Wald führen zu einer Degeneration dieser natürlichen Wälder, der Primärwald wird sogenannter Sekundärwald. Der nächste Schritt, der letztendlich zum Verschwinden der Wälder beiträgt, ist die Rodung, bei der der Sekundärwald in reine landwirtschaftliche Nutzfläche umgewandelt wird. Wenn die dünne Humusschicht nicht mehr den gewünschten Ertrag liefert und der Ackerbau aufgegeben wird, wird aus den gerodeten Flächen Savanne. In der Savanne finden sich nur noch vereinzelte Bäume und Buschwerk. Holzplantagen dagegen sind künstlich angelegte Wälder zur Gewinnung von Bauholz und Brennholz zur Holzkohleerzeugung. In der Regel werden schnell wachsende Baumarten angepflanzt, wie z. B. der Eukalyptus, der schon nach 7 Jahren geerntet werden kann.

5.5 Szenarien

Drei Szenarien werden definiert: das Referenzszenario, das unveränderte Trends für die Zukunft annimmt, das Wachstumsszenario, das eine optimistische wirtschaftliche Entwicklung voraussieht, und das Stagnationsszenario, das von einer Verlangsamung des Wirtschaftswachstums ausgeht. Die wichtigsten Szenarioparameter sind die Bevölkerungsentwicklung und die Aktivitäten in den einzelnen Wirtschaftssektoren. Die Wachstumsrate der Bevölkerung wurde mit Hilfe eines demographischen Modells berechnet /126/. Sie sinkt im Referenzszenario von 3,5% im Jahr 1990 auf 2,8% im Jahr 2010. Fast die Hälfte der Bevölkerung wird dann in Städten leben. Sowohl im optimistischen wie auch im Stagnationsszenario sinkt diese Rate im Jahr 2010 jedoch nur auf 3,2% bzw. 3,4%. Wirtschaftliche Stagnation führt durch eine starke Verstädterung mit hohen städtischen Bevölkerungswachstumsraten zu einem höheren Bevölkerungswachstum als im Referenzfall während die optimistische Entwicklung durch ein Absenken der Sterberate im ländlichen Milieu (bevor auch die Geburtenrate zu sinken beginnt) kurzfristig auch zu einem stärkeren Wachstum führt. Insgesamt läßt sich jedoch feststellen, daß die absolute Zahl der Einwohner (1990: 390.000) im Jahr 2010 für die verschiedenen Szenarien mit 700.000 - 750.000 nur wenig differiert.

In den Städten werden im Jahr 2010 Bevölkerungsdichten wie in europäischen Großstädten registriert. Die Haushaltsgröße beträgt in den Städten heute 4,5 Personen. Sie steigt bis zum Jahr 2010 im Stagnationsszenario auf 4,9, bleibt im Referenzszenario konstant und sinkt im optimistischen Szenario auf 4,1. Im ländlichen Bereich verändert sie sich nicht und bleibt mit 4 Personen in allen Szenarien auf dem Stand von 1990.

Die Anteile der Haustypen verändern sich im Referenzszenario nicht. Der Anteil moderner Häuser auf dem Land, der 1990 23% beträgt, sinkt im Stagnationsszenario auf 17%, während er im optimistischen Szenario auf 33% ansteigt. In der Stadt sinkt der Anteil im Stagnationsszenario von heute 75% auf 65%, während er im optimistischen Szenario auf 82% ansteigt.

Leider stehen keine makroökonomische Daten über die wirtschaftliche Situation der Region zur Verfügung. Daher wird angenommen, daß die wirtschaftlichen Aktivitäten denselben Trends folgen wie im nationalen Bereich. Auf diese Weise kann auf die Ergebnisse des nationalen makroökonomischen Modells zurückgegriffen werden. Nur die Produktionszahlen der energieintensiven Zuckerindustrie wurden mit Hilfe einer Trendextrapolation ermittelt.

Die spezifischen Nutzenergiebedarfswerte der einzelnen Sektoren werden in den Szenarien nicht variiert, d. h. es wird kein Strukturwandel modelliert. Für den Haushaltssektor bedeutet dies, daß die Kochgewohnheiten sich nicht ändern. In den anderen Wirtschaftssektoren wird davon ausgegangen, daß sich das Dienstleistungsprofil nicht ändert. Die genauen Zahlen für die angenommen Hypothesen in den drei Szenarien sind im Anhang dokumentiert.

5.6 Untersuchte Maßnahmen und Strategien

Wie schon weiter oben erwähnt besteht im Bereich des Haushaltssektors ein großes Einsparpotential an Energie. Dies liegt in erster Linie an den schlechten Wirkungsgraden der in der Brennholzumwandlung eingesetzten Technologien. Um den Druck auf die natürlichen Holzressourcen zu reduzieren und die natürlichen Waldregionen in der Projektregion zu schützen, werden mehrere Strategien untersucht:

- Einführung verbesserter Herde für Holz und Holzkohle zur Energieeinsparung
- Substitution von Holzherden durch Gasherde (Butangas)
- Einführung von verbesserten traditionellen und industriellen Holzkohlemeilern
- Aufforstung von Brennholzplantagen

In der sogenannten Strategietabelle (Tabelle 5-2) wird festgelegt, wie stark die einzelnen Strategien implementiert werden. Die Strategie "Energieeinsparung" führt dazu, daß der Marktanteil der verbesserten Technologien im Jahr 2010 auf 80% steigt. Die Strategie "Substitution" besagt, daß sich der Marktanteil von Kerosin, Gas und Strom zum Kochen bis zum Jahr 2010 verdreifacht. Die Strategie "Verbesserte Holzkohlemeiler" besteht aus zwei Stufen. In der ersten Stufe werden alle traditionellen Meiler durch verbesserte Meiler ersetzt. In der zweiten Stufe werden zusätzlich 50% der Meiler durch industrielle Anlagen ersetzt. Die letzte Strategie "Aufforstung" wird in den verschiedenen Regionen unterschiedlich stark implementiert. Während in Antsiranana die Anstrengung der Wiederaufforstung im Vergleich zu heute verfünffacht wird, werden Brennholzplantagen in Ambilobe und Ambanja erst eingeführt.

Tabelle 5-2: Strategietabelle für die Modellierung der Maßnahmen

Strategie	**Maßnahme / Strategieparameter**	**1990**	**2010**
Maximale Energieeinsparung	Verbesserter Holzherd / Marktanteil	0%	80%
	Verbesserter Holzkohleherd / Marktanteil	0%	80%
Substitution von Holzkohle beim Kochen	Kerosinherd / Marktanteil	0,4%	1,2%
	Butangasherd / Marktanteil	0,9%	2,7%
	Elektrischer Herd / Marktanteil	0,1%	0,3%
Verbesserte Meiler	Verbesserte traditionelle Meiler / Marktanteil	0%	100%
Industrielle Meiler	Verbesserte traditionelle Meiler / Marktanteil	0%	50%
	Industrielle Meiler / Marktanteil	0%	50%
Aufforstung von Brennholzplantagen	Antsiranana / Aufgeforstete Fläche (ha/a)	119	500
	Ambilobe / Aufgeforstete Fläche (ha/a)	36	400
	Ambanja / Aufgeforstete Fläche (ha/a)	0	300

5.7 Analysemethode

Um die Auswirkungen der verschiedenen Strategien quantifizieren zu können, wird das gesamte Energiesystem für die vorgegebenen Szenarien simuliert. Zur Analyse des Energiebedarfs wird der "end-use"-Ansatz verwendet, der auf einer Trendextrapolation der Aktivitäten der einzelnen Subsektoren aufbaut. Mit Hilfe sektorspezifischer Intensitäten wird der Nutzenergiebedarf ermittelt. Der Mix der vom Endbenutzer eingesetzten Technologien und ihre energetischen Wirkungsgrade bestimmen die Endenergienachfrage der Region. Die Marktanteile und Wirkungsgrade der Umwandlungstechnologien bestimmen, wieviel Primärenergieressourcen verbraucht werden. Das gesamte Energiesystem der Region wird mit einem RES modelliert. Um die verschiedenen Szenarien und Strategien zu berechnen, werden für die Systemparameter des Gleichungssystems unterschiedliche Hypothesen angenommen und in mehreren Rechenläufen kombiniert. Während sich Szenarien hauptsächlich auf die Aktivitäten im RES auswirken, verändern Strategien insbesonders die Marktanteile konkurrierender Technologien. Die Simulation ermittelt alle Flüsse im RES. Eine Aggregation dieser Ergebnisse erlaubt es dann, die Energiebilanz für die Region aufzustellen, und die Auswirkungen der einzelnen Strategien zu vergleichen.

5.8 Datenerhebung und Aufbau eines Informationssystem

Obwohl der Energieverbrauch der Haushalte den größten Anteil an der Endenergiebilanz hat, sind in Entwicklungsländern nur wenig Informationen über die Anzahl der Haushalte und deren Energieverbrauchsmuster verfügbar. Um also eine solide Datenbasis für die notwendigen Modellrechnungen zu schaffen, wurde 1990 eine detaillierte Umfrage bei 3000 Haushalten durchgeführt. Gefragt wurde nach der Zusammensetzung des Haushalts, Ausbildung der Familienmitglieder, Berufe, Einkommen, Ausstattung mit Geräten und Energieverbrauchsverhalten. Auch in den anderen Wirtschaftssektoren wurden Umfragen zum Energieverbrauch durchgeführt, jedoch mit einem geringeren Stichprobenumfang. Die Herstellung der Holzkohle in der Region wurde ebenfalls untersucht. Die Daten der Umfrage bildeten die Grundlage für die Erstellung der Energiebilanz. Aus den Umfragedaten wurden auch die Marktanteile und die spezifischen Bedarfsintensitäten für das Basisjahr der Modellierung ermittelt.

5.9 Ergebnisse der Modellrechnung

Das Energiesystem wurde für die drei definierten Szenarien zuerst ohne Berücksichtigung der einzelnen Strategien berechnet, um die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs ohne Eingriffe seitens der Entscheidungsträger zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in Abb. 5-6 zusammengefaßt und dienen als Meßlatte für die Bewertung der Lösungsstrategien. In der oberen Grafik ist die Endenergienachfrage nach Energieträgern aufgeschlüsselt, wahrend in der unteren Grafik die Anteile der einzelnen Sektoren dargestellt sind. Im Referenzszenario

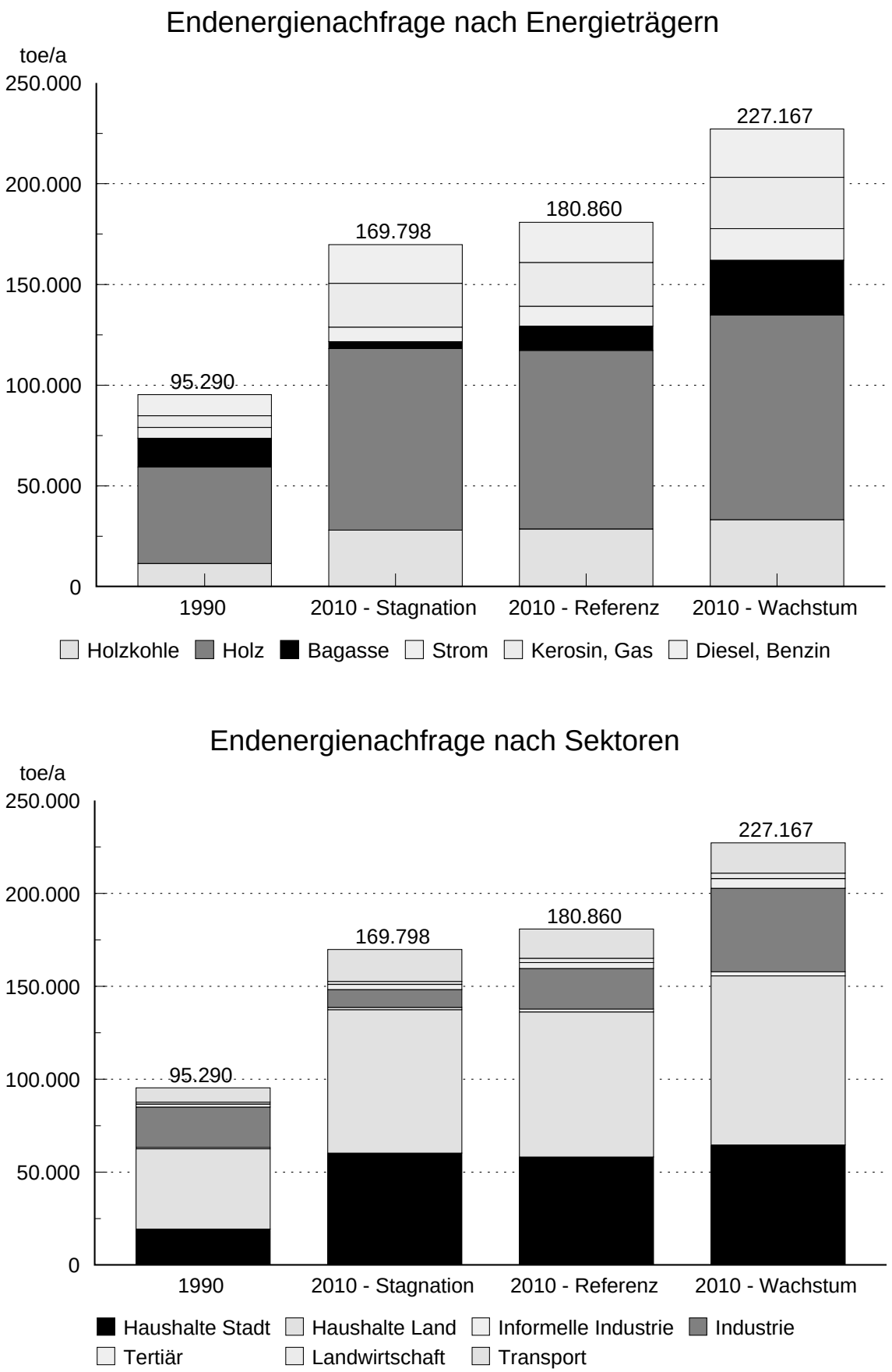
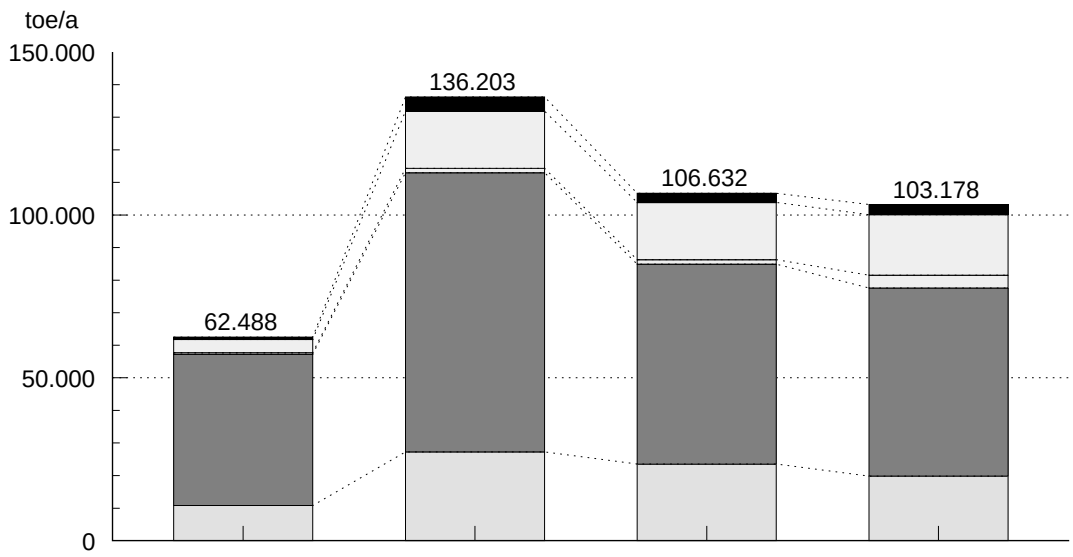


Abb. 5-6: Entwicklung der Endenergienachfrage für verschiedene Szenarien

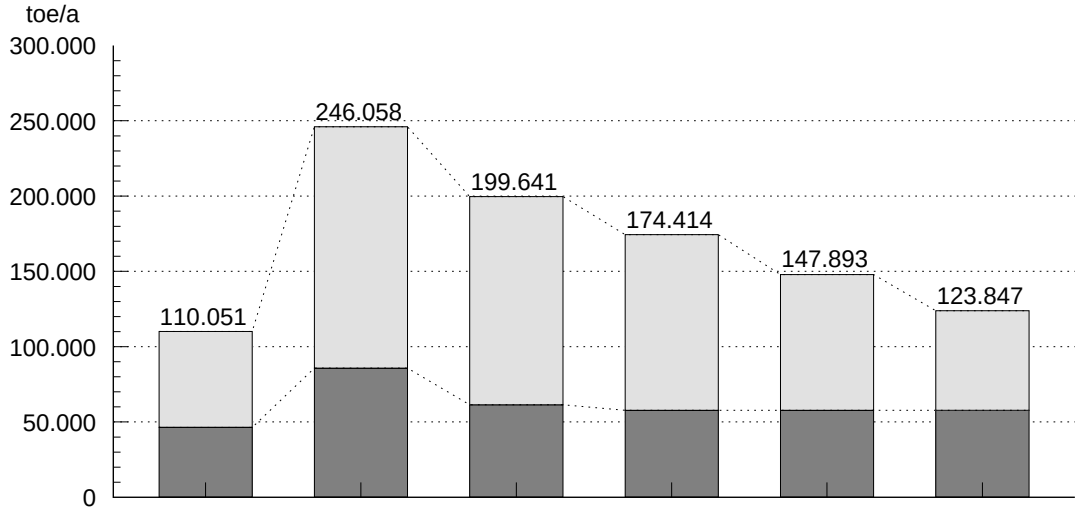


Strategie	1990	2010 Ref.szenario	Energieeinsparung	+ Substitution
Holzkohle	10.820	27.267	23.506	19.838
Holz	46.404	85.664	61.370	57.720
Butangas	506	1.365	1.365	3.937
Kerosin	4.010	17.551	17.551	18.571
Strom	748	4.356	2.840	3.112

Abb. 5-7: Auswirkung der Strategien auf die Endenergienachfrage der Haushalte

verdoppelt sich die Endenergienachfrage bis zum Jahr 2010. Im Stagnationsszenario liegt die Nachfrage nur geringfügig darunter, während im Wachstumsszenario die Nachfrage deutlich höher ist. Trotzdem sind in diesem Szenario der Anteil von Holz und Holzkohle ähnlich. Unterschiede lassen sich nur bei den Anteilen von Bagasse, Strom und Mineralölprodukten feststellen. Untersucht man die sektorale Verteilung, stellt man fest, daß die Anteile der Haushalte proportional zur Bevölkerung nur geringfügig zwischen den Szenarien schwanken. Ein großer Unterschied in der Endenergienachfrage besteht nur für den Industriesektor.

Wie entwickelt sich der Energiesektor und die Endenergiebilanz, wenn die oben beschriebenen Strategien umgesetzt werden? Die Auswirkungen der ersten zwei Strategien auf die Endenergienachfrage der Haushalte sind in Abb. 5-7 für das Referenzszenario dargestellt. Man erkennt, daß die Endenergienachfrage der Haushalte durch den massiven Einsatz verbesserter Herde um ca. 22 % gesenkt werden kann. Die zusätzlich zur Strategie "Energieeinsparung" durchgeführte Strategie "Substitution" hat dagegen nur geringfügige Auswirkungen auf die Endenergienachfrage, denn die Verdreifachung der Marktanteile macht sich wegen der sehr geringen Startwerte nur schwach bemerkbar. Allerdings steigert sich der Butangasverbrauch der Haushalte um den Faktor drei. Kerosin- und Stromverbrauch werden kaum beeinflußt, da beide Energieträger bisher hauptsächlich zur Beleuchtung und nicht zum Kochen eingesetzt wurden. Der für die Erreichung der Zielsetzung besonders interessante Verbrauch an Holz und Holzkohle wird durch die Strategie "Einsparung" um 22% gesenkt, während die Strategie "Substitution" weitere 6% bringt.

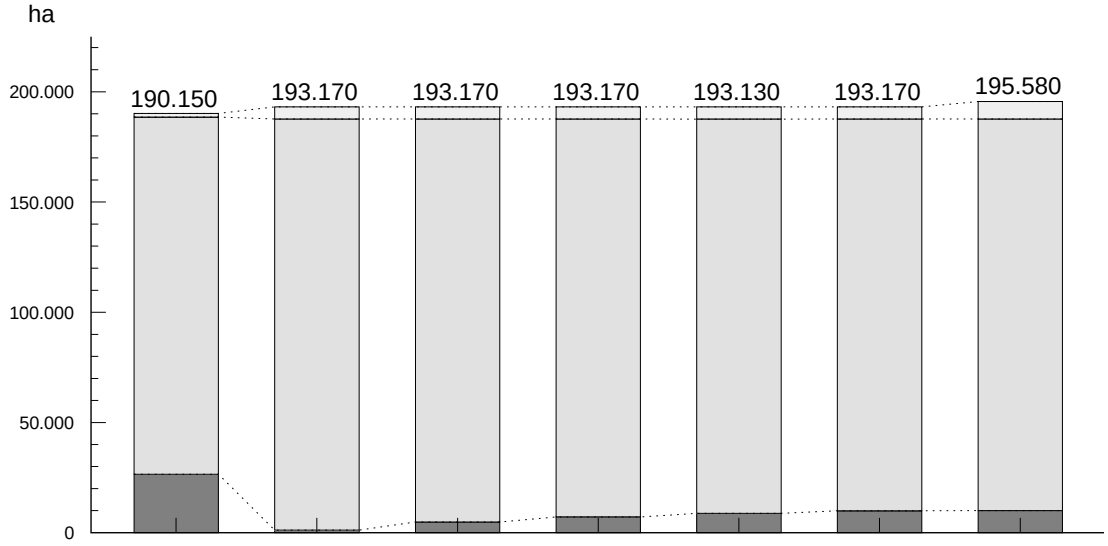


Strategie	1990	Ref. Szenario	Einsparung	+ Substitution	Verb. Meiler	Industrie
Brennholz	46.404	85.664	61.370	57.720	57.720	57.720
Holzkohle	63.647	160.394	138.271	116.694	90.173	66.127

Abb. 5-8: Auswirkung der Strategien auf den Holzprimärenergieverbrauch

Um die Auswirkungen der Strategie "Verbesserte Meiler" untersuchen zu können, muß der Primärenergieverbrauch an Holz ermittelt werden. Abb. 5-8 zeigt den Holzprimärenergieverbrauch der Haushalte für das Referenzszenario. Dabei werden zwei Anteile unterschieden: Holz zum Kochen und Holz zur Holzkohleerzeugung. Man sieht, daß der Anteil der Holzkohleerzeugung im Jahr 2010 ohne zusätzliche Maßnahmen im Referenzszenario 65% des Holzverbrauchs ausmacht. In Abb. 5-8 sieht man auch, daß die Strategie "Einsparung" den Holzverbrauch um 19% reduziert, insbesonders beim Holz, das direkt als Brennholz genutzt wird. Die Kombination der beiden Strategien "Einsparung" und "Substitution" macht sich auf der Primärenergieseite stärker bemerkbar als auf der Endenergieebene, nämlich mit zusätzlichen 10% Einsparung, da die Strategie "Substitution" hauptsächlich Holzkohle ersetzt. Der Einsatz von verbesserten Meilern bringt weitere 10% Holzeinsparung während der Umstieg auf industrielle Meiler das Einsparungsergebnis um weitere 10% auf 50% erhöht. Dieses bemerkenswerte Ergebnis zeigt also, daß durch den kombinierten Einsatz verbesserter Technolgien auf allen Umwandlungsebenen sich der Holzbedarf im Jahr 2010 fast auf den heutigen Stand einfrieren läßt.

In einem letzten Modellierungsschritt wird nun der Effekt der Strategien auf den Waldbestand der Region untersucht. Das erste Ergebnis dieser Berechnungen zeigt, daß die Holzressourcen in der Region ausreichen, um den Bedarf zu decken. Allerdings wird der Bestand an Primärwald deutlich reduziert, wie in Abb. 5-9 dargestellt. Dieser Effekt ist besonders drastisch in der Region um Diego Suarez. Hier wird der schon dezimierte natürliche Primärwald fast vollständig verschwinden. Starke Importe von Holzkohle aus den angrenzenden Regionen



Strategie	1990	2010 Referenz	Einsparung	+ Substitution	+ Verb. Meiler	+ Ind.meiler	+ Aufforstung
Primärwald	26.470	1.160	4.830	7.180	8.770	9.910	10.030
Sekundärwald	162.000	186.490	182.820	180.470	178.840	177.740	177.630
Plantage	1.680	5.520	5.520	5.520	5.520	5.520	7.920

Abb. 5-9: Auswirkung der Strategien auf den Holzbestand im Jahr 2010

sind die Folge, so daß eine ähnliche Entwicklung mit einer gewissen Zeitverzögerung auch dort zu erwarten ist. Abb. 5-9 zeigt außerdem die Auswirkungen der Strategien auf den Waldbestand. Man sieht, daß das bisher besprochene Maßnahmenbündel den Rückgang des Primärwaldes nicht verhindern, dafür aber erfolgreich bremsen kann. Die Aufforstungsmaßnahmen dagegen haben eine kaum meßbare Wirkung. Dies liegt daran, daß das Holz aus Plantagen erst nach frühestens 7 Jahren geerntet werden kann und erst sehr spät einen Beitrag zur Entlastung der Primärwälder leistet. Plantagen sind daher eher als Maßnahmen zur langfristigen Stabilisierung des Holzangebotes geeignet.

5.10 Bewertung und Maßnahmenkatalog

Um das Verschwinden der Primärwälder rund um Diego Suarez zu verhindern, reicht eine einzelne Strategie alleine nicht aus. Selbst das Eingreifen in das Energiesystem auf allen Umwandlungsebenen kann die Entwicklung nicht aufhalten sondern nur verlangsamen. Maßnahmen, die schnell wirksam werden, sind dabei die Einführung verbesserter Technologien für Herde und für die Holzkohleherstellung. Im Bereich der Substitution von Holzkohle durch Kerosin, Butangas und Strom könnten durch eine Verstärkung der Anstrengungen noch höhere Marktanteile erreicht werden. Denkbar wäre z. B. die Subventionierung des Butangaspreises. Brennholzplantagen dagegen sind nicht nur teuer, sondern entlasten die Brennholzsituation auch nur langfristig. Ihre Wirkung ist in dem beobachteten Zeitraum von 20 Jahren kaum spürbar.

In Madagascar wurde deshalb im Bereich der Versorgung mit auf Brennholz basierenden Energieträgern der folgende Maßnahmenplan beschlossen:

Nachfrageseitige Maßnahmen

- Einführung und Verbreitung verbesserter Herde für Holz und Holzkohle
- Einführung und Verbreitung "moderner" Energieträger zum Kochen, wie Kerosin, Butangas und Strom

Angebotsseitige Maßnahmen

- Einführung und Verbreitung verbesserter traditioneller Erdmeiler
- Schulung der Köhler zur Verbesserung der Verkohlungstechniken
- Anlage von Brennholzplantagen
- Aufforstung und nachhaltige Nutzung dörflicher Forste
- Erosionsschutz durch Aufforstung von gefährdeten Regionen
- Einführung und Verbreitung von Agroforstwirtschaft

Institutionelle Maßnahmen

- für Wiederaufforstungsmaßnahmen
  - Sicherstellung der Besitzrechte für Wiederaufforstungen
  - Aufbau eines Katasters für Grundstücke
  - Einführung langfristiger Pachtverträge für Brennholzplantagen
- für die Forstverwaltung
  - Kontrolle und Einschränkung der illegalen Holzeinschläge
  - Delegation der Verantwortung für die Staatsforste an die Dorfgemeinschaften
- für die Planung
  - Erstellung einer Waldinventur
  - Stärkung der Institutitionen zur Koordinierung aller Aktivitäten in der Brennholzkette
  - Errichtung eines Informationssystems für den Holzsektor

5.11 Durchführung und Monitoring

Konkrete Maßnahmen zur Realisierung der einzelnen Strategien müssen von den lokalen Behörden in Zusammenarbeit mit den "Non Governmental Organizations" (NGO’s), den Banken, den Handwerkern und Händlern durchgeführt werden. Die GTZ als Entwicklungshilfeorganisation kann nur beratend eingreifen und ihre Unterstützung anbieten, um z. B. für jede Strategie ein Realisierungskonzept mit Teilaufgaben und Verantwortlichen zu erstellen. Gleichzeitig sollte aber die durchgeführte Planung so vor Ort verankert werden, daß sie jederzeit mit aktualisierten Daten wiederholt werden kann. Dies ist die einzige Möglichkeit, den Erfolg der Maßnahmen zu überprüfen und zu garantieren, daß rechtzeitig auf veränderte Rahmenbedingungen und unerwartete Entwicklungen reagiert werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Unterstützung von strategischen Entscheidungen in Energiewirtschaft und Energiepolitik werden heute Planungsinstrumente mit leistungsfähigen Informationssystemen, einfach zu bedienenden Dialogkomponenten und tragfähigen, validierten Analyseverfahren benötigt. Ziel dieser Arbeit war es daher, den heutigen Stand der Planungsinstrumente zu erweitern und ein Decision Support System zu entwickeln, das aufbauend auf der validierten Technik der Energiesystemmodellierung mehr Transparenz bei der Informationsverwaltung, bessere Fähigkeiten zur Entscheidungsunterstützung und mehr Benutzerfreundlichkeit bietet.

Das neu entwickelte und in dieser Arbeit vorgestellte Planungsinstrument *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* basiert auf einem systemtheoretischen Ansatz, der Energiesysteme technologieorientiert nach dem "accounting" Prinzip simuliert und Energiebilanzen, Emissionsbilanzen und Kostenbilanzen erstellen kann. *PlaNet* kann daher für eine Vielzahl von Maßnahmen die Auswirkungen auf Energieverbrauch, Kosten und Schadstoffemissionen ermitteln. Beispiele für solche Strategien sind die Brennstoffsubstitution (Ausstieg aus dem Jahrhundertvertrag für Steinkohle), die Einführung neuer Technologien (Wind, Photovoltaik), der Ausstieg aus Technologien (Kernenergie), die Durchführung von Maßnahmen zur rationellen Energieanwendung, die Einführung von Energie- und Schadstoffsteuern oder die Einführung von Luftreinhaltungsmaßnahmen (Entschwefelung, Entstickung). *PlaNet* ist auch geeignet, Sachbilanzen für die ganzheitliche Bilanzierung zu erstellen.

PlaNet kombiniert eine flexible und leistungsfähige Datenverwaltung mit bewährten wissenschaftlichen Methoden zur Simulation von Energiesystemen. Es besitzt eine modulare Architektur und bietet unter einer einheitlichen Bedienoberfläche zu jedem Schritt des strukturierten Planungsprozesses ein Modul an. Alle wesentlichen Informationen zu einer Fallstudie werden in der eigenständigen, als Informationssystem konzipierten Datenbank gespeichert und dokumentiert. Die moderne Datenverwaltung ist vollständig mit dem Simulationsmodell integriert. Über eine standardisierte Datenschnittstelle sind kommerzielle Softwarepakete wie Tabellenkalkulation und Textverarbeitung integriert. Bei der Generierung von Energiesystemmodellen ist *PlaNet* flexibel bezüglich der zeitlichen, örtlichen und sektoralen Auflösung und dem Detaillierungsgrad. Auf diese Weise lassen sich Modellierung und Analyse optimal an die untersuchten Fragestellungen, Zielsetzungen und die zur Verfügung stehenden Daten anpassen.

Die Module von *PlaNet* umfassen die fallstudienorientierte Datenbank *NetWork*, den *Navigator*, den *Analyst*, den *Case-Manager*, die Rechenmodule *PlaNet-Flow* und *PlaNet-Cost* und den *Evaluator*. Mit der Datenbank *NetWork* werden alle Daten und Informationen gespeichert, die bei der Durchführung einer Fallstudie anfallen. Während der *Navigator*

Dateneingabe, Zeitreihenverwaltung und Retrieval übernimmt, erlaubt der *Analyst* die Auswertung der Daten und Ergebnisse als Tabelle, Grafik oder Standardbericht sowie einfache statistische Analysen. Der *Case-Manager* unterstützt die Erstellung, Verwaltung und Dokumentation von Szenarien mit dem Konzept hierarchischer Entscheidungsbäume. Das Simulationsmodul *PlaNet-Flow* berechnet Energie- und Schadstoffbilanzen für beliebige Energiesysteme. *PlaNet-Cost* bestimmt danach die erforderlichen Kapazitäten der Umwandlungstechnologien und ermittelt durch eine volkswirtschaftliche Gesamtrechnung die über den gesamten Beobachtungszeitraum abdiskontierten Kosten des Energiesystems. Ein *Evaluator* ermöglicht die multikriterielle Bewertung der untersuchten Strategien. Die Erfolgskontrolle (Monitoring) wird dadurch unterstützt, daß die Datenbank als Informationssystem weitergeführt werden kann. Alle Module erlauben eine vollständige Dokumentation der in der Fallstudie durchgeführten Arbeiten. Dies umfaßt die Probleme, die Ziele, die Systembeschreibung, die untersuchten Maßnahmen, die Szenarien, alle Daten, die mathematische Modellbeschreibung, die Gestaltung der erstellten Cases, die Modellergebnisse, alle Analysereports und das Bewertungsschema.

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 auf jedem Pentium PC unter MS-Windows und auf allen Computernetzwerken multiuserfähig einsetzbar. Als relationale Datenbank kam die Microsoft Access Engine zum Einsatz.

Kernidee des Konzepts von *PlaNet* ist die Standardisierung der Datenschnittstelle für Energiesystemmodelle. Dies wird durch eine klare Trennung der Topologie des Energiesystems von der mathematischen Struktur des Modells erreicht. Die Datenbank orientiert sich ausschließlich an der Topologie des Energiesystems und nicht wie andere Datenbanken an der mathematischen Struktur des Modells. Sie übernimmt die komplette Datenverwaltung, während die Rechenmodule selber nur noch mathematische Algorithmen enthalten. Die Standardisierung der Datenschnittstelle hat für zukünftige Planungsinstrumente, die auf diesem Konzept aufbauen, drei Vorteile. Erstens wird der Datenaustausch zwischen verschiedenen Modulen vereinfacht, wodurch die Koppelung verschiedener Methoden ermöglicht wird. Zweitens wird der Austausch von Daten zwischen Fallstudien erleichtert, auch dann, wenn unterschiedliche Planungsinstrumente zum Einsatz kommen. Dieses erhöht die Wiederverwendbarkeit der meist aufwendig erhobenen Daten. Drittens wird durch die Standardisierung der Datenschnittstelle langfristig die Integration neuer Methoden in bestehende Instrumente vereinheitlicht und damit die methodische Weiterentwicklung selbst harmonisiert.

Weil *PlaNet* alle Phasen des Planungsprozesses unterstützt, erweitert es 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 Bewer-

tung der Ergebnisse umfaßt. Die standardisierte Datenstruktur der zentralen Datenbank *NetWork* vereinfacht die Koppelung unterschiedlicher Modelle. Die Gestaltung der Datenbank als Informationssystem ermöglicht eine umfassende Dokumentation der Daten und eine transparente Darstellung der strategischen Vorgehensweise während einer Fallstudie. Die übersichtliche Strukturierung des Planungsprozesses, die vollständige Unterstützung aller seiner Phasen, die anpassungsfähige Struktur bei der Modellierung und die leistungsfähige Datenbank mit ihren ausführliche Dokumentationsmöglichkeiten und ihren benutzerfreundlichen Retrievalfunktionen stellen diejenige Funktionalität zur Verfügung, die notwendig ist, um heute eine kontinuierliche, begleitende, transparente und nachvollziehbare Planung zu ermöglichen.

Das Konzept von *PlaNet* bietet eine Vielzahl von Weiterentwicklungsmöglichkeiten. So eignet sich das Datenbanksystem *NetWork* nicht nur für *PlaNet*, sondern ist aufgrund seiner Konzeption auch als Plattform für andere Energiesystemmodelle geeignet, so z. B. für Optimierungs- und Energiebedarfsmodelle oder für Modelle zur Krafwerkseinsatz- und Ausbauplanung. Deshalb ist die Ankoppelung weiterer Rechenmodule an *NetWork* ein logischer und konsequenter Schritt. Viele Rechenmodule werden heute mit der Programmiersprache GAMS (General Algebraic Modelling System /127/) erstellt. GAMS wurde speziell für die Programmierung mathematischer Modelle konzipiert und hat die Modellentwicklung erheblich vereinfacht. Die Datenverwaltung in GAMS-Modellen erfolgt jedoch mit einer Vielzahl von ASCII-Dateien ("Include"-Dateien) und ist daher noch unübersichtlicher als die Datenverwaltung der alten mit FORTRAN programmierten Planungsinstrumente. Da die ASCII-Dateien für GAMS-Modelle jedoch nach einem einheitlichen Schema strukturiert sind, ist es möglich, ein parametrisierbares GAMS-Interface für *NetWork* zu entwickeln, um aus den in *NetWork* gespeicherten Daten den vollständigen Inputdatensatz des zugehörigen GAMS-Modells zu erstellen. Damit würde der Komfort von *NetWork* bei der Datenverwaltung mit der außerordentlich Flexibilität von GAMS bei der Entwicklung neuer mathematischer Modelle kombiniert.

Eine mögliche Erweiterung der Bedienoberfläche von *PlaNet* ist die Entwicklung eines Graphikeditors, der es dem Benutzer ermöglicht, das Netzwerkdiagramm des RES interaktiv am Bildschirm zu erstellen und auszudrucken. Das graphische RES kann dann als Oberfläche zur Navigation durch den Datenbestand verwendet werden und die Ergebnisse in Form einer RES-Graphik veranschaulichen. Die Mengen der Energieflüsse und die assoziierten Kosten ließen sich im RES z. B. durch verschiedene Strichstärken oder durch unterschiedliche Farben darstellen.

Im Bereich der Eingabe kommt es oft vor, daß Hilfsrechnungen durchgeführt werden müssen, um Systemparameter für die Modellierung aus anderen verfügbaren Größen zu ermitteln. Klassisches Beispiel hierfür ist die Ermittlung von Wärmebedarfskennziffern für Gebäude aus der Gebäudestruktur und den Klimadaten. Diese Hilfsrechnungen sind für eine Aktualisierung der Modellrechnungen sehr wichtig, werden jedoch selten dokumentiert. Ein erweiterter *Analyst* kann hier Abhilfe schaffen. Anstatt wie bisher, Werte aus der Datenbank

nur einlesen zu können, ist es denkbar, daß der *Analyst* berechnete Werte in die entsprechenden Zeitreihen der Datenbank auch zurückschreiben kann. Auf diese Weise können die Berechnungen der Wärmebedarfskennziffern in einem *Analyst*-Report durchgeführt und in der Datenbank gespeichert werden. Die Berechnungen wären auf diese Weise gut dokumentiert und stünden jederzeit für die Aktualisierung der Planung zur Verfügung.

Potentiale erneuerbarer Energiequellen wie Sonne oder Wind sowie Kraft-Wärmekopplungs-Technologien lassen sich nur mit einer höheren zeitlichen Auflösung realistisch berechnen. Oft möchte man jedoch nicht die gesamte Modellierung von Jahreswerten auf Stundenwerte umstellen, da der Datenbedarf dann unnötig steigen und die Rechenzeit zu groß würde. Statt dessen sollten die Jahreswerte auf wenige typische Tage mit Stundenauflösung "verschmiert" werden. Die dafür entwickelte Methode der Typtage /128/ kann in *PlaNet* integriert werden, um eine höhere zeitliche Auflösungen zu ermöglichen.

Um die Waldressourcen in Entwicklungsländern realistischer modellieren zu können, bietet sich weiterhin die Entwicklung eines Biomassemoduls für *PlaNet* an. Ein derartiges Modul eignet sich für die Simulation nachwachsender Ressourcen und kann die verschiedenen konkurrierenden Nutzungen der begrenzten Landfläche berücksichtigen.

Weiterhin lassen sich die Auswirkungen von Unsicherheiten in den Systemparametern auf die Ergebnisse der Modellierung besser abschätzen, wenn Verfahren der stochastischen Modellierung oder der Fuzzy Mathematik in *PlaNet* integriert werden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß mit dem in dieser Arbeit entwickelten Instrument die Entscheidungsfindung bei der Energie- und Umweltplanung effizient unterstützt wird. Die tragfähige und klar strukturierte Basis der neu geschaffenen standardisierten Datenbank ermöglicht sowohl die Integration anderer Modellierungsansätze wie z. B. der Energiesystemoptimierung als auch den Ausbau mit zahlreichen methodischen Erweiterungen in Form zusätzlicher Module.

Literaturverzeichnis

/1/ Voß, A.: Stoffströme, Risiken und externe Kosten von Energiesystemen. Vortrag auf dem 11. Baden-Württemberg-Kolloqium Energie und Umwelt - eine technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Herausforderung. Karlsruhe, 28.2. bis 4.3 1994

/2/ DECADES: Inter-agency Joint Report on Databases and Methodologies for Comparative Assessment of Different Energy Sources for Electricity Generation: Computerized Tools for Comparative Assessment of Electricity Generation Options and Strategies. An inter-agency project of CEC, ESCAP, IAEA, IBRD, IIASA, OECD, OPEC, UNIDO, WMH, DECADES-Project, Working Paper No. 5, December 1993

/3/ Voß, A.: Möglichkeiten und Grenzen von Energieszenarien. Vortrag auf dem Seminar "Sinn und Grenzen von Energieszenarien" der Fachgruppe Energiesysteme, Kerntechnische Gesellschaft e.V., Erlangen, 11. April 1991

/4/ Falk, G., W. Ruppel: Energie und Entropie. Eine Einführung in die Thermodynamik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1976

/5/ United Nations: UN Energy Statistics Yearbook. New York, 1993

/6/ Voß, A.: Leitbilder und Wege einer umwelt- und klimaverträglichen Energieversorgung. In Hans Günter Brauch (Hrsg.): Energiepolitik - Technische Entwicklung, politische Strategien, Handlungskonzepte zu erneuerbaren Energien und zur rationellen Energienutzung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997

/7/ Schneeweiß, C.: Planung 1: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, 1991

/8/ Miser, Hugh, J., Edward S. Quade: Handbook of Systems Analysis - Craft Issues and Procedural Choices. Elsevier Science Publishing Co., New York, 1988

/9/ Majone, Giandomenico: The Craft of Applied Systems Analysis. International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA, WP-80-73, Laxenburg, Austria, 1980

/10/ Schmid, G.: Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen. Dissertation, IER, Universität Stuttgart, 1994

/11/ Fahl, U.: KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft und Energiepolitik. Dissertation, IER - Universität Stuttgart, Band 1, März 1990

/12/ Wene, C.-O.: Use of Comprehensive Energy Emission Models for Swedish Local Energy Planning. IEA/ETSAP/Annex V, 5th workshop, Göteborg, 1995

/13/ Kahn, Herman, I. Mann: Techniques of Systems Analysis. The Rand Corporation, RM-1829, Santa Monica, California, 1956

/14/ Reuter, A.L.: Integrated Resource Planning - A Long and Winding Road. Proceedings der Konferenz "Croatian Energy Day", 4forum - dan energije u hrvatskoj. ISBN 953-96345-1-2, World Energy Council, Zaghreb, 15. Dez. 1995

/15/ Munasinghe, Mohan: Integrated National Energy Planning and Management. Methodology and Application to Sri Lanka. World Bank technical paper no. 86, Industry and energy series, ISSN 0253-7494, World Bank, Washington D.C., 1988

/16/ Associated Universities Inc.: Reference Energy Systems and Resource Data for Use in the Assessment of Energy Technologies. AET-8, April 1972

/17/ 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

/18/ Beller, M., Editor: Sourcebook for Energy Assessment. BNL 50483, Brookhaven National Laboratory, December 1975

/19/ National Center for Analysis of Energy Systems: An Analytical Franework for the Assessment of Energy Resource and Technology Options for Developing Countries. BNL-50800, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, February 1978

/20/ Zahn, E.: Strategieunterstützungssysteme. In: Systemmanagement und Managementsysteme, Abhandlungen aus dem Industrieseminar der Universität Mannheim, Heft 34, herausgegeben von Peter Milling, Duncker und Humblot, 1991

/21/ Rosaria di Nucci Pearce, M., Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Energieleitstelle, Berlin: Implementing the energy action plan for Berlin. A policy overview. Vortrag auf der Konferenz "The European Energy Network", des Projektträgers Biologie, Energie, Ökologie des BMFT (BEO, Forschungszentrum Jülich), Berlin, 21./22. Oktober 1993

/22/ Gorry, G.A., Scott Morton, M.S.: A Framework for Management Information Systems. In: Sloan Management Review, Vol. 13, No. 1, S. 55-70, 1971

/23/ Keen, P.G.W., Scott Morton, M.S.: Decision Support Systems: An organizational Perspective. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1978

/24/ Little, J.D.C.: Models and Managers: The Concept of Decision Calculus. Management Science, Vol. 16, Nr. 8, S. 466 - 485, April 1970

/25/ Moore, J.H., M.G. Chang: Design of Decicion Support Systems. Data Base, Vol. 12, Heft 1/2, S. 8-14, Herbst 1980

/26/ Ginzberg, M.J., E.A. Stohr: Decision Support Systems: Issues and Perspectives. In: Decision Support Systems, Proceedings of the NYU Symposium on Decision Support Systems, New York, 21-22 May 1981, edited by M.J. Ginzberg, W. Reitman and E.A. Stohr, North Holland Publishing Company, New York, 1982

/27/ Fedra, K., Reitsma, R.F.: Decision Support and Geographical Information Systems. IIASA Publication RR-90-9, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, December 1990

/28/ Kleinhans, A., M. Rüttler, E. Zahn: Computergestütztes Management marschiert. In: Harvard Manager, Heft 4, S. 104-110, 1989

/29/ Meyer, M.H., K.F. Curley: Putting Expert system Technology to Work. In: Sloan Management Review, S. 28ff, Winter 1991

/30/ Dennis, A.R., J.F. Nunamaker, D. Paranka, D.R. Vogel: A New Role for Computers in Strategic Management. In: The Journal of Business Stratgey, pp 38-43, Sept./Oct. 1990

/31/ Eden, C.: Strategic Thinking with Computers. In: Long Range Planning, Vol. 23, Nr. 6, S. 35-43, 1990

/32/ Greschner, J., E. Zahn: Strategischer Erfolgsfaktor Information. In: Krallmann, Papke, Rieger (Hrsg.), Rechnergestützte Werkzeuge für das Management - Grundlagen, Methoden, Anwendungen, S. 9-28, Berlin, 1992

/33/ Ackhoff, R.L.: Management Misinformation Systems. In: Management Science, Vol. 14, No. 4, S. 147-156, 1967

/34/ Zahn, Erich: Strategieunterstützungssysteme. In Peter Milling: Systemmanagement und Managementsysteme. Abhandlungen aus dem Industrieseminar der Universität Mannheim, Heft 34, Duncker & Humblot Berlin, Berlin, 1991

/35/ Schneeweiß, C.: Planung 2: Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, 1992

/36/ Voß, A.: Dynamische Energiemodelle. Aus: Energiemodelle für die BRD, Interdisciplinary Systems Research 42, hrsg. von Christian König, S.102, 1977

/37/ Forester, J.W.: Computer Models in Management Education. In: Systemmanagement und Managementsysteme. Abhandlungen aus dem Industrieseminar der Universität Mannheim, Heft 34. Hrsg. von Peter Milling, Berlin, 1991

/38/ Manne, A.S., L. Schrattenholzer: A Summary of the 1983 Poll Responses. IIASA Publication RR-85-5, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, April 1985

/39/ Kleinewefers, Dr. H., Dr. A. Jans: Einführung in die volkswirtschaftliche und wirtschaftspolitische Modellbildung. Verlag Franz Vahlen, München, 1983

/40/ Bossel, H.: Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Ein Lehr- und Arbeitsbuch. 2. veränderte Auflage mit verbesserter Simulationssoftware, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 1994

/41/ Wien Automatic System Planning Package (WASP): A Computer Code for Power Generating System Expansion Planning. Reprint of WASP-III Version User's Manual, Sections 1 to 11, International Atomic Energy Agency, Division of Nuclear Power and Reactors, Section of Economic Studies, Vienna, 1980, including updates through Newsletter 5 of July 21, 1986

/42/ Wien Automatic System Planning Package (WASP): A Computer Code for Power Generating System Expansion Planning. Version WASP-III Plus, User's Manual, Volume 1, Chapters 1-11, International Atomic Energy Agency, Vienna 1995

/43/ Schrattenholzer, L.: The Energy Supply Model MESSAGE. International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA, Laxenburg, Austria, 1981

/44/ Messner, S., M. Strubegger: The Energy Model MESSAGE III. Version 1.0, TEMAPLAN Group, Vienna, April 1990

/45/ Van der Voort, E., E. Donni, C. Thonet, E. Bois D'Enghien, C. Dechamps, J.F. Guilmot: Energy Supply Modeling package - EFOM 12C MARK I. Vol. II (User's Guide) EUR 8896 EN, Vol. III (Mathematical Description) EUR 8896 EN, Commission of the European Communities, DG XII, 1984

/46/ Abilock, H. et al.: MARKAL - A Multiperiod Linear Programming Model for Energy Systems Analysis. Proceeding of the International Conference on Energy system Analysis, Dublin/IRL., Oct. 9-11, EUR 6763 EN, Commission of the European Communities, 1979

/47/ Fishbone, L.G., G. Giesen, G.A. Goldstein, H.A. Hymen et al.: User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0). BNL-51701, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1983

/48/ Meyer, Manfred: Operations Research - Systemforschung. Uni-Taschenbücher 1231, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1986

/49/ Charpentier, J.P. et. al.: Model for Analysis of the Energy Demand MAED. Section of Economic Studies, Division of Nuclear Power, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, 1983

/50/ Chateau, B., B. Lapillonne: MEDEE, A Model for Long Term Energy Demand Evaluation. RR-78-17, International Insitute for Applied Systems Analysis, IIASA, Laxenburg, Austria, 1978

/51/ Häfele, W.: Energy in a Finite World. Paths to a sustainable future. Report by the Energy Systems Program Group of IIASA, International Institute for Applied System Analysis, Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1981

/52/ Basile, P.: The IIASA Set of Energy Models: Its Design and Application. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), RR-80-31, Laxenburg, Austria, 1980

/53/ Kaltschmitt, M.: Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs. Dissertation, Universität Stuttgart, Dezember 1990

/54/ Fischedick, M.: Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund. Technische Effekte, Kosten, Emissionen. Dissertation, Forschungsbericht Band 20, IER, Universität Stuttgart, Dezember 1995

/55/ Goldstein, G.A. and L.D. Hamilton: PC-MARKAL and the MARKAL User Support System (MUSS), User's Guide. BNL-46319, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1983

/56/ Buehring, W.A., B.P. Hamilton, K.A. Guziel and R.R. Cirillo: Energy and Power Evaluation Program (ENPEP): An Integrated Approach for Modelling National Energy Systems. Argonne National Laboratory, February 1991

/57/ Katscher, W.: IKARUS, Instruments for Greenhouse Gas Reduction Strategies. A Development Project of the Federal Minister for Research and Technology (BMFT). Interim Summary Report for Project Phase 3, Forschungszentrum Jülich (KFA), Programmgruppe Technologiefolgenforschung (TFF), 1994

/58/ Reuter, A.: MESAP - Microcomputer-based Energy Sector Analysis and Planning *System*. Overview brochure, University of Stuttgart, August 1990

/59/ Müller, Th.: Ermittlung der SO_2- und NO_x-Emissionen aus staionären Feuerungsanlagen in Baden Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. IER Forschungsbericht Band 17, IER, Universität Stuttgart, November 1994

/60/ Laing, R.: CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias. IER Forschungsbericht Band 25, IER, Universität Stuttgart, Februar 1996

/61/ SUPER/OLADE-BID: Functional Specifications and Mathematical Formulation and User's Manual. Latin America Energy Organization, OLADE, Quito, Ecuador, 1992

/62/ ERL Energy Ltd. and Halcrow Energy Associates: Energy Toolbox - A Decision Support System for Energy Planning. Users Guide, Volume 1 and 2. ERL Energy Ltd., London, Great Britain, 1990

/63/ LEAP - A Computerized Energy Planning System, Volume 1 Overview, Volume 2 Users Guide, Volume 3 Technical Description. All for LEAP Version 90.01, Stockholm Environment Institute, Boston Center, Tellus Institute (formerly ESRG), Boston, 1990

/64/ Reuter, A.: Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützten Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern. Dissertation, IER - Universität Stuttgart, Band 10, November 1991

/65/ Messner, S., M. Strubegger: User's Guide to CO2DB: The IIASA Technology Data Bank. Version 1.0, Working Paper WP-91-31a, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1991

/66/ DECADES Project, Working Paper No. 2: DECADES Software Package DECPAC. IAEA, Vienna, 1993

/67/ International Atomic Energy Agency: DECADES Tools - User's Manual for Version 1.0. IAEA, Vienna, 1997

/68/ Blesl, M., Schlenzig, C., Steidle, T., Voß, A.: Entwicklung eines Energieinformationssystems. Forschungsbericht Band 23, IER - Universität Stuttgart, April 1996

/69/ Valette, P., P. Zagame, eds.: The Hermes Macro-economic Model. North Holland, Amsterdam, 1994

/70/ Kemfert, C., W. Kuckshinrichs: MIS: A Model-Based Macroeconomic Information System For Energy Analysis In Germany. Wirtschaftswissenschaftliche Diskussionsbeiträge, Volkswirtschaftliche Reihe, Institut für Volswirtschaftslehre I, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Discussion Paper No. V-153-95, Oldenburg, July 1995

/71/ Saboohi, Y.: Ein regionalisiertes Modell für die Energieplanung in Entwicklungsländern (A regionalized Model for Energy Planning in Developing countries). Dissertation, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart, October 1989

/72/ Capros, P., L. Mantzos: User's Manual of MIDAS Version 3.0. National Technical University of Athens, 1992

/73/ Criqui, P.: A Detailed Simulation Approach to World Energy Modelling: the SIBILIN and POLES Experience. International Energy Modelling, Sterner, T., ed. London, Chapman & Hall, 1992

/74/ Criqui, P., F. Cattier, P. Menanteau, M.C. Quidoz, N. Kouvaritakis, C. Thonet: POLES 2.2 - Prospective Outlook on Long Term Energy Systems, Reference Guide. Institut d'Economie et de Politique de l'Energie - IEPE, Grenoble, 13. December 1996

/75/ Jusko, M. J. et al.: Energy and Power Evaluation Program (ENPEP) - Documentation and User's Manual. Energy and Environmental Systems Division, Systems Analysis, Development and Evaluation Group, Argonne national Laboratory, August 1987

/76/ European Commission, DG XII: SAFIRE: Strategic Assessment Framework for the Implementation of Rational Energy. EUR 16785, Office for Official Publications of the European Commission, Luxembourg, November 1995

/77/ Schramm. G.: Environmental Power Manual: Incorporating the Environmental Life-Cycle Costs of Power Systems into Investment Decision Making. The World Bank, 1993

/78/ Fritsche, U.: TEMIS - A Computerized Tool for Energy and Environmental Analysis, Öko-Institut, Darmstadt, November 1991 and Gesamt-Emissionsmodell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.0, Endbericht, Oktober 1992

/79/ Schaumann, P., O. Schweicke: ECOLOG - Entwicklung eines Computermodells mit linearer Optimierung zur Abbildung eines regionalisierten Energiesystems am Beispiel Gesamtdeutschlands. Endbericht. In: Wissenschaftliche Berichte Heft 39, 1995, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Soziales, Zittau/Görlitz 1995

/80/ Artiles-Hansmeier, F.: The Investment Calculation Model INCA. Version 2.0, IKE 8 D-75, Universität Stuttgart, April 1989

/81/ Rühle, R.: RSYST, ein integriertes Modulsystem mit Datenbasis zur automatisierten Berechnung von Kernreaktoren. Dissertation, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart, 1973

/82/ LEAP - Long-range Energy Alternatives Planning System - Overview for Version 94.0. Stockholm Environment Institute - Boston, Tellus Institute, Boston, 1993

/83/ Hake, J.-Fr., P. Jagodzinski, W. Kuckshinrichs, P. Markewitz, D. Martinsen, M. Walbeck: IKARUS: A Model System to Reduce Energy-Related Greenhouse Gas Emissions in Germany. In: J.-Fr. Hake (Eds.), Advances in Systems Analysis: Modelling Enmergy-Related Emissions on a National and Global Level, Konferenzen des Forschungszentrums Jülich, Band 15/1994, S. 213, Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, 1994

/84/ United Nations, Department of Technical Co-operation for Development (UNDTCD): ENERPLAN's User's Manual. Version 2.0, New York, June 1988

/85/ Pachauri, R.K., L. Srivastra: Integrated Energy Planning in India: A Modelling Approach. The Energy Journal, Vol. 9, No. 4, October 1988

/86/ Illum, K.: SESAM - The Sustainable Energy Systems Analysis Model. Aalborg University Press, 1995

/87/ The National Energy Modeling System: An Overview. DOE/EIA-0581, Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585, May 1994

/88/ European Commission, DG XII: The PRIMES Project. EUR 16713, Office for Official Publications of the European Commission, Luxembourg, August 1995

/89/ Manne, A.S.: ETA-MACRO - A User's Guide. EA-1724 Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1981

/90/ Manne, A.S., R.G. Richels: Buying Greenhouse Gas Insurance: The Economic Cost of Carbon Dioxide Emission Limits. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992

/91/ Manne, A., J. Oliveira Martins: OECD Model Comparison Project (II) on The Costs of Cutting Carbon Emissions. Comparison of Model Structure and Policy Scenarios: GREEN and 12RT. Economics Department, Organisation for Economic Co-operation and Development OECD, Working Paper 146, Paris, June 1994

/92/ Burniaux, J.M., J.P. Martin, G. Nicoletti, J. Oliveira Martins: GREEN: A Multi-Sector, Multi-Region Dynamic General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO_2 Emissions: A Technical Manual. Economics Department, Organisation for Economic Co-operation and Development OECD, Working Paper 116, Paris, May 1992

/93/ Staub, P.: The ZENCAP ESG-Model, an Energy Scenario Generator Model: Description of the ESG-Model. Project ZENCAP: Working Paper No. 27, June 1993

/94/ European Commission, DG XII: GEM-E3 - Computable General Equilibrium Model for studying Economy-Energy-Environment Interactions. EUR 16714, Office for Official Publications of the European Commission, Luxembourg, September 1995

/95/ European Commission, DG XII: E3ME - An Energy-Environment-Economy Model for Europe. EUR 16715, Office for Official Publications of the European Commission, Luxembourg, September 1995

/96/ Berthelmy, J.-C., J.-G. Devezeaux de Lavergne: MELODIE: An Energy-Economy Interaction Model for Long Term Planning. 13th Congress of the World Energy Conference, Commissariat à L'Energie Atomique (CEA), september 1986, english translation march 1989

/97/ Böhringer C.: Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der energie- und umweltpolitischen Analyse. Dissertation, Peter Lang, 1996

/98/ Manne, A.S., C.-O. Wene: MARKAL-MACRO: A Linked Model for Energy-Economy Analysis. Brookhaven National Laboratory, BNL-47161, Informal report, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, February 1992

/99/ Kypreos, S.: The MARKAL-MACRO Model, Links and Potential Extensions. Paul Scherrer Institute PSI, CH-5232 Villigen, Switzerland, 1992

/100/ Staub, P.: Die Verknüpfung von Energietechnologie- und makroökonomischem Modell. ETH Zürich, working papers 80-8, 1980

/101/ Balandynowicz, W., C. Böhringer, U. Fahl, G. Schmid: Hard Linkage between a physical process model and a neoclassical general equilibrium model. IER - Universität Stuttgart, 1993

/102/ Wene, C.-O.: Energy-Economy Analysis: Linking the Macroeconomic and Systems-Engineering Approaches. Energy Systems Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, WP-95-42, International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA, Vienna, Austria, May 1995

/103/ Schrattenholzer, L.: Assessment of Personal Computer Models for Energy Planning in Developing Countries. World Bank / UNDP / Bilateral Aid Energy Sector Management and Assessment Programme (ESMAP), October 1991

/104/ Rembold, Ulrich: Einführung in die Informatik für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1991

/105/ Rosenstengel B., U. Winand: Petri-Netze - Eine anwendungsorientierte Einführung. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1982

/106/ Zehnder, C.A.: Informationssysteme und Datenbanken. Leitfäden der Angewandten Informatik, 5. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, 1989

/107/ Codd, E.F.: A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. In Comm. ACM, Vol. 13, No. 6, S. 377-387, 1970

/108/ Chen, P.P.: The Entity-Relationship Model - Toward a Unified View of Data. ACM TODS, Vol. 1, No. 1, S. 9-36, 1976

/109/ Schlenzig, C.: A Standardized Relational Database Management System for Network Oriented Energy System Models - Data Dictionary. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, IER, Universität Stuttgart, 1996

/110/ Zehnder, C. A.: Informatik-Projektentwicklung. Leitfäden der Angewandten Informatik, S. 203, B. G. Teubner Stuttgart, 1986

/111/ Rühle, R.: Systemforschung und EDV-Programmsysteme. Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart, 1979

/112/ Noack, M., J. Seybold, R. Rühle: From Nuclear Reactor Calculation towards a Highly Sophisticated Scientific Software Integration Environment. In: Kerntechnik Vol. 61 Nr. 1, pp 10-15, Februar 1996

/113/ Kleemann, Manfred: Optimierung von Energiesystemen. Anwendungsmöglichkeiten und Probleme von Energiemodellen. Vortrag auf dem Seminar "Sinn und Grenzen von Energieszenarien" der Fachgruppe Energiesysteme, Kerntechnische Gesellschaft e.V., Erlangen, 11. April 1991

/114/ Kleinpeter, M.: Introduction to Energy Planning. Schriftenreihe der Technischen Universität Wien, Metrica Fachverlag Bartak, 1989

/115/ Energy, Global Prospects 1985-2000. Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies WAES. A Project sponsored by the Massachusetts Institute of Technology, McGraw-Hill Book Company, New York, 1977

/116/ Larsson, T., C.-O. Wene: The Greenhouse Effect as an Uncertainty in Energy Planning: Case Study Sweden. In Environmental Models: Emissions and Consequences, J. Fenham et al. (Editor), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1990

/117/ Schmidt, B. A. Toussaint: Referenzmodell SSA für Strategien. In: Simulation in Passau (SiP), Heft 3/96, Lehrstuhl für Operations Research und Systemtheorie, Universität Passau, 1996

/118/ Saaty, Th. L.: A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. In: Journal of Mathematical Psychology, Band 15, S. 234-281, New York, 1977

/119/ Stevens, S. S.: Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural and social prospects. New York, 1975

/120/ Gussek, F., T. Tomczak: Ressourcenallokation mit dem "Analytic Hierarchy Process (AHP)". Eine praktische Anwendung des AHP als "Decision Support System" bei der Ressourcenverteilung auf die strategischen Geschäftsfelder einer Portfolio-Kategorie. Arbeitspapier Nr. 25/1988. Institut für Markt- und Verbrauchsforschung, Freie Universität Berlin, 1988

/121/ GTZ: ZOPP. Zielorientiertes Planen von Projekten und Programmen der Technischen Zusammenarbeit (Einführung in die Grundlagen der Methode). Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit mbH, GTZ-Form 21-23, Eschborn, 3/1987

/122/ Microsoft Corporation: Windows 3.x Interface; Visual Design Guidelines. Part of Visual Basic Developers Toolkit, Microsoft Corporation, 1993

/123/ Schlenzig, C.: Planification Energétique Régionale pour la Région Nord-Ouest de Madagascar. Tome I - VIII. GTZ - Programme Spécial Energie Madagascar und IER Universität Stuttgart, 1990 bis 1993

/124/ Bundesministerium für Wirtschaft BMWI: Energiedaten 95. Nationale und Internationale Entwicklung. BMWI, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn, September 1995

/125/ Ministère de l'Industrie, de l'Energie et des Mines (MIEM), Direction de l'Energie et de l'Eau: Vue de l'ensemble sur le système de planification énergétique mis en place à Madagascar. Rapport d'Exécution du projet Energie I, Planification Energétique, Antananarivo, Madagascar, Janvier 1989

/126/ Rakoto, G.: Enquête socio-économique dans le cadre de l'étude de la planification énergétique de la région nord-ouest de Madagascar, Tome II: Population et Economie des Ménages. Ministère de l'Energie et des Mines/GTZ/HERY VAO, Programme Spécial d'Energie, Madagascar, Mai 1991

/127/ Brooke, A., D. Kendrick, A. Meeraus: GAMS - A User's Guide. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, The Scientific Press, 1988

/128/ VDI Richtlinie 2067: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen. Blatt 7, Beuth Verlag, Berlin, 1988

Anhang

Tabelle A-1: Demographische Hypothesen der Fallstudie

Szenarioparameter		1990: Basisjahr	2010: Szenario Stagnation	2010: Szenario Referenz	2010: Szenario Wachstum
Personen	Stadt	150,000	392,000	349,000	349,000
	Land	244,000	352,000	352,000	403,000
	gesamt	394,000	744,000	701,000	752,000
Bevölkerungs-wachstumsrate	Stadt	5,0%	4,9%	3,9%	3,7%
	Land	2,6%	1,7%	1,7%	2,7%
	Gesamt	3,5%	3,4%	2,8%	3,2%
Dichte (Personen pro km^2)	Stadt	143	375	334	334
	Land	13	19	19	22
	Gesamt	20	38	36	38
Anzahl der Häuser	Stadt	33,500	80,000	78,000	85,000
	Land	61,500	89,000	88,000	101,000
	Gesamt	95,000	169,000	166,000	186,000
Anteil der Haus-typen, Stadt	Modern	75%	65%	75%	82%
	Wellblech	12%	16%	12%	7%
	Traditionnell	13%	19%	13%	11%
Anteil der Haus-typen, Land	Modern	23%	17%	23%	33%
	Wellblech	19%	18%	19%	20%
	Traditionnell	58%	65%	58%	47%
Personen pro Haushalt	Stadt	4,5	4,9	4,5	4,1
	Land	4,0	4,0	4,0	4,0

Tabelle A-2: Energiebilanz Nordwesten Madagascar 1990

Energiebielanz 1990 für den Nordwesten Madagascars [troe/a]

	Primärenergie				Endenergie								Gesamt
	Holz	Bagasse	Andere	Gesamt	Strom	Gas	Kerosin	Diesel	Benzin	Schw.Höl	H.kohle	Gesamt	Gesamt
Produktion	114771	26000	473	141244	-	-	-	-	-	-	-	-	141244
Import					56	541	5265	13444	2860	1316		23481	23481
Angebot	114771	26000	473	141244	1) 56	541	5265	13444	2860	1316		23481	164724
Stromerzeugung					1121			-3400				-2279	-2279
Autoproduktion		-11755		-11755	2) 4362			-3592	-118			652	-11103
Holzkohlemeiler	-67363			-67363							11452	11452	-55911
Umwandlung	-67363	-11755		-79118	5483			-6992	-118		11452	9825	-69293
Eigenverbrauch					3) -145							-145	-145
Angebot	47408	14245	473	62125	5394	541	5265	6452	2742	1316	11452	33161	95287
Haushalte	46284		120	46404	756	506	4004				10816	16082	62486
Industrie	566	14245	353	15164	4042			1191		1316		6549	21713
Transport							824	4107	2737			7668	7668
Tertiär	119			119	557	35	436				464	1493	1612
Informelle Industrie	358			358	37			179			172	389	747
Landwirtschaft	80			80	1			975	5			980	1061
Endenergieverbrauch	47408	14245	473	62126	5394	541	5265	6452	2742	1316	11452	33161	95287

1) Einfuhr Trockenbatterien
2) Beinhaltet 14,7 troe aus privater Erzeugung der Haushalte
3) Quelle: Statistik JIRAMA. 1121 troe Bruttoproduktion, -36,9 troe Eigenverbrauch, -108 troe Verluste im Netz

Tabelle A-3: Wirtschaftliche Hypothesen der Fallstudie

Szenarioparameter	1990 Basisjahr	Stagnation	Referenz	Wachstum
1 BSP national (Index)	100	163	201	295
2 BSP nach Sektoren (Index)				
Landwirtschaft	100	148	216	272
Industrie	100	181	198	324
Energie	100	166	201	312
Transport	100	159	196	293
Tertiär	100	175	197	325
Öffentlich	100	133	153	204
2 Wirtschaftliche Aktivitäten der einzelnen Sektoren				
Informelle Industrie	Anzahl der Betriebe (Trend wie nationaler BSP-Index)			
- Schwerpunkt Wärme	126	205	253	372
- Schwerpunkt Kraft	97	158	195	286
Industrie	Anzahl der Betriebe (Trend wie sektorieller BSP-Index)			
- Zucker (Produktion der SIRAMA)	45000t	11090	38150	86030
Produktionsindex SIRAMA	100	25	85	191
- Agro-Industrie (BSP-Index Landwirtschaft)	100	148	216	272
- Andere (BSP-Index Industrie)	100	181	197	324
- Öffentliche Bauten (BSP-Index Tertiär)	100	182	338	591
Tertiär, Dienstleistungen	Anzahl der Betriebe (Trend des BSP-Index Tertiär)			
Anzahl Betriebe	3391	5922	6679	11006
BSP-Index Tertiär	100	175	197	325
Landwirtschaft	Fläche, Anzahl Betriebe (Trend BSP-Index Landwirtschaft)			
- mechanisiert (ha bewirtschaftete Fläche)	106076	156000	229000	288000
- Viehzucht, Fischfang (Anzahl Betriebe)	25	37	54	68
BSP-Index Landwirtschaft	100	148	216	272
3 Aktivität des Transportsektors	Trends der Aktivitäten folgen der Entwicklung der Bevölkerung			
Personen (Bevölkerung)	394,000	744,000	701,000	752,000
Waren (Bevölkerung)	394,000	744,000	701,000	752,000
Flugverkehr (Bevölkerung)	394,000	744,000	701,000	752,000
Schiffahrt (Bevölkerung)	394,000	744,000	701,000	752,000

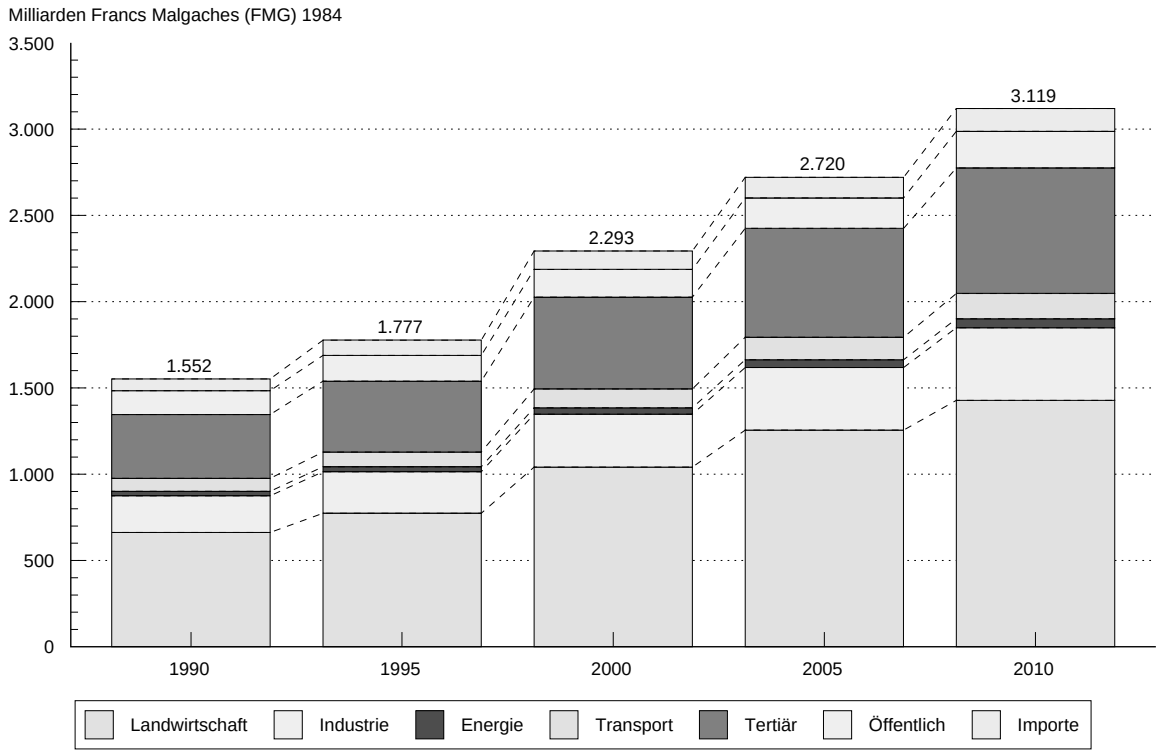


Abb. A-1: Zusammensetzung des nationalen BSP in Madagascar

Gewichtung der Kriterien der 1. Ebene

	Gesamt
Kosten	72%
Umwelt	8%
Akzept.	20%
	100%

Legende der Matrix-Multiplikationen

A			Ebene 1
B * A	B		Ebene 2
C * B * A	C * B	C	Ebene 3

Die Matrizen A, B und C werden aus den Eigenvektoren der paarweisen Vergleichsmatrix bestimmt.

Gewichtung der Kriterien der 2. Ebene

	Gesamt	Kosten	Umwelt	Akzept.
Inv.-K.	60%	83%		
Bet.-K.	12%	17%		
CO2	5%		67%	
SO2	2%		20%	
NOx	1%		7%	
VOC	1%		7%	
CDU	13%			64%
Grüne	5%			26%
SPD	2%			11%
	100%	100%	100%	100%

Bewertung der Modelläufe der 3. Ebene

	Gesamt	Kosten	Umwelt	Akzept.	Inv.-K.	Bet.-K.	CO2	SO2	NOx	VOC	CDU	Grüne	SPD
Referenz	55%	62%	7%	50%	73%	5%	6%	10%	7%	8%	75%	6%	6%
REA	29%	27%	39%	33%	19%	69%	23%	70%	69%	71%	18%	74%	20%
CO2-Tax	16%	11%	54%	17%	8%	25%	71%	20%	24%	21%	7%	20%	74%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Paarvergleich Kriterien Ebene 1

Wichtigkeit bezogen auf Kriterium "Gesamtbewertung"

	Kosten	Umwelt	Akzept.
Kosten	1	5	7
Umwelt		1	1/5
Akzept.			1

Bewertungsskala:

9 = absolut dominierend	1/3 = leicht unwichtiger
7 = sehr viel wichtiger	1/5 = unwichtiger
5 = wichtiger	1/7 = sehr viel unwichtiger
3 = leicht wichtiger	1/9 = absolut unwichtiger
1 = gleich wichtig	(Zeile X ist /Wertung/ als Spalte Y)

Paarvergleich Kriterien Ebene 2

Wichtigkeit bezogen auf Kriterium "Kosten"

	Inv.-K.	Bet.-K.	CO2	SO2	NOx	VOC	CDU	Grüne	SPD
Inv.-K.	1	5							
Bet.-K.		1							
CO2									
SO2									
NOx									
VOC									
CDU									
Grüne									
SPD									

Wichtigkeit bezogen auf Kriterium "Umweltverträglichkeit"

	Inv.-K.	Bet.-K.	CO2	SO2	NOx	VOC	CDU	Grüne	SPD
Inv.-K.									
Bet.-K.									
CO2			1	5	7	9			
SO2				1	4	3			
NOx					1	3			
VOC						1			
CDU									
Grüne									
SPD									

Abb. A-2: Beispiel einer hierarchischen Bewertungsstruktur (AHP), Teil 1

Wichtigkeit bezogen auf Kriterium "Akzeptanz"

	Inv.-K.	Bet.-K.	CO2	SO2	NOx	VOC	CDU	Grüne	SPD
Inv.-K.									
Bet.-K.									
CO2									
SO2									
NOx									
VOC									
CDU							1	3	5
Grüne								1	3
SPD									1

Paarvergleich Modelläufe

Bewertung zweier Modelläufe in Bezug auf:

Investitionskosten

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	5	7
REA		1	3
CO2-Tax			1

Betriebskosten

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	1/9	1/7
REA		1	4
CO2-Tax			1

CO2-Emissionen

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	1/5	1/9
REA		1	1/4
CO2-Tax			1

SO2-Emissionen

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	1/5	1/3
REA		1	5
CO2-Tax			1

NOx-Emissionen

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	1/7	1/5
REA		1	4
CO2-Tax			1

VOC-Emissionen

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	1/7	1/3
REA		1	4
CO2-Tax			1

CDU-Anhänger

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	5	9
REA		1	3
CO2-Tax			1

Grüne-Anhänger

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	1/9	1/5
REA		1	5
CO2-Tax			1

SPD-Anhänger

	Referenz	REA	CO2-Tax
Referenz	1	1/5	1/9
REA		1	1/5
CO2-Tax			1

Bewertungsskala:

9 = absolut besser
7 = sehr viel besser
5 = besser
3 = leicht besser
1 = gleich gut
1/3 = leicht schlechter
1/5 = schlechter
1/7 = sehr viel schlechter
1/9 = absolut schlechter
(Zeile X ist /Wertung/ als Spalte Y)

Abb. A-3: Beispiel einer hierarchischen Bewertungsstruktur (AHP), Teil 2