

Climate Change

Climate
Change

02
—
03

ISSN
1611-8855

**Systematische Analyse der
Eigenschaft von Energiemodellen
im Hinblick auf ihre Eignung für
möglichst praktische Politik-
Beratung zur Fortentwicklung
der Klimaschutzstrategie**

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 299 97 311
UBA-FB 000440



**Systematische Analyse der
Eigenschaften von
Energiesmodellen
im Hinblick auf ihre Eignung für
möglichst praktische Politik-
Beratung zur Fortentwicklung
der Klimaschutzstrategie**

von

Matthias Koch
Dr. Jochen Harnisch
Prof. Dr. Kornelis Blok

ECOFYS GmbH, Köln

On behalf of the Federal Environmental Agency

Diese Climate Change-Veröffentlichung kann bezogen werden bei

Vorauszahlung von 10,00 €

durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung der
Climate Change--Nummer sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 2.5
Dr. Jürgen Landgrebe

Berlin, April 2003

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 299 97 311	2.	3.
4. Titel des Berichts Systematische Analyse der Eigenschaft von Energiemodellen im Hinblick auf ihre Eignung für möglichst praktische Politik-Beratung zur Fortentwicklung der Klimaschutzstrategie		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Koch, Matthias; Harnisch, Jochen und Blok, Kornelis	8. Abschlussdatum November 2001	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) ECOFYS GmbH Eupener Str. 161 D-50933 Köln	9. Veröffentlichungsdatum	
	10. UFOPLAN-Nr.	
	11. Seitenzahl 187	
	12. Literaturangaben 158	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 33 00 22, 14191 Berlin	13. Tabellen und Diagramme 23	
	14. Abbildungen 24	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Zusammenfassung Ergebnisse von Energiemodellen können klimapolitische Debatten wesentlich bestimmen. Es ist Ziel dieser Studie, modelltheoretische Hintergründe aufzuzeigen, Stärken und Schwächen zu analysieren und Fragestellungen zuzuordnen. Dabei werden Ansätze zur Systematisierung aufgezeigt und die vier Modelltypen allgemeine Gleichgewichtsmodelle, Input-Output-Modelle, Optimierungsmodelle und Simulationsmodelle vorgestellt und systematisch verglichen. Kritische ergebnisbestimmende Faktoren werden anhand von Basis-/Referenzszenarien, von No-Regret-Maßnahmen, der Technologieentwicklung und den Endogenisierungsgrad vs. Detaillierungsgrad erläutert. Die Anwendung von Energiemodellen und Gründe für die Unterschiedlichkeit von Ergebnissen werden anhand von Beschäftigungswirkungen, der Kraft-Wärme-Kopplung und des Verkehrssektors vorgestellt. Es wird der Strukturierungsansatz für Fragestellungen zum Klimaschutz entwickelt und beispielhaft für mehrere Fragestellungen angewendet.		
17. Schlagwörter Energiemodelle, Klimaschutz, Fragestellungen, allgemeine Gleichgewichtsmodelle, Input-Output-Modelle, Optimierungsmodelle, Simulationsmodelle, Strukturierungsansatz, kritische Faktoren, No-Regret-Maßnahmen, Technologieentwicklung		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 299 97 311	2.	3.
4. Report Title		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Koch, Matthias; Harnisch, Jochen and Blok, Kornelis		8. Report Date November 2001
6. Performing Organisation (Name, Address) ECOFYS GmbH Eupener Str. 161 D-50933 Köln		9. Publication Date
		10. UFOPLAN-Ref. No.
		11. No. of Pages 187
		12. No. of Reference 156
7. Funding Agency (Name, Address) Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency) Postfach 33 00 22, 14191 Berlin		13. No. of Tables, Diagrams 23
		14. No. of Figures 24
		15. Supplementary Notes
16. Abstract Results of energy models can have a substantial impact on climate policy debates. The goal of this study is to discuss the theoretical background of the models, to analyse strength and weaknesses and to relate question formulation to models. The four mostly known model types general equilibrium models, input-output models, optimisation models and simulation models are presented and compared systematically. Critical factors substantially determining the results of energy models are discussed for base/reference scenarios, no-regret options, technology development and endogenisation vs. level of detail. The application of energy models and causes for differences in the results are presented for employment effects, combined heat and power (CHP) systems and the traffic sector. The structuring approach for question formulations of climate change issues was developed and applied for several questions.		
17. Keywords Energy models, climate change, question formulation, general equilibrium models, input-output models, optimisation models, simulation models, structuring approach, critical factors, no-regret options, technology development		
18. Price	19.	20.

INHALT

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	7
2	FRAGESTELLUNGEN ZUM KLIMASCHUTZ.....	10
2.1	Katalog von Fragestellungen zum Klimaschutz	10
2.2	Ansätze zur Strukturierung von Fragestellungen zum Klimaschutz.....	14
2.2.1	Grundlegende Zusammenhänge.....	14
2.2.2	Übersicht über die Teilbereiche	18
2.2.3	Umsetzung des Strukturierungsansatzes.....	31
3	DER AUFBAU VON ENERGIEMODELLEN	35
3.1	Integrated Assessment Modelle und Kosten-Nutzen-Analysen	35
3.2	Energiemodelle und ihre Komponenten	37
3.3	Energiemärkte	40
3.4	Technologieentwicklung.....	42
4	TYPEN VON ENERGIEMODELLEN.....	45
4.1	Systematisierung der Modellkonzepte	45
4.2	Allgemeine Gleichgewichtsmodelle	51
4.3	Input-Output Modelle	58
4.4	Optimierungsmodelle.....	64
4.5	Simulationsmodelle.....	69
4.6	Zusammenfassende Erläuterung der Modelltypen.....	73
5	EINZELNE ENERGIEMODELLE	75
5.1	NEWAGE	75
5.2	PANTA RHEI	80
5.3	MIS	84
5.4	IKARUS.....	88
5.5	PERSEUS	95
6	KRITISCHE FAKTOREN UND SYSTEMATISCHE UNTERSCHIEDE.....	98
6.1	Basis- bzw. Referenzszenario	99
6.2	No-Regret-Maßnahmen und Effizienzlücke	101
6.2.1	Konsumentenpräferenzen	102
6.2.2	Versteckte Kosten	103
6.2.3	Nebeneffekte	104
6.2.4	Marktunvollkommenheiten.....	105
6.2.5	Arten von Zusatznutzen und -kosten	106
6.3	Technologieentwicklung.....	108
6.4	Grad der Endogenisierung vs. Detaillierungsgrad	112
7	ANWENDUNGEN VON ENERGIEMODELLEN.....	114
7.1	Beschäftigungseffekte und Klimaschutz.....	115
7.1.1	Die Bandbreite der Ergebnisse.....	116
7.1.2	Kritische Größen	121
7.1.3	Ausblick	123
7.2	Kraft-Wärme-Kopplung.....	124
7.2.1	Der technisch ökonomische Kontext	124
7.2.2	Ursachen für die unterschiedliche Bewertung der KWK	127

7.3	Verkehr	129
7.3.1	Der Verkehrsbereich in den einzelnen Modelltypen	129
7.3.2	Das TREMOD-Modell.....	131
8	SYSTEMATISCHER VERGLEICH DER MODELLTYPEN.....	134
8.1	Übersicht des Modellvergleichs.....	134
8.2	Ausführliche Beschreibung des Modellvergleichs	138
9	ANWENDUNG VON ENERGIEMODELLEN: ZUORDNUNG VON FRAGESTELLUNGEN UND AUSBLICK	143
9.1	Verwendung des Strukturierungsansatzes	143
9.2	Kriterienliste	157
9.3	Ansatz: Normung?	158
10	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUßFOLGERUNGEN.....	159
11	DANKSAGUNG.....	163
12	LITERATURVERZEICHNIS	164

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Der Klimaschutz ist inzwischen aus umwelt- und energiepolitischen Debatten nicht mehr wegzudenken. Während andere umweltpolitische Herausforderungen schwerpunktmäßig spezifische Teilbereiche der Wirtschaft betreffen, hat umfassender Klimaschutz weitreichende Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft. Letztlich wird eine langfristige Abkehr von der auf fossilen Brennstoffen beruhenden Energieversorgung angestrebt.

In welcher Form und Intensität vom Menschen verursachte Klimaveränderungen eintreten, ist noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Es gilt als sehr wahrscheinlich, daß bereits die Temperaturanomalien der vergangenen Jahre hauptsächlich durch Treibhausgasemissionen und die resultierenden Veränderungen des Strahlungshaushaltes verursacht wurden. Es wird weitgehend akzeptiert, daß weit bedeutsamere Klimaveränderungen in naher Zukunft eintreten werden und Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen sofort ergriffen werden müssen.

Vorgaben zu den Emissionsminderungszielen gibt es auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene mit dem Kyoto-Protokoll, dem Burden-Sharing Agreement und dem Beschluß der Bundesregierung aus dem Jahr 1990. Langfristig wird eine weitergehende drastische Senkung der Emissionen erforderlich sein. In der politischen Debatte stehen nach der Frage des „ob“, nun eher Fragen des „wie“, „zu welchen Kosten“ und „mit welchen Auswirkungen“ im Vordergrund.

Weil Energienutzung die bei weitem größte Ursache für Treibhausgasemissionen ist, beschäftigen sich Energiemodelle mit folgenden weiteren Fragestellungen: Welche ökonomischen, technischen und rechtlichen Maßnahmen sind erforderlich, um die Emissionsminderungsziele zu erreichen? Mit welchen Kosten sind diese Maßnahmen verbunden? Mit welchen Auswirkungen auf Volkswirtschaft und Gesellschaft ist zu rechnen?

Allein in Deutschland wurden weit mehr als ein Dutzend Energiemodelle entwickelt, die auf diese Fragestellungen angewendet werden. Einige haben eine eher ökonomische, andere eine eher technische Orientierung. Die Hintergründe für die Entwicklung der Modelle unterscheiden sich: Manche wurden aus einem makroökonomischen Kontext mit einer Erweiterung in Richtung Energie gesehen. Andere haben sich aus Teilbereichen (Kraftwerke, Elektrizitätsversorgung) in Richtung einer Modellierung des gesamten Energiesektors weiterentwickelt. Wiederum andere sind aus einer Zusammenstellung von sektoralen Teilmodellen entstanden.

In der politischen Debatte haben sich die Schwerpunkte von technischen Lösungsansätzen verstärkt in Richtung technisch-ökonomischer Fragestellungen unter Einbezug von Kostenaspekten und wirtschaftlichen Auswirkungen verlagert. Die verschiedenen Modelle kommen hier z.T. zu stark abweichenden Ergebnissen, ohne daß für Außenstehende einsichtig wäre, warum sich für ähnliche Annahmen diese Unterschiede ergeben. Beispielhaft wird dies für die Beschäftigungseffekte von Klimaschutzmaßnahmen in dieser Studie erläutert. Ähnliches gilt für die Potentiale und Auswirkungen beim Einsatz bestimmter Technologien. Für die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird dies im weiteren Verlauf der Arbeit aufgegriffen.

Ziel dieser Studie ist es, Zusammenhänge zwischen Energiemodellen und Fragestellungen herzustellen. Dazu werden:

- mögliche Fragestellungen im Klimaschutz mit Bezug zu Energiemodellen gesichtet und systematisiert,
- der theoretische Hintergrund von Modelltypen beleuchtet und diese verglichen,
- Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Energiemodellen aufgezeigt,
- neue Anwendungsfelder herausgearbeitet.

Dieser Bericht richtet sich nicht nur an das wissenschaftliche und politische Fachpublikum, sondern soll auch der interessierten Öffentlichkeit Einblicke in diese komplexen Zusammenhänge geben. Politische Entscheidungen müssen zwar manchmal ohne wissenschaftliche Bestätigung der Zielhaftigkeit getroffen werden, in

der Regel wird aber auf wissenschaftliche Studien und Modellergebnisse zurückgegriffen, um die eigenen Maßnahmen zu untermauern. Bei Klimaschutz und Energieverbrauchsfragen ergeben sich aber gelegentlich auch widersprüchliche Hinweise für die Politikberatung, wenn verschiedene Energiemodelle bei ähnlichen Fragestellungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Wie es dazu kommen kann und welche strukturellen Unterschiede dabei relevant sind, soll im folgenden Bericht erläutert werden.

Darüber hinaus können nicht alle Energiemodelle alle relevanten Fragestellungen im Klimaschutz bearbeiten. Verschiedene Modelltypen und Einzelmodelle bilden unterschiedliche Schwerpunkte. Ziel dieses Berichtes ist es auch, einen Überblick über relevante Fragestellungen zu geben und die Möglichkeiten und Grenzen für die Bearbeitung bestimmter Fragestellungen durch verschiedene Modelltypen und Einzelmodelle zu erläutern.

Diese Studie ist wie folgt aufgebaut: Den Einstieg bildet eine Übersicht über Fragestellungen im Klimaschutz (siehe Kapitel 2). Hier wird ein Fragenkatalog erstellt und mögliche Fragestellungen werden systematisiert, die im Zusammenhang mit Energiemodellen relevant sein könnten. Anschließend folgt in Kapitel 3 eine Strukturierung der Zusammenhänge der für Energiemodelle relevanten Komponenten bzw. Elemente anhand von Schaubildern. Ziel ist es, unterschiedliche Denkweisen und Schwerpunktsetzungen in der Modellierung darzustellen. Danach werden in Kapitel 4 die verschiedenen Modellansätze und die Typen von Energiemodellen vorgestellt sowie die theoretischen Grundlagen und die praktische Umsetzung der wesentlichen Modelltypen erläutert. In Kapitel 5 werden ausgewählte Einzelmodelle dargestellt. In Kapitel 6 folgen kritische Faktoren und systematische Unterschiede von Energiemodellen. Die Anwendung der Energiemodelle wird in Kapitel 7 anhand einiger praktischer Beispiele erläutert. Schließlich werden in Kapitel 8 Angaben zu Unterschieden zwischen den Modelltypen und Einzelmodellen gemacht und dabei die Stärken und Schwächen der Modellansätze beschrieben. In Kapitel 9 wird versucht, Hinweise auf die Eignung von Modelltypen und Einzelmodellen in Bezug auf die Bearbeitung von unterschiedlichen Fragestellungen im Klimaschutz anhand der in Kapitel 2 entworfenen Struktur zu gewinnen und neue Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Abschließend folgt in Kapitel 10 eine Zusammenfassung mit Schlußfolgerungen.

2 FRAGESTELLUNGEN ZUM KLIMASCHUTZ

Fragestellungen zum Klimaschutz zeichnen sich durch ein hohes Maß an Komplexität aus. Eine Vielzahl von Aspekten gesellschaftlicher, ökonomischer und technischer Art ist relevant. Im folgenden wird die Vielfältigkeit dieser Fragestellungen illustriert. Fragen werden aus verschiedenen Kontexten u.a. der Klimaschutzstrategie der Bundesregierung, der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ und von Umwelt- und Wirtschaftsverbänden aufgegriffen.

Kapitel 2.1 umfaßt einen Fragenkatalog mit den Schwerpunkten nationale und internationale Aktivitäten sowie zukünftige Entwicklungen von Energietechnologien und Energiemärkten. Diese Zusammenstellung soll einen Einblick in die Vielfältigkeit möglicher Fragestellungen geben.

In Kapitel 2.2 werden die Komponenten von Fragestellungen systematisiert. Es werden als umfassende Bereiche „Ursachen“, „Wirkungen“ und „Maßnahmen“ sowie zusätzlich „übergreifende Dimensionen“ definiert. Diese werden in Teilbereiche und Kategorien aufgeteilt. Anschließend werden vielfältige Aspekte diesen zugeordnet. Über die Markierung relevanter Aspekte kann letztlich eine Gegenüberstellung von Fragestellungen und Energiemodellen erfolgen.

Während in Kapitel 3 die Methodik entwickelt wird, folgt die Umsetzung und Anwendung dieses Ansatzes in Kapitel 9. Dort wird beispielhaft für einige Fragestellungen und für die in Kapitel 5 vorgestellten Typen von Energiemodellen eine Zuordnung zu Elementen zum Strukturierungsansatz gemacht und verglichen.

2.1 Katalog von Fragestellungen zum Klimaschutz

Aus der praktischen Politikberatung heraus sind eine Vielzahl von Fragestellungen zum Klimaschutz bekannt, die für Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit von

Interesse sind. Diese reichen von spezifischen Teilaspekten bis hin zu hochkomplexen Fragen. Beispiele sind:

- Welche Energiepreiserhöhung ist über welchen Zeitraum sinnvoll und geboten, um einerseits Emissionsreduktionen zu forcieren, aber andererseits die internationale Wettbewerbsfähigkeit nicht zu gefährden?
- Ist eher die Brennstoffzellentechnologie A oder B für mobile Anwendungen als zukunftssträchtig zu betrachten und zu fördern?
- Ist es vorteilhafter, heute in den Ausbau des Einsatzes regenerativer Energien zu investieren oder sollte vielmehr erst weiter zu regenerativen Energien geforscht werden, um die Zuverlässigkeit und die Gestehungskosten zu mindern, und um anschließend in deren Ausbau zu investieren?

Der Fragenkatalog ist im folgenden Kasten zusammengestellt. Er wurde schwerpunktmäßig aus der wissenschaftlichen Literatur und aus dem aktuellen energie- und umweltpolitischen Kontext zusammengetragen. Die verschiedenen „Fragestellungen für die praktische Politikberatung zum Thema Klimaschutz“ wurden zu folgenden Fragengruppen strukturiert:

- Nationale Klimaschutzstrategie
- Internationale Effekte von nationalen Klimaschutzstrategien
- Internationales Umfeld der Klimarahmenkonvention
- zukünftige Entwicklung von Technologien und ihre Bewertung
- zukünftige Entwicklung der Energiepreise, Energienachfrage und Energiemixes

Die hier erwähnten Fragen können nicht die gesamte Fülle möglicher Fragestellungen abdecken. Sie sollen aufzeigen, welches breite Spektrum an Fragen relevant ist.

Die Fragestellungen haben unterschiedliche Bezugsräume (lokal – regional – national – multinational – global). Hinsichtlich der Zeitperspektive ist grundsätzlich zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft zu unterscheiden. Schwerpunkte in der Politikberatung bilden naturgemäß Fragen zur zukünftigen Entwicklung, aber auch die Vergangenheit ist relevant. So wird die Berücksichtigung historischer Emissionen bei der internationalen Aufteilung von zukünftigen Emissionszielen diskutiert und

insbesondere von Dritte Welt Ländern unterstützt. Projektionen der zukünftigen Entwicklung beruhen nicht selten auf Schlußfolgerungen aus Entwicklungen in der Vergangenheit. Für zukünftige Entwicklungen ist hinsichtlich verschiedener Zeithorizonte (kurzfristig, mittelfristig, langfristig) zu unterscheiden. Diese Aspekte werden im Kapitel 2.2.2.1 unter der Überschrift „übergreifende Dimensionen“ im Detail erläutert.

Der Fragenkatalog gibt zwar eine Übersicht über Fragestellungen, ist aber aus sich selbst heraus nur von begrenztem Nutzen für die Erstellung eines Zusammenhangs zwischen Fragestellungen und Energiemodellen oder für Hinweise zu bisher nicht betrachteten Fragestellungen. Im folgenden wird daher ein weiterer Strukturierungsansatz zur Systematisierung und Ableitung von Fragestellungen im Klimaschutz vorgestellt. Hier werden Teile der obigen Kategorien aufgegriffen, aber der Großteil neu ergänzt.

Katalog von Fragestellungen für die praktische Politik-Beratung zum Thema Klimaschutz

Nationale Klimaschutzstrategie:

- Wie weit sind wir zur Zeit von einer nachhaltigen Energieversorgung und -nutzung mit den erforderlichen Emissionsminderungen bei vertretbaren Kosten entfernt?
- Welche Reduktionsziele sollten die einzelnen Wirtschaftssektoren erfüllen? Welche Instrumente sollten angewendet werden? Welche Prioritäten sollten bei nicht-CO₂ Treibhausgasen gesetzt werden? Wie sollte die zeitliche Staffelung der weiteren Minderungsziele aussehen?
- Welche Akteure sind betroffen?
- Welche volkswirtschaftlichen bzw. betriebswirtschaftlichen Kosten entstehen? Mit welchen Auswirkungen für die öffentlichen und privaten Haushalte ist zu rechnen?
- Mit welchen Wohlfahrtsveränderungen ist zu rechnen?
- Welche Arbeitsplatzeffekte sind zu erwarten?
- Welche Veränderungen hinsichtlich Veränderung der Wirtschaftsstruktur bzw. Strukturwandel sind zu erwarten?
- Wie hoch sind die Preiseffekte von Klimaschutzmaßnahmen?
- In welchem Umfang werden sich die Energieverbräuche ändern?
- Sind Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit zu erwarten?
- Wie wird sich die Energieträgerstruktur verändern?
- Wie kann eine 25 %-ige CO₂-Minderung im Straßenverkehr erreicht werden?
- Welche Auswirkungen auf die Forschung und Entwicklung von Energietechnologien sind zu erwarten?
- Wie verändert sich die Energienachfrage? Insgesamt, bezogen auf einzelne Energieträger, für einzelne Wirtschaftssektoren

Internationale Einordnung von nationalen Klimaschutzstrategien:

- Welche Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen auf Entwicklungsländer, auf Öl- und Kohleförderländer und osteuropäische Länder sind zu erwarten?
- Wie werden die Handelsströme (z.B. "Carbon-Leakage") beeinflusst?
- Wie ist das „Europäischen Burden Sharing“ zu bewerten?
- Welche Einflüsse auf den Strom-Handel sind zu erwarten?

Internationales Umfeld der Klimarahmenkonvention:

- In welcher Form sind die Emissionsinventare anderer Länder zu validieren?
- In welcher Form sind die Emissionsszenarien anderer Länder zu validieren?
- Welche Reduktionspotentiale sind in anderen Ländern für die Umsetzung von Joint Implementation und Clean Development Mechanism erkennbar?
- Wie ist die Wirksamkeit verschiedener Emissionszertifikatesysteme?
- Welche Langzeitstrategien für den Klimaschutz sind zu entwickeln?
Unter Berücksichtigung folgender Aspekte: Bewertung verschiedener Emissionstrajektorien, Potentialanalysen von "CO₂ Capture / Disposal", Konzepte des "Geoengineering", Adaptionstrategien, Konzepte der Wasserstoffwirtschaft, Konzepte des Gebäudebereichs, Konzepte der Verkehrs.
- Welcher Nutzen geht von der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen aus?
Unter Berücksichtigung folgender Aspekte: Meeresspiegelanstieg, Agrar- und Forstökosystemschäden, Witterungsanomalien (Dürren, Stürme, Überschwemmungen), Krankheiten und Seuchen, Emission anderer Luftschadstoffe.

Zukünftige Entwicklung von Technologien und ihre Bewertung:

- Welche Auswirkungen von Technologieentwicklung hat die Nutzung von flexiblen Instrumenten des Protokolls von Kioto?
- Welche Arten der Förderung neuer Energietechnologien sind zu bevorzugen?
- Welchen volkswirtschaftlichen Nutzen hat die Technologieführerschaft eines Landes?
Beispiele: erneuerbare Energien, Dämmtechniken oder Gebäudeenergiemanagement

Zukünftige Entwicklung der Energienachfrage, der Energiepreise und des Energiemixes:

- Welche globale und nationale Entwicklung ist zu erwarten?
- Wie wird die Entwicklung für die Wirtschaftssektoren aussehen?
- Welche Entwicklungen sind für konventionelle Energieträger (Öl, Gas, Kohle) und für erneuerbare Energieträger (Photovoltaik, Biomasse, Wind, Wasser) zu erwarten?

2.2 Ansätze zur Strukturierung von Fragestellungen zum Klimaschutz

Bei Fragen zum Klimaschutz und zur Klimapolitik ist eine Vielzahl von Disziplinen und Wirtschaftsbereichen betroffen. Zur systematischen Strukturierung von Fragestellungen wird hier ein Ansatz verwendet, der auch in Form eines Clusters dargestellt werden kann. Über Verknüpfungen von Kategorien und Aspekten können neue Fragestellungen entwickelt und Zusammenhänge zwischen Energiemodellen und Fragestellungen hergestellt werden.

Die Strukturierung der Fragestellungen im Klimaschutz wird im folgenden mehrstufig erarbeitet. Im ersten Schritt werden in Kapitel 2.2.1 anhand der Ursache-Wirkung-Maßnahmen Beziehung die grundlegenden Zusammenhänge entwickelt. Im zweiten Schritt (Kapitel 2.2.2) wird die Vielzahl möglicher Kategorien und Aspekte erläutert. In Kapitel 2.2.3 wird die Anwendung dieser Übersicht auf neue Fragestellungen vorgestellt und die Anwendbarkeit der Energiemodelle aufgezeigt.

Ziel der Entwicklung dieses Strukturierungsansatzes ist es, die Anwendbarkeit von Modellen für verschiedene Fragestellungen zu diskutieren. In Kapitel 9 wird beispielhaft für einige Fragestellungen und für die Energiemodelltypen dieser Ansatz verfolgt.

2.2.1 Grundlegende Zusammenhänge

Folgende Grundzusammenhänge im Klimaschutz werden hier unterschieden: Ursache-Wirkung-Maßnahmen. Dieser Ansatz orientiert sich an der Strukturierung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Hier beschäftigt sich Working Group I mit den naturwissenschaftlichen Aspekten des Klimasystems und der Klimaveränderungen, Working Group II mit den sozio-ökonomischen

Auswirkungen und der Verwundbarkeit natürlicher Systeme und Working Group III mit den Emissionsminderungsoptionen¹.

Diese Bereiche stehen in folgendem Zusammenhang: Treibhausgasemissionen bilden die Ursache für Veränderungen des Strahlungshaushaltes der Erdatmosphäre und sind letztlich verantwortlich für Klimaveränderungen auf der Wirkungsebene. Um diese Folgen zu verhindern bzw. abzumildern, sind Maßnahmen erforderlich, die letztlich dazu führen, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Der Zusammenhang zwischen diesen Bereichen wird im folgenden grafisch veranschaulicht (siehe Abb. 2.1).

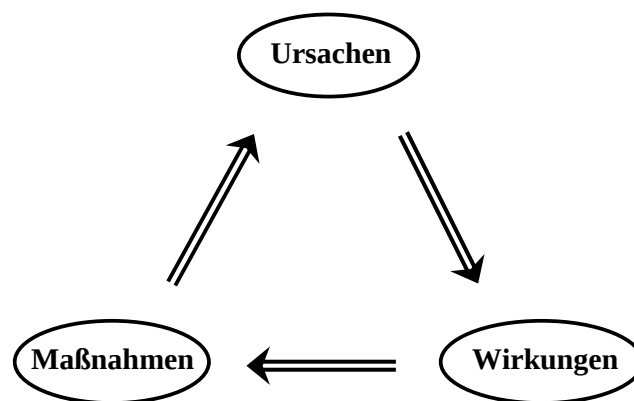


Abb. 2.1 Zusammenhang der Bereiche von Fragestellungen im Klimaschutz²

Ergänzend zur Veranschaulichung der Komplexität möglicher Fragestellungen im Klimaschutz wird im folgenden zusätzlich der Bereich „übergreifende Dimensionen“ hinzugefügt.

Alle vier Bereiche werden zur weiteren Strukturierung in eine Reihe von Teilbereichen und Kategorien unterteilt. Eine Übersicht hierzu gibt Tabelle 2.1.

¹ Im Unterschied zur hier gewählten Differenzierung faßt das IPCC die physischen Ursachen und Wirkungen in der Arbeitsgruppe I zusammen und beschäftigt sich in der Arbeitsgruppe II nur mit sozio-ökonomischen Auswirkungen.

Der Bereich „übergreifende Dimensionen“ umfaßt hier vier Kategorien: räumliche Ausdehnung, Zeitperspektive, Zeithorizont und Wissenschaftsdisziplin. Der Bereich „Ursachen“ unterteilt sich in die Teilbereiche CO₂-Quellen und Senken sowie Quellen anderer Treibhausgase. Im Bereich „Wirkungen“ wird zwischen den physischen Klimafolgen und den sozio-ökonomischen Effekten unterschieden. Im Bereich „Maßnahmen“ wurden die Kategorien klimapolitische Grundstrategien, nationale Politiken, Förderinstrumente, prioritäre Technologien und internationale Maßnahmen unterschieden.

Der hier verfolgte Ansatz geht über die von Energiemodellen üblicherweise betrachteten Felder weit hinaus. Es werden in Kapitel 2.2.2.1 – 2.2.2.6 auch Bereiche berücksichtigt, die im grundsätzlichen Zusammenhang mit Klimaschutz und Klimaveränderungen stehen, aber nicht direkt dem Energiesektor zuzuordnen sind. Im anschließenden Kapitel 2.2.2.7 werden die Bereiche hervorgehoben, die im konkreten Zusammenhang mit Energiemodellen stehen.

Zu allen Kategorien werden nun Aspekte zusammengestellt, über deren Verknüpfung der Zusammenhang zwischen Fragestellungen und Energiemodellen hergestellt werden soll und möglicherweise neue Fragestellungen abgeleitet. Zur Organisation der Aspekte wird eine Struktur gewählt, die auch als Cluster dargestellt werden kann. Es ist nicht zwingend erforderlich, daß Aspekte aus allen Bereichen zur Ableitung neuer Fragestellungen verknüpft werden. Fragestellungen können auch durch die Ausformulierung einzelner Aspekte abgeleitet werden.

² Zusätzlich zu den hier vorgestellten Bereichen Ursache-Wirkung-Maßnahmen wurde noch ein weiterer Bereich als wesentlich identifiziert: „übergreifende Dimensionen“.

Tab. 2.1 Übersicht über die Bereiche und Kategorien von Fragestellungen zum Klimaschutz

<i>Bereiche:</i>	übergreifende Dimensionen	Ursachen		Wirkungen		Maßnahmen
<i>Teilbereiche:</i>		CO₂-Quellen und Senken	Quellen anderer Klimagase	physische Effekte	sozio-ökonomische Effekte	
<i>Kategorien:</i>	Räumliche Ausdehnung	Energieträger und -quellen	Methan	Klima	Volkswirtschaft	klimapolitische Grundstrategien
	Zeitperspektive	Komponenten Energiebilanz	Lachgas	Wasser	Gesellschaft	Instrumente
	Zeithorizont	Sektoren	fluorierte Gase	Boden	Internationales	technologische Optionen
	Wissenschaftsdisziplin	Energiesystemstruktur	Aerosole	biologische Ressourcen		internationale Maßnahmen
		Differenzierung Ganglinien Senken	Ozon	Menschen		

2.2.2 Übersicht über die Teilbereiche

Im folgenden werden die in Tabelle 2.1 erwähnten Teilbereiche im Detail erläutert.

2.2.2.1 Übergreifende Dimensionen

Der Bereich „übergreifende Dimensionen“ faßt eine Reihe von Kategorien aus dem Bereich Betrachtungsraum und –horizont zusammen:

- räumliche Ausdehnung
- Zeitperspektive
- Zeitraum
- Wissenschaftsdisziplin

Insgesamt umfaßt dieser Teilbereich folgende Aspekte (siehe Tabelle 2.2):

Tab. 2.2 Kategorien und Aspekte des Bereichs „übergreifende Dimensionen“

räumliche Ausdehnung	Zeitperspektive	Zeithorizont	Wissenschaftsdisziplin
Individuum	Vergangenheit	kurzfristig	Technik
lokal	Gegenwart	mittelfristig	Ökonomie
regional	Zukunft	langfristig	Mathematik
national			Chemie
multinational			Physik
global			Biologie
			Soziologie
			Philosophie
			Psychologie
			Recht

Als eine wichtige Kategorie ist die Systemgrenze bzw. der räumliche Bezug zu nennen. Dieser kann vom Individuum (Welche Beiträge können Einzelpersonen bzw. Haushalte zum Klimaschutz in welchem Umfang leisten?), über lokale Themen (kommunale Klimaschutzkonzepte), regionale Studien (Welche Auswirkungen haben Klimaveränderungen auf den Weinbau in Rheinland-Pfalz?), nationale und multinationale Fragen bis hin zu globalen Ansätzen reichen.

Fragen der Zeitperspektive und des Zeithorizontes gehören auch zu den wichtigen Kategorien. Während manche Fragen rein retrospektiv (Wie haben sich die Brennstoffverbräuche und die CO₂-Emissionen in der Vergangenheit entwickelt?) betrachtet werden, beschäftigen sich andere Fragen mit der Gegenwart (Erstellung eines Inventars der heutigen Emissionen) oder versuchen, zukünftige Entwicklungen vorauszusagen (z.B. die Rolle von Methan im Vergleich zu anderen Treibhausgasen in der Zukunft). Im Vordergrund der praktischen Politikberatung stehen meist Fragen der zukünftigen Entwicklung.

Erhebliche Unterschiede ergeben sich auch beim Zeithorizont. Für Modelle ist zwischen kurzfristigen (bis 5 Jahre), mittelfristigen (5-20 Jahre) und langfristigen (mehr als 20 Jahre) Entwicklungen zu unterscheiden. Während kurzfristige Veränderungen schwerpunktmäßig auf systemkonforme, innerhalb vorhandener Strukturen umsetzbare Maßnahmen abzielen, sind für langfristige Entwicklungen stärker vorhandene Strukturen zu hinterfragen und beziehen eher Systemveränderungen mit ein.

Eine weitere wesentliche Kategorie ist die Frage der Wissenschaftsdisziplin. Studien im Zusammenhang mit Klimaschutz sind zwar in zunehmendem Maße interdisziplinär ausgelegt, haben aber oft weiterhin eine Schwerpunktdisziplin. Für Fragen zum Klimaschutz sind wesentliche Disziplinen: Technik, Ökonomie, Mathematik, Chemie, Physik, Biologie, Soziologie, Philosophie, Psychologie und Recht. Soziologische und rechtliche Aspekte des Klimaschutz gehören zu den weniger erforschten Gebieten, während psychologische und philosophische Aspekte besonders unterbelichtet waren³.

³ Zur Erläuterung der bisherigen Bearbeitungstiefe siehe Kapitel 2.2.3.

2.2.2.2 CO₂-Quellen und Senken⁴

Als weiterer Teilbereich innerhalb des Bereichs „Ursachen“ sind die CO₂-Quellen zu nennen, die auch für Energiemodelle von großer Bedeutung sind. Im Teilbereich CO₂-Quellen sind folgende Kategorien zusammengefaßt:

- Energieträger und -quellen
- Komponenten der Energiebilanz
- Sektoren
- Energiesystemstruktur
- Differenzierung Ganglinien
- Senken

Zu den jeweiligen Aspekten siehe die folgende Tabelle 2.3:

Tab. 2.3 Kategorien und Aspekte des Teilbereichs „CO₂-Quellen“

Energieträger und -quellen	Komponenten der Energiebilanz	Sektoren	Energiesystemstruktur	Differenzierung Ganglinien	Senken
Öl	Reserven	Energieversorgung	zentral	Jahresmittel	Biomasse
Gas	Rohstoffgewinnung	Verkehr	dezentral	Tagesgang	Böden
Steinkohle	Transport	Industrie	Insel	Wochengang	Wälder
Braunkohle	Umwandlung	Land- und Forstwirtschaft		Jahresgang	Meere
Kernenergie	Verbrauch	Bergbau			
Wasser		Haushalte			
Biomasse		Kleingewerbe/ Handel			
Wind					
Solarthermie					
Photovoltaik					
Strom					

⁴ Im strengen Sinne sind nicht alle hier vorgestellten Kategorien und Aspekte CO₂-Quellen, sondern um energetische Prozesse und Technologien, die letztlich zu CO₂-Emissionen beitragen können oder andere CO₂-Quellen substituieren.

Bei der Energiemodellierung, insbesondere als physisches System, steht die Frage der Energieträger und Energiequellen mit ihren technischen und ökonomischen Spezifikationen im Vordergrund. Als Energiequellen sind relevant: Steinkohle, Braunkohle, Öl, Gas, regenerative Energien (Wasser, Biomasse, Wind, Solarthermie, Photovoltaik), Kernenergie und Strom.

Als weitere Kategorie ist ebenfalls die grundsätzliche Energiesystemstruktur mit dem Grad der Zentralisierung bzw. Dezentralisierung zu nennen. Die Übergänge sind hier fließend und je nach Perspektive, Systemgrenze etc. können bestimmte Lösungen als zentral bzw. dezentral strukturiert betrachtet werden. So bedeutet der Einsatz eines BHKWs für die Nahwärmeversorgung eine Zentralisierung der Wärmeversorgung aber gleichzeitig eine Dezentralisierung der Stromerzeugung. Grundsätzlich sind als Energiesystemstrukturen zu nennen: zentrale Systeme, dezentrale Systeme und Insellösungen.

Energiemodelle setzen unterschiedliche Schwerpunkte, hinsichtlich einzelner Komponenten der Energieerzeugungs- und -verbrauchskette. Am Anfang stehen die Energiereserven und die Rohstoffgewinnung, dann der Transport und die Umwandlung der Energieträger bis hin zum Verbrauch.

Die Sektoren werden in Energiemodellen unterschiedlich stark differenziert. Während Energieversorgung, Haushalte, Verkehr, Industrie und Kleingewerbe/Handel aufgrund ihrer Bedeutung meist detailliert modelliert werden, ist dies für Land- und Forstwirtschaft und Bergbau meist nicht gegeben. Es gibt Modelle z.B. PANTA RHEI, die die Strukturierung der Input-Output-Tabelle unverändert übernehmen. Andere Modelle (z.B. MIS) differenzieren weiter für die wesentlichen Energiebereiche, während weniger relevante Bereiche zusammengefaßt werden. Neben den Modellen, die alle Sektoren abdecken, existieren auch Modelle, die nur Teilsektoren betrachten, so das TREMOD-Modell des IFEU-Instituts für den Verkehrssektor⁵.

⁵ Siehe hierzu eine ausführliche Diskussion der Behandlung des Verkehrsbereichs in Energiemodellen in Kapitel 7.3.

Es wird von den Modellen unterschiedlich gehandhabt, ob und wie detailliert Ganglinien des Strom-, Wärme- und Gasverbrauchs modelliert werden. Modelle differenzieren in unterschiedlichem Maße diese Ganglinien, die als Tages-, Wochen- und Jahresgänge beschrieben werden. Z.T. werden typische Perioden modelliert. In vereinfachter Form wird von den Jahresmittelwerten ausgegangen.

Neben den Quellen von Klimagasen tauchen die Senken auch verstärkt in politischen Debatten auf. Als relevante CO₂-Senken gelten Biomasse, Böden, Wälder und Meere.

2.2.2.3 Quellen anderer Klimagase

Eine umfassende Modellierung zum Klimaschutz sollte neben CO₂ auch andere Klimagase berücksichtigen. Unter dem Teilbereich „Quellen anderer Klimagase“, der zum Bereich „Ursachen“ gehört, werden hier Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), fluoridierte Gase, Aerosole und Ozon weitergehend betrachtet. Diese Treibhausgase werden nur teilweise energiebedingt emittiert.

Neben der Erdgasversorgung spielen die Landwirtschaft (Tierhaltung, Pflanzenbau) und die Entsorgungswirtschaft (Deponien, Kläranlagen) eine wesentliche Rolle als CH₄-Quellen. Für N₂O sind Landwirtschaft und Industrie als nicht-energiebedingte Quellen sowie Straßenverkehr und Energieversorgung von Bedeutung. Relevante Quellen für fluoridierte Gase haben keinen direkten Energiebezug: Kälte- und Klimatechnik, Isolierschäume und Leichtmetallindustrie. Für Aerosole sind neben Kraftwerken und Industrie auch natürliche Quellen (Meere, biologische Quellen) zu nennen. Troposphärisches Ozon entsteht als sekundäres Reaktionsprodukt anderer Luftschadstoffe. Stratosphärisches Ozon hat an den Polen aufgrund von Emissionen halogener Verbindungen (FCKW u.a.) abgenommen. Sowohl troposphärisches als auch stratosphärisches Ozon beeinflussen den Strahlungshaushalt der Erde.

Die folgende Tabelle 2.4 gibt eine zusammenfassende Übersicht über relevante Quellen.

Tab. 2.4 Nicht-CO₂ Treibhausgase und einige bedeutende Verursacher

Methan	Lachgas	Fluorierte Gase	Aerosole	troposphärisches Ozon	stratosphärisches Ozon
Landwirtschaft	Landwirtschaft	Kälte- und Klimatechnik	Energieerzeugung	Methan	FCKW
Abfallwirtschaft	Industrie	Isolierschäume	Industrie	CO	andere halogenierte Verbindungen
Energieerzeugung	Straßenverkehr	Leichtmetallindustrie	Meere	NO _x	
	Energieerzeugung		biologische Quellen	Kohlenwasserstoffe	

Insgesamt bleibt z.Zt. der Bereich der Nicht-CO₂ Klimagase in vielen Energiemodellen ausgeblendet. Dies hat weniger mit den fehlenden Möglichkeiten der Einbeziehung als vielmehr mit den begrenzten Ressourcen zu tun.

2.2.2.4 Physische Effekte

Zum Teilbereich „physische Effekte“ oder auch Klimafolgen wurden folgende Kategorien identifiziert:

- Klima
- Wasser
- Boden
- biologische Ressourcen
- Menschen

Beispielhaft sind einzelne Aspekte in der folgenden Tabelle 2.5 vorgestellt:

Tab. 2.5 Kategorien und Aspekte des Teilbereichs „physische Effekte“

Klima	Wasser	Boden	biologische Ressourcen	Menschen
Temperatur	Meeresströme	Wüstenbildung	Waldbedeckung	Krankheiten
Niederschläge	Meeresspiegel	Bodenerosion	Biodiversität	Trinkwasser- versorgung
Wolkenbildung	Hochwasser- ereignisse Fischerei Küstenschutz Eisbedeckung		Biomasse- produktion	Lebensmittel- versorgung

Die physischen Effekte im Zusammenhang mit Klimaveränderungen reichen von Veränderungen bzgl. Temperatur, Niederschläge und Wolkenbildung der Atmosphäre bis hin zu Veränderungen der Hydrosphäre, der Böden, der Vegetation und anderer biologischer Ressourcen. Diese Veränderungen können auch direkt negative Auswirkungen haben, indem die Häufigkeit von Krankheiten zunimmt, die Trinkwasserversorgung gefährdet wird oder die Lebensmittelversorgung durch die Landwirtschaft nicht gesichert ist.

Diese physischen Effekte werden z.T. ökonomisch bewertet, um in Kosten-Nutzen-Abwägungen einbezogen werden zu können. Die meisten der gebräuchlichen Energiemodelle beziehen allerdings die Frage der Klimafolgen und des Nutzens von Klimaschutzmaßnahmen nicht explizit ein, sondern akzeptieren politische Vorgaben als gegeben und zielen auf eine Optimierung z.B. in der konkreten Ausgestaltung innerhalb der Reduktionsziele. Falls beabsichtigt ist, Nutzenaspekte in die Energiemodellierung einzubeziehen, wird die intensive Auseinandersetzung mit der Quantifizierung und Monetarisierung der Klimafolgen erforderlich sein.

2.2.2.5 Sozio-ökonomische Effekte

Als letzter relevanter Teilbereich innerhalb des Bereichs „Wirkungen“ wurden „sozio-ökonomische Effekte“ identifiziert. Dieser umfaßt folgende Kategorien:

- Volkswirtschaft
- Gesellschaft
- Internationales

Diese wurden in folgende Aspekte unterteilt (siehe Tabelle 2.6):

Tab. 2.6 Kategorien und Aspekte zum Teilbereich „sozio-ökonomische Effekte“

Volkswirtschaft	Gesellschaft	Internationales
Bruttoinlandsprodukt	Einkommensverteilung	Entwicklungshilfe
Investitionen	Versorgungssicherheit	Internationale Lastenverteilung
Außenhandelsbilanz	Gerechtigkeit	Internationaler Handel
Staatsquote	Armut	
Beschäftigung	Arbeitslosigkeit	
	Intergenerationsfragen	

Die Kategorie „Volkswirtschaft“ mit den Aspekten Bruttoinlandsprodukt, Investitionen, Außenhandelsbilanz, Staatsquote und Beschäftigung wurde und wird mit energieökonomischen Modellen intensiv bearbeitet. Die Kategorie „Gesellschaft“ mit den Aspekten Einkommensverteilung, Versorgungssicherheit, Gerechtigkeit, Armut, Arbeitslosigkeit und Intergenerationsfragen sind z.T. schwierig in ökonomischen Kategorien einzubeziehen und bleiben daher bei der Anwendung von Energiemodellen oft außen vor. Die Kategorie „Internationales“ mit den Aspekten Entwicklungshilfe, internationale Lastenverteilung und internationaler Handel werden in Zukunft mit der Umsetzung der COP6bis Beschlüsse größere Beachtung finden.

2.2.2.6 Maßnahmen

Im Rahmen der Umsetzung von Klimaschutz stellt sich die Frage, welche Maßnahmen kostenminimal, sozial und international ausgewogen die Vorgaben erfüllen. Zu den Teilbereichen des Maßnahmenkomplexes zählen:

- klimapolitische Grundstrategie
- Instrumente
- technologische Optionen
- internationale Maßnahmen

Die jeweiligen Aspekte sind in der folgenden Tabelle 2.7 ausgeführt:

Tab. 2.7 Kategorien und Aspekte zum Bereich „Maßnahmen“

klimapolitische Grundstrategien	Instrumente	technologische Optionen	internationale Maßnahmen
Vorsorgeprinzip	Ordnungsrecht	Effizienzsteigerung Endverbrauch	Emissionshandel
No-Regret-Politik	Steuern/Abgaben	Umwandlungs- technologien	Joint Implementation
Anpassung (Adaptation)	Zertifikate/Emissionshandel	erneuerbare Energien	Clean Development Mechanism
Laissez Faire	freiwillige Selbstver- pflichtungen	CO ₂ storage / removal	Verifikation
	Subventionen		Emissionsquoten
	Festpreisgarantien		
	Quoten		
	Forschung und Entwicklung		

Eine wichtige Kategorie ist die klimapolitische Grundstrategie: Diese kann die Aspekte Vorsorgeprinzip, No-Regret-Politik, Anpassung (Adaptation) sowie Laissez-Faire umfassen. Im Rahmen von Energiesystemmodellen⁶ werden i.d.R. Szenarien entwickelt, die ein mehr oder weniger breites Spektrum dieser Grundstrategien umfaßt und diese noch weiter differenziert. Die Bezüge der einzelnen Modelltypen zu No-Regret-Politiken wird im Detail im Kapitel 6.2 vorgestellt.

⁶ siehe Kapitel 4.1

Grundsätzlich sind alle Modelltypen mit den verschiedenen Grundstrategien - mit Einschränkungen für die No-Regret-Politiken - kompatibel.

„Instrumente“ ist eine weitere Kategorie mit den Aspekten Ordnungsrecht, Steuern/Abgaben, Zertifikate, freiwillige Selbstverpflichtungen, Subventionen, Festpreisgarantien, Quoten, Forschung und Entwicklung. Ordnungsrechtliche Maßnahmen sind für Energiewirtschaftsmodelle⁷ nur schwer abzubilden, während sie einfach auf ökonomische Instrumente (Steuern/Abgaben und Zertifikate) anwendbar sind. Energiesystemmodelle⁸ bieten gewisse Vorzüge für die Analyse ordnungsrechtlicher Maßnahmen.

Eine oft gestellte Fragestellung in diesem Zusammenhang ist, ob es sinnvoller ist, heute in die Verbreitung regenerativer Energien zu investieren oder erst in die Weiterentwicklung dieser Technologien, um dann später eine bessere Konkurrenzfähigkeit und eine leichtere Marktdurchdringung zu erzielen. Instrumente, die auf ökonomischen Ansätzen (Steuern, Subventionen) beruhen, sind tendenziell günstiger mit Energiewirtschaftsmodellen⁹ zu begutachten, während andere Ansätze (Quoten, Festpreisgarantien) leichter mit Energiesystemmodellen¹⁰ zu modellieren sind.

Bei einer technologisch orientierten Herangehensweise steht die Frage im Vordergrund, welche Technologien am vielversprechendsten für die CO₂-Minderung sind. Grundsätzlich ist zwischen technischen Optionen auf der Verbrauchsseite (Steigerung der Effizienz von Energieverbräuchen), Optimierung von Umwandlungstechnologien, Ausweitung des Einsatzes erneuerbarer Energien und der Umsetzung von CO₂-storage/removal. Diese einzelnen Teilbereiche können weiter differenziert werden bzw. spezifiziert werden. So kommen z.B. im Bereich der Umwandlungstechnologien Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Gas- und Dampfturbine (GuD) und die Brennstoffzelle in Frage. Der Aspekt „CO₂ storage/removal“¹¹ fällt

⁷ siehe Kapitel 4.2 und 4.3

⁸ siehe Kapitel 4.4 und 4.5

⁹ Eine ausführliche Erläuterung der Energiewirtschaftsmodelle siehe in Kapitel 4.2 und 4.3.

¹⁰ Eine ausführliche Erläuterung der Energiesystemmodelle siehe in Kapitel 4.4 und 4.5.

¹¹ Unter CO₂-storage/removal werden Technologien verstanden, wo die Energieerzeugung weiter auf fossilen Brennstoffen basieren und CO₂ freigesetzt wird, dieses aber nicht in die Atmosphäre emittiert

ebenfalls unter die technologischen Optionen. Dieser Ansatz wird in einigen Ländern als kostengünstige nachsorgende Technologien diskutiert. Um die technologischen Optionen zu modellieren, bieten die Energiesystemmodelle Vorzüge.

Klimaschutz als internationales Problem und die Zunahme der internationalen wirtschaftlichen Verflechtungen eröffnet einen großen Spielraum für internationale Maßnahmen. Diese können Emissionshandel, Joint Implementation (JI) und Clean Development Mechanism (CDM), aber auch die Verifikation umfassen. Der letzte Aspekt ist insgesamt schwierig zu modellieren, während die übrigen eher einen konkreten Projektbezug haben und daher eher mit Energiesystemmodellen besser zu erfassen sind.

2.2.2.7 Konkretisierung des Bezugs zu Energiemodellen

Nicht alle der oben dargestellten Teilbereiche sind für Energiemodelle gleichermaßen relevant.

CO₂-Senken werden nur in wenigen Energiemodellen berücksichtigt. Ansätze für die Berücksichtigung von CO₂ Senken und naturwissenschaftlicher Kategorien gibt es nur in einzelnen Energiemodellen, hier insbesondere in den Integrated Assessment Modellen¹². Als Beispiel ist hier das Modell von Nordhaus¹³ zu nennen.

Ebenfalls nur am Rande tauchen – wenn überhaupt – nicht-CO₂ Treibhausgase in Energiemodellen auf. Da der Hauptteil der Veränderung des Strahlungshaushalts von Kohlendioxid verursacht wird und die Verbrennung fossiler Energieträger die Hauptursache für die CO₂-Emissionen ist, ist nachvollziehbar, warum Energiemodelle ihren Schwerpunkt bei Kohlendioxid setzen und andere Treibhausgase außen vor bleiben. Nur einzelne Modelle beziehen andere Treibhausgase ein (Beispiel: PERSEUS¹⁴).

wird, sondern anderweitig beseitigt. Ein Beispiel ist die Ableitung von Kraftwerksabgasen in die Tiefsee.

¹² Siehe Kapitel 3.1

¹³ vgl. Nordhaus 1993

Der Bereich „physische Effekte“ wird zum einen in Klimafolgenstudien intensiv bearbeitet und spielt zum anderen bei Energiemodellen mit Kosten-Nutzen-Abwägungen eine wichtige Rolle. In den in dieser Studie betrachteten Energiemodellen bleiben diese Aspekte i.d.R. außen vor, da hier üblicherweise nur Kosteneffektivitätsanalysen und keine Nutzenbetrachtungen auf der Effektseite durchgeführt werden und Minderungsziele nicht in direkter Abhängigkeit von Nutzenkalkulationen festgelegt werden.

Als für Energiemodelle wesentliche Gebiete verbleiben die Bereiche grundsätzliche Kategorien, CO₂-Quellen, Maßnahmen sowie sozio-ökonomische Effekte.

Innerhalb dieser Bereiche ist die Bearbeitungstiefe der einzelnen Aspekte höchst unterschiedlich. Dies liegt im wesentlichen an folgendem:

- Die Modelle haben unterschiedliche Ausrichtungen, entweder einen eher technischen oder eher ökonomischen Hintergrund, mit einer entsprechenden Schwerpunktsetzung.
- Ausgangspunkt bildet die heutige Situation, so daß Aspekte wichtig für den Ist-Zustand im Vordergrund stehen, und Ansätze, die nur möglicherweise in Zukunft relevant sein könnten, verständlicherweise eher unterbelichtet sind.

Für die einzelnen Bereiche ergibt sich folgendes:

Für den Bereich „übergreifende Dimensionen“ stehen Fragen des räumlichen und zeitlichen Bezugs im Vordergrund. Ausgangspunkt der Energiemodelle ist oft die nationale Ebene, von der auf multinationale oder globale Entwicklungen geschlossen wird. Ziel von Energiemodellen ist die Beschreibung zukünftiger Entwicklungen mit kurz- und mittelfristigem, aber auch langfristigem Zeithorizont. Als räumlicher Bezugsraum stehen oft nationale und internationale Betrachtungen im Vordergrund, es gibt aber auch Beispiele für lokale und regionale Anwendungen. Bei den Wissenschaftsdisziplinen stehen Technik und Ökonomie im Vordergrund.

¹⁴ vgl. Kapitel 5.5

Für den Teilbereich „CO₂-Quellen und Senken“ werden die fossilen Brennstoffe als Hauptenergieträger umfassend einbezogen. Aufgrund der Abhängigkeit von politischen Rahmenbedingungen und der dynamischen Entwicklung des Marktes für regenerative Energien werden diese in einigen Modellen erfaßt, in anderen aber wegen der bisher noch marginalen Bedeutung im Vergleich zur fossilen Energieerzeugung nur stark vereinfacht berücksichtigt.

Die Modellierung spiegelt das zentral ausgerichtete Energiesystem mit dezentralen Komponenten wieder. Die Bereiche Umwandlung und Verbrauch stehen im Vordergrund, während vorgelagerte Ketten meist ausgeblendet bleiben. Die Wirtschaftssektoren werden oft in der sektoralen Struktur wiedergegeben, aber z.T. erfolgt auch eine Auflösung auf einer stärker aggregierten Ebene. Für Energiemodelle mit einem starken Hintergrund aus dem Bereich Elektrizität werden Stromganglinien abgebildet. Beispiele sind E3NET und PERSEUS¹⁵.

Aus dem Bereich „Maßnahmen“ kann das gesamte Spektrum klimapolitischer Grundstrategien abgedeckt werden vom „Business-as-usual“ bis hin zu „Maßnahmen unter Vorsorgegesichtspunkten“. Für die nationalen Politiken ist die Abdeckung der einzelnen Kategorien stark abhängig vom Modelltyp: Energietechnisch ausgerichtete Modelle decken ordnungsrechtliche Maßnahmen besser ab, während energieökonomisch ausgerichtete Modelle einen starken Bezug zu ökonomischen Instrumenten haben. Die Frage von Förderinstrumenten und dem Vergleich verschiedener Förderinstrumente stand bisher nicht im Zentrum, aber eine Erweiterung ist prinzipiell möglich. Prioritäre Technologien sind von Energiesystemmodellen intensiv bearbeitet worden. Internationale Maßnahmen sind bisher nur ansatzweise modelliert worden.

Im Bereich „sozio-ökonomische Effekte“ lagen die Schwerpunkte bei volkswirtschaftlichen Indikatoren und Arbeitsmarktaspekten. Gesellschaftliche und soziale Fragen standen bislang ebenso wie Fragen der internationalen Politik weniger im Vordergrund.

¹⁵ siehe Kapitel 5.5

2.2.3 Umsetzung des Strukturierungsansatzes

Neben der Beschreibung der bisher schwerpunktmäßig bearbeiteten Felder dient die Strukturdarstellung der Ableitung neuer Fragestellungen bisher noch wenig untersuchter Felder. In der folgenden Tabelle 2.8 wird die vollständige Struktur für alle in den Kapiteln 2.2.2 erläuterten Kategorien und Aspekte dokumentiert. In Tabelle 2.9 werden die Farben weiß, hellgrau und dunkelgrau verwendet, um anzuzeigen, in welchem Umfang zu den Kategorien und Aspekte bisher geforscht wurde. Der weiße Hintergrund signalisiert, daß hier schon umfangreiche Arbeiten durchgeführt wurden. Die hellgraue Markierung zeigt, daß Forschungsaktivitäten schon stattgefunden haben, aber diese nicht sehr umfangreich waren. Die dunkelgraue Farbe deutet an, daß hier bisher wenig oder gar nicht zu gearbeitet wurde.

Im Rahmen dieses Projektes stehen zwei Aspekte im Vordergrund: die Ableitung neuer Fragestellungen und einen Zusammenhang zwischen Fragestellungen und Energiemodellen herzustellen.

Grundsätzlich gibt es zwei Ansätze zur Ableitung neuer Fragestellungen:

- Fokussierung auf einen Aspekt und Ableitung von Fragestellungen, die im Zusammenhang zwischen diesem Aspekt und Klimaschutz bzw. dem Energiesektor stehen, unter Abwägung, ob und in welchem Maße diese mit Energiemodellen bearbeitet werden können.
- Verknüpfung von Aspekten verschiedener Bereiche und Kategorien: Diese Herangehensweise orientiert sich an der Vorgehensweise des morphologischen Kastens¹⁶. Durch die Verbindung bisher wenig bearbeiteter Aspekte werden Fragen aufgeworfen, die in einigen Fällen wenig Sinn machen, in anderen Fällen aber neue, unkonventionelle Fragen aufwerfen mögen. Dieser Ansatz hilft, weg von den vorhandenen Strukturen und Ansätzen zu denken.

¹⁶ Der morphologische Kasten wird in der Managementberatung als Instrument zur systematischen Erfassung neuer Fragestellungen eingesetzt. Ziel ist es, neue Fragestellungen abzuleiten, die außerhalb des üblichen Horizontes liegen und neue Wege und Zusammenhänge aufzeigen. Ansatzpunkt ist für den Kontext relevante Bereiche, von denen aus Teilbereiche und Kategorien gebildet werden und mögliche Ausprägungen bzw. Aspekte festgelegt werden. Letztlich werden durch die Verknüpfung von Aspekten neue Fragestellungen abgeleitet.

Für die Umsetzung und Anwendung dieses Strukturierungsansatzes wird auf Kapitel 9 verwiesen. Hier wird beispielhaft vorgestellt, wie die Strukturierung und Systematisierung und ggf. Zuordnung von Fragestellungen zu Energiemodellen durchgeführt wird.

Tab. 2.8 Strukturierungsansatz mit Bereichen, Teilbereichen, Kategorien und Aspekten im Zusammenhang mit Fragestellungen zum Klimaschutz

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	national	multinational	global					
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	Zukunft								
Zeithorizont	kurzfristig	mittelfristig	langfristig								
Wissenschaftsdisziplin	Technik	Ökonomie	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	Umwandlung	Verbrauch						
Energiesystemstruktur	zentral	dezentral	Insel								
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	Biomasse	Wind	Solarthermie	Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	Jahresmittel							
Energieverbraucher	Energieversorgung	Verkehr	Industrie	Gebäude	Land- und Forstwirtschaft	Bergbau	Kleingewerbe/Handel				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
CH₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
N₂O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe							
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	Investitionen	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen					
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	Vorsorgeprinzip	No-Regret-Politik	Anpassung (Adaptation)	Laissez Faire							
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbrauch	Umwandlungstechnologien	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal							
Instrumente	Ordnungsrecht	Steuern/Abgaben	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtungen	Subventionen	Festpreisgarantien	Quoten	Forschung und Entwicklung			
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquote						

Tab. 2.9 Strukturierungsansatz mit Angabe zum Umfang bisheriger Arbeiten

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	national	multinational	global					
Zeithorizont	Vergangenheit	Gegenwart	Zukunft								
Zeithorizont	kurzfristig	mittelfristig	langfristig								
Wissenschaftsdisziplin	Technik	Ökonomie	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO ₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	Umwandlung	Verbrauch						
Energiesystemstruktur	zentral	dezentral	Insel								
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	Biomasse	Wind	Solarthermie	Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	Jahresmittel							
Energieverbraucher	Energieversorgung	Verkehr	Industrie	Gebäude	Land- und Forstwirtschaft	Bergbau	Kleingewerbe/Handel				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
CH ₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
N ₂ O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe							
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	Investitionen	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen					
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	Vorsorgeprinzip	No-Regret-Politik	Anpassung (Adaptation)	Laissez Faire							
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbrauch	Umwandlungstechnologien	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal							
Instrumente	Ordnungsrecht	Steuern/Abgaben	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtungen	Subventionen	Festpreisgarantien	Quoten	Forschung und Entwicklung			
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquote						

3 DER AUFBAU VON ENERGIEMODELLEN

Um die abstrakte Vorgehensweise bei der Modellierung der Energiewirtschaft bzw. von Energiesysteme zu veranschaulichen, werden im folgenden Kapitel einzelne wesentliche Modellierungsansätze anhand von Schaubildern erläutert. Im Abschnitt 3.1 werden Energiemodelle in den umfassenderen Modellierungskontext der Integrated Assessment Modelle und der Kosten-Nutzen-Analysen eingeordnet. Abschnitt 3.2 gibt eine Übersicht über wichtige Komponenten von Energiemodellen. Im Abschnitt 3.3 und 3.4 wird die Modellierung von Energiemärkten und der Technologieentwicklung erläutert.

3.1 *Integrated Assessment Modelle und Kosten-Nutzen-Analysen*

Die im weiteren näher erläuterten Energiemodelle betrachten i.d.R. nur einen Teil der relevanten physischen und sozio-ökonomischen Systeme. Diese gehen von politisch vorgegebenen Reduktionszielen aus, ermitteln technische, organisatorische bzw. ökonomische Maßnahmen und betrachten die Auswirkungen auf die Emissionsentwicklung und die damit verbundenen gesellschaftlichen und ökonomischen Kosten. Ausgeblendet bleibt i.d.R. das Klimasystem, d.h. wie sich die Emissionsentwicklung auf die atmosphärischen Klimagaskonzentrationen auswirkt und welche Schäden von diesen Emissionen ausgehen.

Zwei im Rahmen dieser Studie nicht näher betrachtete Modellarten sind um eine umfassendere Abbildung des Gesamtzusammenhanges bemüht: Integrated Assessment Modelle und Modelle mit Kosten-Nutzen-Analysen.

Integrated Assessment Modelle sind um eine vollständige Abbildung des Gesamtzusammenhangs einschließlich des physischen Klimasystems bis hin zu sozioökonomischen Aspekten bemüht. Modelle mit Kosten-Nutzen-Analyse gehen über die ansonsten hier im Vordergrund stehende Kosteneffizienz bzw. den Kostenwirksamkeitsansatz in dem Sinne hinaus, daß die Analyse nicht bei einer

Quantifizierung der Emissionsminderung endet, sondern diese Emissionsminderung auch ökonomisch in Form verminderter Klimaschäden bewertet wird.

Beide Modellgruppen zeigen deutliche Überlappungen, setzen aber unterschiedliche Schwerpunkte. Während beim einen die Anwendung im politischen Kontext im Vordergrund steht, sind beim anderen die Erreichung des nach ökonomischen Kriterien definierten Optimums wesentlich.

Integrated Assessment Modelle berücksichtigen menschliche Aktivitäten (einschließlich Energiesysteme), die Atmosphäre, Ozeane und Ökosysteme weitere Komponenten dieser Modellklasse. Eine schematisierte Übersicht gibt Abb. 3.1.

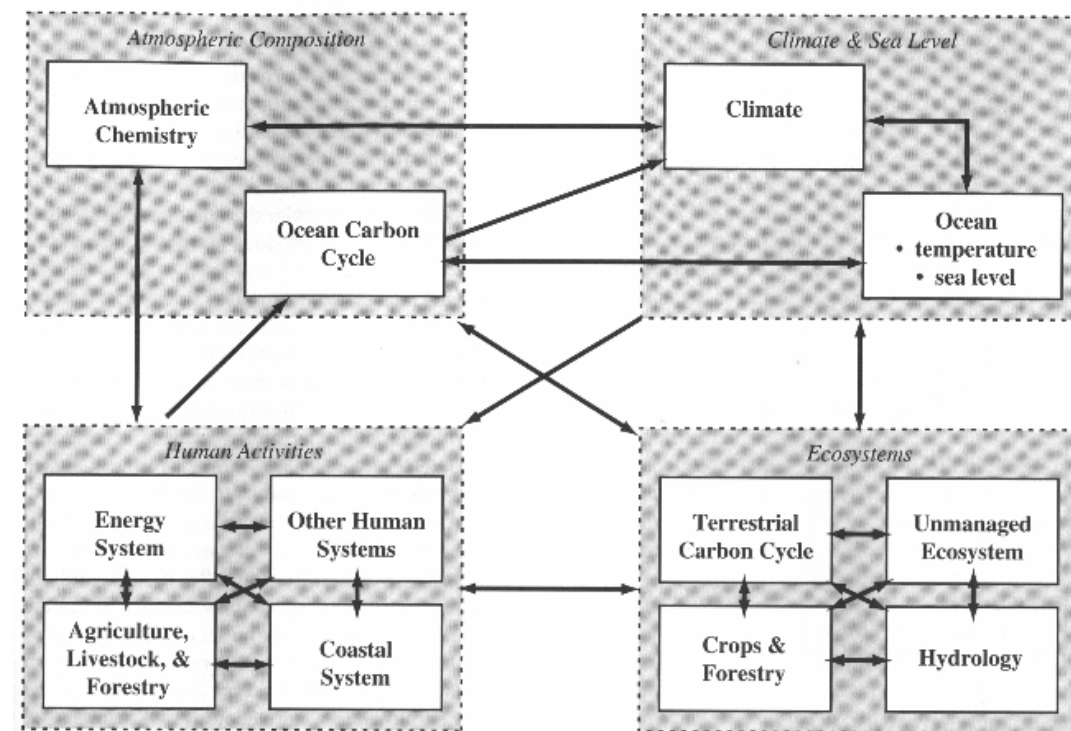


Abb. 3.1 Schlüsselkomponenten eines umfassenden Integrated Assessment Modells (aus: Bruce 1996, S. 377)

Die im Rahmen dieser Studie betrachteten Energiemodelle decken nur Teilbereiche dieses gesamten Komplexes ab. Schwerpunkte bilden die menschlichen Aktivitäten, das Energiesystem und deren CO₂-Emissionen. Im folgenden werden für Energiemodelle wichtige Komponenten erläutert.

3.2 Energiemodelle und ihre Komponenten¹⁷

Für die Verknüpfung von klimapolitischen Fragestellungen mit Energiemodellen sind vier Grundelemente relevant: Wirtschaft und Gesellschaft, Energiesektor, Emissionen und das Klimasystem. Menschliche Aktivitäten verbrauchen Energie und emittieren dadurch Treibhausgase. Diese wiederum bewirken Klimaveränderungen, welche letztlich Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft haben. Dieser Zusammenhang wird durch politische, technische und ökonomische Entscheidungen beeinflusst (siehe Abb. 3.2).

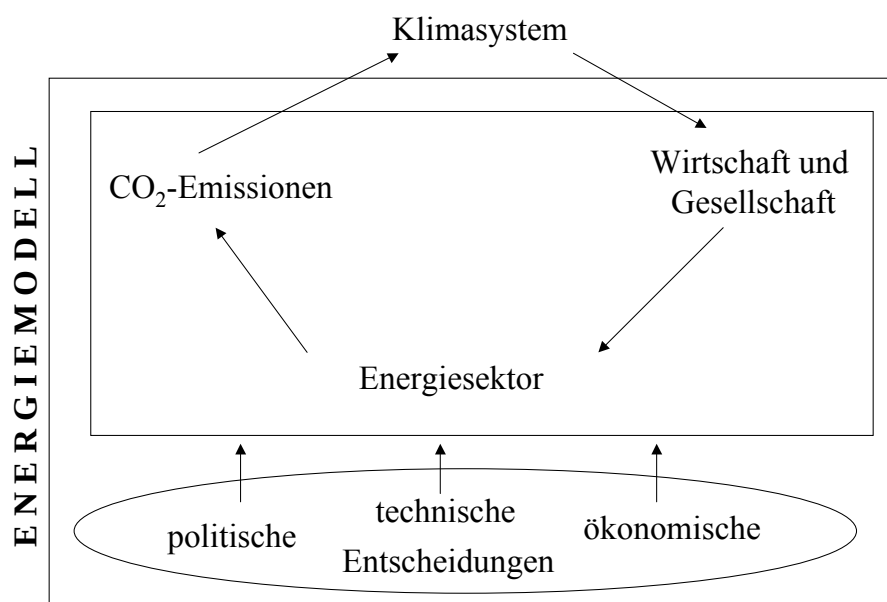


Abb. 3.2 Einflüsse von Entscheidungen auf klimarelevante Prozesse

Dieses System wird i.d.R. von den Energiemodellen nicht vollständig abgebildet. Das Klimasystem wird als exogene Größe betrachtet und die Ergebnisse von Klimamodellen mit ihrer Quantifizierung der Klimafolgen für die Energiemodelle verwendet¹⁸. Ggf. werden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen verschiedene

¹⁷ Auf eine Modellierung der Zusammenhänge zwischen den Komponenten wird im Detail in diesem Kapitel nicht eingegangen. Hier wird statt dessen auf das Anwendungskapitel 7 und die Beschreibung der kritischen Faktoren (Kapitel 6) verwiesen.

¹⁸ Siehe hierzu auch die Erläuterung in Kapitel 2.2.2.2 und 2.2.2.5.

Annahmen berücksichtigt, ansonsten werden die Ergebnisse der Klimamodelle als gegeben vorausgesetzt. Die Systemgrenze der Energiemodelle schließt allein die Bereiche Wirtschaft und Gesellschaft, den Energiesektor und die Emissionen ein.

Diese Aspekte werden von menschlichen Entscheidungen substantiell beeinflusst. Dies betrifft sowohl politische Entscheidungen über Energie- und Umweltpolitik (z.B. Vorgaben über spezifische Energieverbräuche, Steuern, etc.), ökonomische Entscheidungen (z.B. bei Investitionen über die Energieintensität von Anlagen) oder technische Entscheidungen (z.B. über den Einsatz von Anlagen oder Geräten).

Insgesamt ist es Ziel der Energiemodelle, die Potentiale und die Effektivität dieser Entscheidungen zu ermitteln und damit die Reichweite der Einflußmöglichkeiten auf die Bereiche Wirtschaft und Gesellschaft, Energiesektor sowie Emissionen festzustellen.

Eine adäquate Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Wirtschaft und Gesellschaft, Energiebereich sowie Emissionen ist wesentlicher Teil von Energiemodellen. Um der Vielschichtigkeit der verschiedenen Bereiche gerecht zu werden, wird für einige Modelle von einer sektoralen Differenzierung ausgegangen.

Häufig werden die Sektoren Haushalte, Industrie, Verkehr und Kraftwerke getrennt modelliert und ggf. weiter differenziert. Im ökonomischen Kontext dient die Differenzierung nach Wirtschaftsbereichen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung als Basis. Diese werden von einer Reihe von grundlegenden Einflußfaktoren bestimmt, die nicht nur auf einen dieser Sektoren sondern umfassender wirken. Wesentliche Faktoren sind hier die Bevölkerungsentwicklung, das Wirtschaftswachstum oder die Technologieentwicklung. Ausgehend von diesen Basisfaktoren werden eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die wesentlich die Energieverbräuche der Sektoren determinieren. Beispiele dieser Faktoren sind Wohnfläche, Fahrleistung, Industrieproduktion und Brennstoffeinsatz.

Für einige Modelle ist das Gesamtmodell eine Zusammenstellung von Einzelmodellen der Sektoren, die mehr oder weniger stark verbunden sind. Abb. 3.3 gibt eine Übersicht über die relevanten Zusammenhänge.

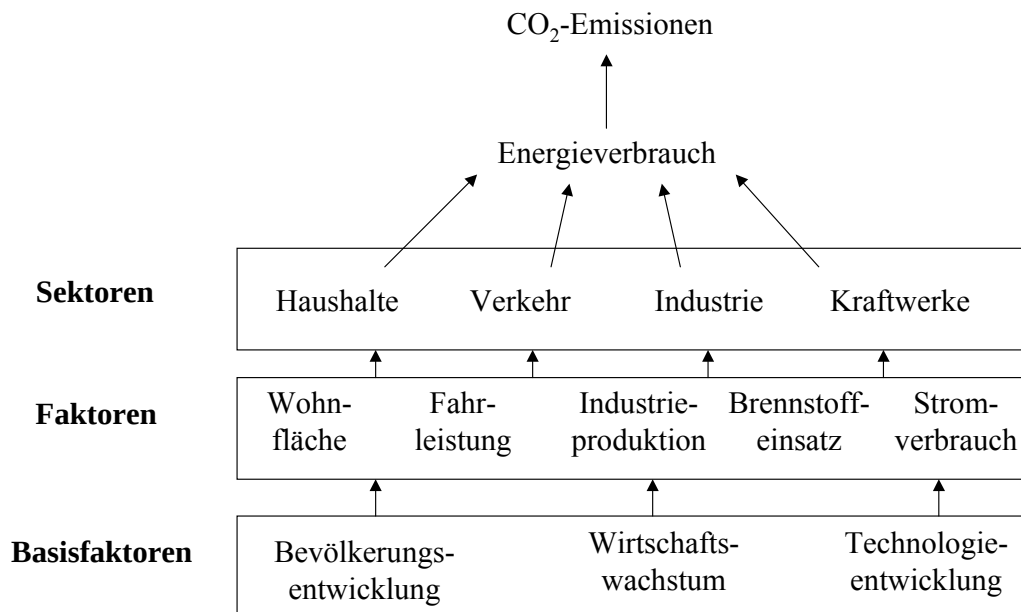


Abb. 3.3 Einflußfaktoren und sektorale Differenzierung von Energiemodellen

Die Analyse und Bewertung von Klimaveränderungen und von Maßnahmen zum Klimaschutz erfordert eine inter-, multi- bzw. transdisziplinäre Herangehensweise. Klimaveränderungen erfordern zunächst die Ermittlung von physischen, chemischen und biologischen Größen in der Umwelt. Neben der Atmosphäre sind auch die Hydrosphäre, Pedosphäre, Geosphäre und Biosphäre betroffen.

Konkrete Veränderungen betreffen insbesondere die Temperatur bzw. Trockenheit und Niederschlagsraten und damit indirekte Auswirkungen auf landwirtschaftliche Ernten, Wasserversorgung und Krankheiten.

Ausgehend von diesen physisch determinierten Effekten sind es Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft, die ökonomische und soziologische Analysen bedürfen. Gleiches gilt für die Analyse von Instrumenten und Maßnahmen, um die Kosten für bestimmte Branchen oder gesellschaftliche Gruppen in Grenzen zu halten. Um Emissionen zu reduzieren, sind technologische Innovationen erforderlich.

Insgesamt ergibt sich damit ein komplexes Geflecht relevanter Wissenschaftsdisziplinen und Umweltmedien, die für eine umfassende Betrachtung der Klimaveränderungen und von Klimaschutzmaßnahmen relevant sind.

Da es in der Regel nicht möglich ist, alle Disziplinen gleichberechtigt einzubeziehen, werden Einzelbereiche schwerpunktmäßig betrachtet und hiervon exogene Größen aus anderen Bereichen übernommen. Ähnliches gilt für die Monetarisierung von Klimafolgen in Bezug auf die Veränderung der Temperatur, den Meeresspiegelanstieg etc.

Im folgenden werden die spezifischen Teilaspekte der Modellierung von Energiemärkten und der Technologieentwicklung im Detail diskutiert.

3.3 Energiemärkte

Energieökonomische Modelle berücksichtigen eher den gesamten wirtschaftlichen Kontext. Entscheidungsprozesse der Energiemärkte werden in aggregierter Form modelliert. Diese grundlegenden Zusammenhänge werden in der folgenden Abbildung 3.4 schematisiert dargestellt.

In ökonomischen Analysen werden die Reduktionsziele (außer z.B. in Kosten-Nutzen-Abwägungen) nicht innerhalb der Analyse ermittelt, sondern exogen als politische Vorgabe angenommen.

Energiemärkte sind nicht autonom, sondern werden durch Entscheidungen aus dem Bereich Wirtschaft, Gesellschaft und Technologie beeinflusst. Entwicklungen am Energiemarkt haben einen wichtigen Einfluß auf die CO₂-Emissionen. Über den Zusammenhang von Energieangebot, Energiepreis und Energieverbrauch werden die CO₂-Emissionen wesentlich festgelegt.

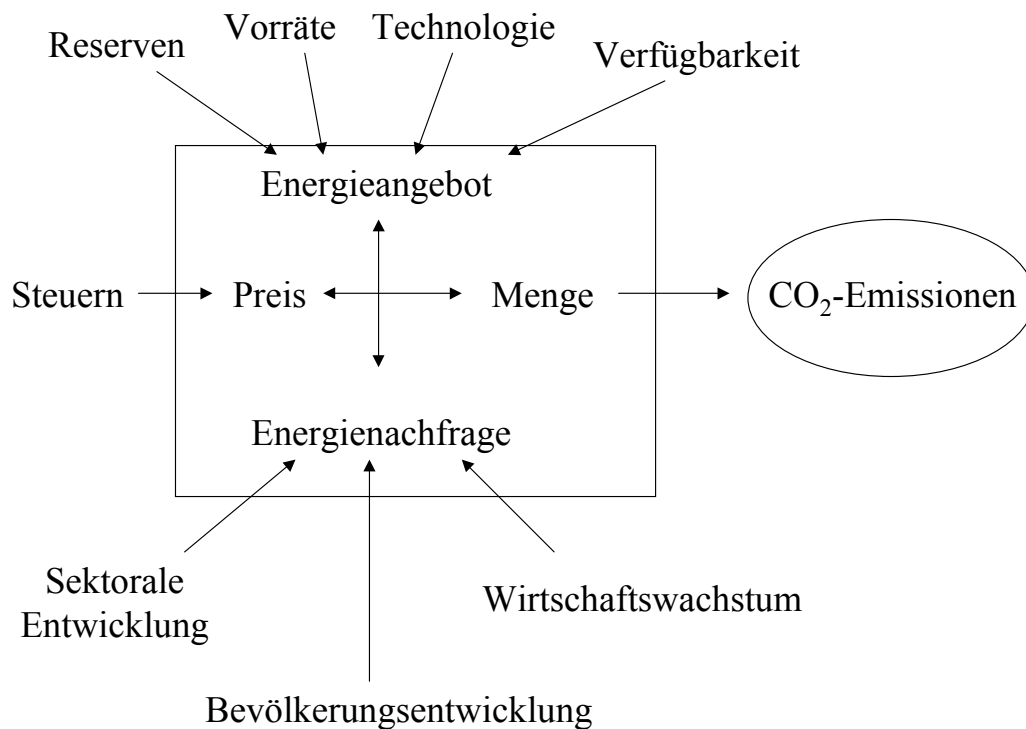


Abb. 3.4 Einflüsse auf den Energiemarkt, das Energieangebot und die Energienachfrage

Im Zentrum steht hier der Zusammenhang aus Energieangebot und –nachfrage sowie Menge und Preis. Diese beeinflussen sich gegenseitig und bestimmen letztlich die Emissionen. Energieangebot und –nachfrage werden von externen Faktoren wesentlich bestimmt. Zu diesen Einflußfaktoren für das Energieangebot gehören u.a. die Energiereserven, die Verfügbarkeit der Ressourcen und die Fördertechnologien. Auf der Seite der Energienachfrage sind das Wirtschaftswachstum, die sektorale Entwicklung und die Bevölkerungsentwicklung bestimmend.

Da die Realität in den Modellen nur vereinfacht abgebildet werden kann, müssen unbedeutende Einflußfaktoren vernachlässigt werden. Auch werden in den Modellen i.d.R. nicht alle Einflußfaktoren endogenisiert, ein Teil wird exogen vorgegeben. In Energiemodellen werden die Einflußfaktoren auf die Energienachfrage i.d.R. im Detail betrachtet. Für das Energieangebot werden von den angegebenen Einflußfaktoren die Bereiche Reserven, Vorräte und Verfügbarkeit oft vernachlässigt.

3.4 Technologieentwicklung

Ein weiterer wichtiger Komplex ist die Frage der Modellierung der Technologieentwicklung. Hier unterscheiden sich ökonomische und technologisch-orientierte Modelle. Während ökonomische Modelle (Top-down Ansatz) die Technologieentwicklung in aggregierter Form betrachten, ist in technologisch-orientierten Modellen (Bottom-up Modelle) stark differenziert bis auf die Ebene spezifischer Technologien.

Bei technologisch-orientierten Energiemodellen steht die Betrachtung repräsentativer Einzeltechnologien im Vordergrund. Einzeltechnologie und technologische Systeme werden explizit berücksichtigt und mögliche Veränderungen des Technologiemixes, der eingesetzten Brennstoffe und der Weiterentwicklung der Technologien im Detail betrachtet und modelliert. Ausgehend von der Entwicklung der Einzeltechnologien und deren Kombination sowie der Aktivitätsgrößen wird das Energiesystem modelliert und die Emissionsentwicklung ermittelt (siehe Abb. 3.5).

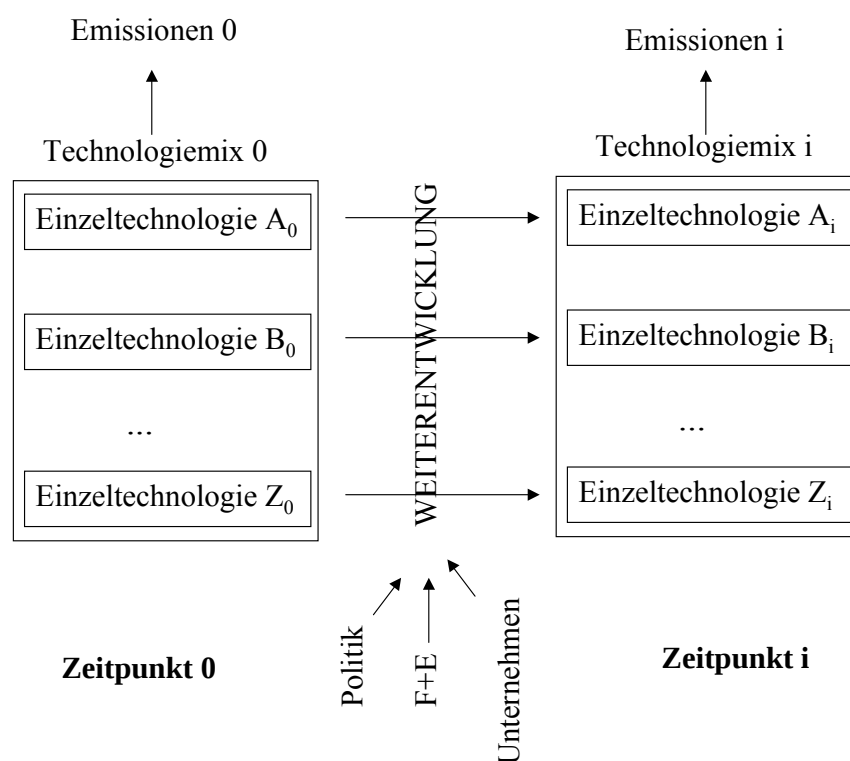


Abb. 3.5 Technologieentwicklung differenziert nach Einzeltechnologien (Bottom-up Ansatz)

Bei der Betrachtung von Technologieentwicklung in einer aggregierten Form ohne Differenzierung nach spezifischen Technologien wird grundsätzlich zwischen einer autonomen und einer induzierten Technologieentwicklung unterschieden. Abb. 3.6 gibt eine Übersicht über den Einfluß der Technologieentwicklung auf die Emissionsentwicklung.

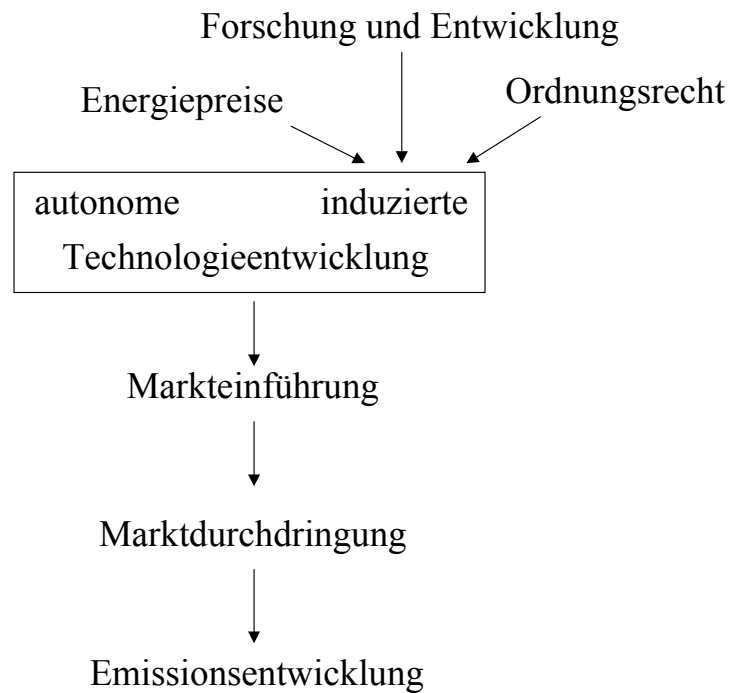


Abb. 3.6 Darstellung der Technologieentwicklung entsprechend dem Top-down Ansatz

Bei einer autonomen Technologieentwicklung wird angenommen, daß Technologien sich in ihrer Energieintensität über die Zeit mit einem konstanten Faktor ändern und nicht von weiteren Faktoren beeinflußt werden. Vielfach wird in ökonomischen Energiemodellen die Technologieentwicklung als autonom betrachtet. Hier wird ausgehend von historischen Analysen eine ähnliche Entwicklung für die Zukunft angenommen.

Beim induzierten technologischen Fortschritt werden weitere Einflußfaktoren berücksichtigt. Es wird angenommen, daß die Technologieentwicklung beeinflussbar ist. Es bestehen aber eine Reihe von Möglichkeiten der politischen Einflußnahme:

- Durch die Förderung von Forschung und Entwicklung können Technologien zur Serienreife gebracht werden oder bestimmte Komponenten optimiert oder kostengünstige Materialien eingesetzt werden. Beispiele sind die Weiterentwicklung der Brennstoffzelle oder die Entdeckung neuer Materialien für die Photovoltaik.
- Über das Ordnungsrecht können z.B. Minimumstandards für die Energieverbräuche von Geräten, Gebäuden und Industrieanlagen oder Emissionsgrenzwerte festgelegt werden.
- Energiepreise: Eine Erhöhung der Energiepreise stimuliert die Entwicklung von energieeffizienteren Technologien, alternativer Energietechnologien und verbesserter Umwandlungstechnologien.

Insbesondere für langfristige Emissionsprognosen und Kostenschätzungen spielen die Annahmen zur Technologieentwicklung eine große Rolle. Die Technologieentwicklung wird daher immer feingliedriger modelliert. In Europa wurden im Rahmen des TEEM-Projektes (Technology Endogenisation in Energy Models) solche Themen bearbeitet. In den USA hat das Energy Modeling Forum (EMF) zu Fragen der Technologieentwicklung und ihrer Modellierung die Arbeitsgruppe 19 „Alternative Technology Strategies“ eingerichtet.

4 TYPEN VON ENERGIEMODELLEN

4.1 Systematisierung der Modellkonzepte

Für Energiemodelle gibt es verschiedene Ansätze zur Strukturierung. Unterschiede beziehen sich auf die methodischen Grundlagen, die Sichtweise, Ansätze zur Findung adäquater Lösungen bzw. Ziele sowie Umfang und Tiefe der Abbildung komplexer Strukturen und Systeme. Einige grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale sind im folgenden zusammengefaßt.

Ein wesentliches Strukturierungsmerkmal von Energiemodellen stellt die Wissenschaftsdisziplin dar, auf deren Grundlage entwickelt wurde. Modelle mit einer Abbildung der technischen Systeme

Auf der einen Seite gibt es Modelle, die im Bereich der Ingenieurwissenschaften entwickelt wurden. Sie bilden die technischen Systeme im wesentlichen ab und werden als Energiesystemmodelle bezeichnet. Auf der anderen Seite sind Modelle, die im Bereich der ökonomischen Forschung entwickelt wurden. Diese bilden schwerpunktmäßig die Energiemärkte ab und werden als energieökonomische Modelle bzw. Energiewirtschaftsmodelle bezeichnet. Erstere Modelltypen werden aufgrund ihres Schlusses von Detailfragen auf Allgemeines als Bottom-up Modelle bezeichnet, letztere Modelltypen aufgrund ihrer vom Allgemeinen aufs Detail schließenden Herangehensweise als Top-down Modelle bezeichnet.

Als weiteres Strukturierungskriterium kann gelten, ob die Systeme auf der Ebene von Individuen oder der Volkswirtschaft bzw. der Gesellschaft beschrieben werden. Bei ersteren stehen individuelle Entscheidungen im Vordergrund, bei letzteren wird die volkswirtschaftliche Verflechtung betrachtet. Im ökonomischen Kontext würden diese zwischen mikroökonomischer und makroökonomischer Betrachtungsweise unterscheiden.

Die Art der Lösungs- bzw. Zielfindung unterscheidet sich für Modelle. Zum einen sollen nach vorgegebenen Kriterien (z.B. Kostenminimum) Zielgrößen erreicht werden. Dabei wird ein Algorithmus, z.B. auf Grundlage der linearen Programmierung, implementiert. Dieser als Optimierung bezeichnete Ansatz findet sowohl in technischen Kontexten als auch in ökonomischen Modellen Anwendung. Zum anderen kann die Simulation als alternativer Ansatz betrachtet werden. Dabei werden plausible Entwicklungspfade anhand von Szenarien basierend auf Erfahrungswissen abgeleitet.

Als weiteres Strukturierungsmerkmal kann die Betonung der Erzeugungs- und Angebotsseite und der Verbrauchs- bzw. Nachfrageseite angesehen werden. Bei ersteren wird die Energieerzeugung bzw. das Energieangebot im Detail modelliert und die Verbrauchs- bzw. Nachfrageseite vereinfacht abgebildet. Dies ist z.B. bei Strommodellen der Fall. Bei einzelnen Modellen wird in umgekehrter Weise vorgegangen und die Verbrauchs- bzw. Nachfrageseite im Detail modelliert und von dort her angesetzt. Beispiel ist hier das nachfragegetriebene Energiewirtschaftsmodelle MIS¹⁹.

Als weiteres Unterscheidungskriterium gilt, in welchem Umfang Wissen über zukünftige Entwicklungen in die vormaligen Entscheidungsprozesse einfließt. Für Modelle, bei denen umfassende Kenntnisse über zukünftige Rahmenbedingungen einfließen, sind Fehlinvestitionen weitgehend ausgeschlossen. Diese unter dem Schlagwort „perfect foresight“ zusammengefaßten Charakteristika tendieren zu einem geradlinigen Verlauf. Als Gegensatz dazu stehen myopische Modelle, bei denen keine Kenntnisse über zukünftige Entwicklungen einfließen und daher Fehlinvestitionen nicht auszuschließen sind. Diese Modelltypen neigen zu sprunghaften Entwicklungspfaden.

Als weiteres Strukturierungsmerkmal sei hier der Detaillierungsgrad bzw. Endogenisierungsgrad erwähnt. Dieses wird im Detail in Kapitel 6.4 erläutert.

¹⁹ siehe Kapitel 5.3

Zusätzliche Aspekte zur Unterscheidung von Modellgruppen beziehen sich auf die räumliche Ausdehnung der Modellregion: Einzelne Unternehmen, Staat, Europa, Welt. Auch existieren Modelle für Teilsektoren des Energiebereichs²⁰ (Strommodelle, Verkehrsmodelle, Nachfragemodelle, etc.). Einen weiteren Ansatzpunkt zur Differenzierung zwischen Modelltypen bietet die mathematische Formulierung²¹.

Letztlich haben sich aus diesen vielen verschiedenen Strukturierungsansätzen die Energiewirtschaftsmodelle und die Energiesystemmodelle als die beiden wesentlichen Grundtypen herauskristallisiert. Innerhalb der Energiewirtschaftsmodelle²² wird zwischen Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen und Input-Output-Modellen üblicherweise unterschieden. Für Energiesystemmodelle wird häufig zwischen Optimierungsmodellen und Simulationsmodellen differenziert. Es bleibt aber festzuhalten, daß diese Aufteilung nur einer grobe Charakterisierung dient und die Einzelmodelle innerhalb einer Gruppe erhebliche Unterschiede aufweisen können, die Übergänge zwischen den Modelltypen fließend sind und ein Modell Komponenten verschiedener Modelltypen enthalten kann. Tabelle 4.1 faßt die Zuordnung der wesentlichen Modelltypen zusammen.

Tabelle 4.1 Untergruppen der Modelltypen innerhalb der Energiewirtschafts- und Energiesystemmodelle

Energiewirtschaftsmodelle (auch: Top-down Modelle, ökonomische Energiemodelle)	Energiesystemmodelle (auch: Bottom-up Modelle, technische Energiemodelle)
• Allgemeine Gleichgewichtsmodelle • Input-Output Modelle	• Optimierungsmodelle • Simulationsmodelle

Der Ansatzpunkt von Energiesystemmodellen ist der Schluß von technischen Detailfragen auf allgemeingültige Zusammenhänge. Energiewirtschaftsmodelle

²⁰ Innerhalb dieses Vorhabens stehen allerdings Modelle im Vordergrund, die sich auf den gesamten Energiebereich und nicht auf Teilbereiche beziehen. In Kapitel 7.3.2 wird beispielhaft für ein sektorales Simulationsmodell das Verkehrsmodell TREMOD vorgestellt.

²¹ Folgende Kategorien werden unterschieden: stochastische vs. nicht-stochastische Modelle, diskrete vs. kontinuierliche Modelle, statische vs. dynamische Modelle, Anzahl der Zielfunktion. Für eine ausführliche Darstellung der auf der mathematischen Formulierung basierenden Klassifizierung, siehe: Mensink 2000.

²² Unter Energiewirtschaftsmodellen sind nicht Modelle der Energiewirtschaft (ohne die restliche Ökonomie) zu verstehen, sondern gesamtwirtschaftliche Modelle mit energiewirtschaftlichem Blickwinkel.

demgegenüber betrachten den ökonomischen Gesamtzusammenhang und schließen von dort auf Einzelheiten.

Energiesystemmodelle aggregieren die in den einzelnen energietechnischen Prozessen vorliegenden Zusammenhänge zu Aussagen auf höherer Betrachtungsebene, z.B. auf sektoraler oder gesamtwirtschaftlicher Ebene. Der Zeithorizont von Energiesystemmodellen deckt kurz- bis langfristige Entwicklungen ab. Als Systemgrenze gilt der Energiebereich²³, das gesamtwirtschaftliche Umfeld wird exogen in das Modell einbezogen.

Energiewirtschaftsmodelle gehen von umfassenden gesamtwirtschaftlichen und energiewirtschaftlichen Betrachtungen aus und differenzieren z.T. zwischen Wirtschaftssektoren bzw. Produktionsfaktoren. Sie berücksichtigen die Substituierbarkeit von Energie durch andere Produktionsfaktoren (Arbeit, Kapital) bzw. die Verflechtung der Wirtschaftsbeziehungen. Die Energietechnologien und -systeme werden i.d.R. verallgemeinert dargestellt. Für den zukünftigen technologischen Wandel werden vereinfachende Annahmen getroffen²⁴.

Tabelle 4.2 faßt die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Energiesystem- und Energiewirtschaftsmodellen zusammen.

²³ Die Systemgrenze ist für Energiesystemmodelle nicht einheitlich. Z.T. wird der Endverbrauch mit modelliert, z.T. nicht.

²⁴ Auf der Energienachfrageseite wird mit einem aggregierten Energieeffizienzsteigerungsindex gearbeitet. Auf der Energieangebotsseite werden komplexere Zusammenhänge berücksichtigt.

Tabelle 4.2 Gegenüberstellung von Energiesystem- und Energiewirtschaftsmodellen

	Energiesystemmodelle (oft auch: Bottom-up Modelle)	Energiewirtschaftsmodelle (oft auch: Top-down Modelle)
Fundierung	Technologie	Ökonomie
Rückkopplungseffekt zwischen Mengen und Preisen	innerhalb des Energiesektors berücksichtigt, nicht gesamtwirtschaftlich	über Preis- und Nachfrageelastizitäten bzw. ökonometrische Schätzung
No-Regret-Maßnahmen	existierend, tendenziell überschätzt	nicht existent, tendenziell unterschätzt
Betrachtungszeitraum	kurz- bis langfristig	kurz- bis mittelfristig (Input-Output-Modelle), mittel- bis langfristig (Allgemeine Gleichgewichtsmodelle)
Abbildung des Energiesystems	detailliert	stark vereinfacht
Repräsentierung des ökonomischen Umfelds	exogen vorgegeben	detailliert
Systemgrenze	Energiesektor ²⁵	Gesamtwirtschaft
Technologiewahl und technologische Entwicklung	explizit über neue Technologien und Innovationen	aggregiert: über Energieeffizienzsteigerungsindex ²⁶ und induzierten technischen Fortschritt
Zielrichtung von umweltpolitischen Fragestellungen	Energieeinspar- und Emissionsminderungspotentiale, Kosten-effektivitätsanalysen	gesamtwirtschaftliche und sektorale Auswirkungen von Maßnahmen

Im folgenden werden die vier Grundtypen von Energiemodellen und ausgewählte Einzelmodelle vorgestellt. Die vier wesentlichen Modelltypen sind: Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (Kap. 4.2), Input-Output Modelle (Kap. 4.3), Optimierungsmodelle (Kap. 4.4) und Simulationsmodelle (Kap. 4.5). In Kapitel 5 folgt beispielhaft die Beschreibung folgender Einzelmodellen: NEWAGE (Kap. 5.1), PANTA RHEI (Kap. 5.2), MIS (Kap. 5.3), IKARUS (Kap. 5.4) und PERSEUS (Kap. 5.5). Ein ausführlicher Vergleich der Modelltypen folgt in Kapitel 8.

²⁵ Die Systemgrenze ist für Energiesystemmodelle nicht einheitlich. Z.T. wird der Endverbrauch mit modelliert, z.T. nicht.

²⁶ Auf der Energienachfrageseite wird mit einem aggregierten Energieeffizienzsteigerungsindex gearbeitet. Auf der Energieangebotsseite werden komplexere Zusammenhänge berücksichtigt.

Im Rahmen der beiden folgenden Kapitel kann nur eine übersichtsartige Einführung der Einzelmodellen und Modelltypen gegeben werden. Für eine vertiefende Erläuterung wird auf die angegebene Literatur verwiesen. In diesem Bericht wird z.T. von der im wissenschaftlichen Bereich üblichen Terminologie abgewichen, um den Zugang zu dieser Thematik zu erleichtern.

4.2 Allgemeine Gleichgewichtsmodelle

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle²⁷ gehen von einer aggregierten Beschreibung der Gesamtwirtschaft einschließlich der Energiewirtschaft aus. Theoriebasis ist die neoklassische ökonomische Theorie. Grundgedanken sind dabei die Nutzenmaximierung der Konsumenten und die Profitmaximierung der Produzenten. Marktbeziehungen werden anhand von Angebots- und Nachfragefunktionen beschrieben. Mengen und Preise bilden sich im Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage. Als englische Bezeichnungen für Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind sowohl Computable General Equilibrium (CGE) als auch Applied General Equilibrium (AGE) gebräuchlich.

Beispiele für Energiemodelle, die zur Modellgruppe der Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle gehören, sind:

- LEAN²⁸, ein an der Universität Oldenburg entwickeltes sequentiell-dynamisches Allgemeines Gleichgewichtsmodell,
- GEM-E3²⁹ und PACE sind am ZEW in Mannheim entwickelte Allgemeine Gleichgewichtsmodelle,
- NEWAGE³⁰, ein am IER der Universität Stuttgart entwickeltes angewandtes Allgemeines Gleichgewichtsmodell,

Beispiele für international gebräuchliche Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind³¹:

- GREEN³², ein im Umfeld der OECD entwickeltes globales dynamisches Modell,

²⁷ Für eine ausführliche Darstellung der Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle und deren theoretische Basis siehe: Zhang und Folmer 1998, OECD/IEA 1998, Böhringer 1996, Welsch 1996, Shoven und Whalley 1992

²⁸ siehe Welsch 1999, Welsch und Hoster 1997, Hoster et al. 1997

²⁹ siehe Schmidt und Koschel 1999, Conrad und Schmidt 1997a, Conrad und Schmidt 1997b, Ungenannt 2000b

³⁰ siehe Kapitel 4.3 in diesem Bericht

³¹ Bei den letzten beiden Modellen handelt es sich um keine reinen Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle sondern um Mischformen, die auch umfangreiche ökonometrische Schätzungen beinhalten.

³² siehe Burniaux et al. 1992

In der mikroökonomischen Perspektive stehen Wirtschaftssubjekte, Produzenten und Konsumenten im Vordergrund der Betrachtung mit ihren Produktions- bzw. Konsumentscheidungen. Die Produzenten versuchen ihr Produktportfolio mit den verfügbaren Inputfaktoren in Richtung Profitmaximierung zu optimieren. Konsumenten orientieren sich bei ihren Kaufentscheidungen an der Maximierung des Nutzens.

Energie wird als ein Produktionsfaktor betrachtet, der durch andere Faktoren (Kapital, Arbeit, Material) ersetzt werden kann. Mit Hilfe von Produktionsfunktionen wird angegeben, wie durch welche Inputfaktoren ein Output erzeugt werden kann. Mögliche technische Optionen werden aggregiert und in Form von nicht-linearen Produktionsfunktionen mit verschiedenen Faktorkombinationen aus Arbeit, Kapital, Energieträger und Material dargestellt. Letztlich wird hierüber die Substitution der Faktoren beschrieben. Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft eine Produktionsfunktion mit Kapital und Energie als Produktionsfaktoren sowie alternative Produktionsmöglichkeiten. Tech1 bis Tech4 geben Technologien mit unterschiedlichen Faktorkombinationen für Kapital- und Energieeinsatz. An den Punkten P1 bis P4 können jeweils gleiche Produkte mit unterschiedlichen Faktorkombinationen erzeugt werden.

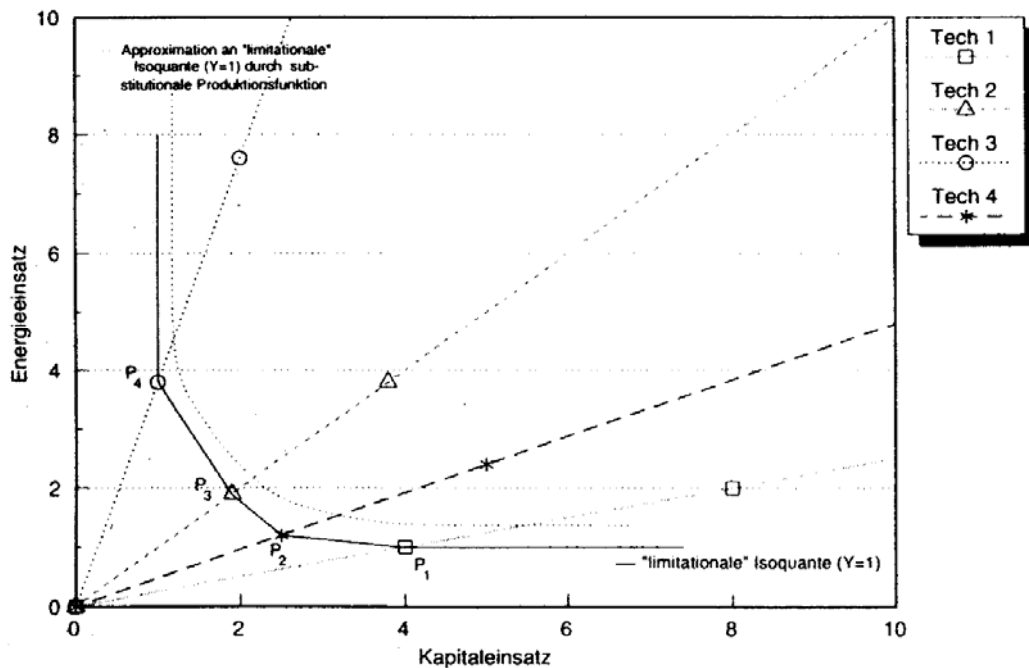


Abb. 4.1 Beispielhafte Produktionsfunktion (aus: Böhringer 1996, S. 30)³³

Die Zusammenhänge der Faktoren werden entweder über Produktionsfunktionen bzw. Elastizitäten dargestellt. Grundlegendes Konzept ist häufig der Ansatz der konstanten Substitutionselastizitäten (CES), bei der zwischen den Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit, Energie- und Materialinput (KLEM) unterschieden wird. Die Abfolge der Substitutionsprozesse wird i.d.R. in Form einer geschachtelten Struktur, dem sogenannten Nesting, dargestellt. Von Modell zu Modell unterscheidet sich die Struktur der Abfolge innerhalb der Produktionsfunktion. Beispielhaft ist in Abbildung 4.2 das Nesting von GEM-E3 dargestellt.

Auf der ersten Stufe wird die Substitution zwischen Kapital auf der einen und Arbeit, Energie und Material auf der anderen Seite in Form der Substitutionselastizität σ_{KLEM} angegeben. Tiefer im Entscheidungsbaum folgt die Energieträgersubstitution σ_F zwischen Kohle, Öl und Gas. Alle diese Entscheidungspunkte werden mit einer Substitutionselastizität belegt. Diese werden üblicherweise als Erfahrungswerte bzw. aus der Literatur zusammengestellt.

³³ Die hier dargestellte limitationale Produktionsfunktion ist nicht üblich für allgemeine Gleichgewichtsmodelle. Flexible Produktionsfunktionen sind für allgemeine Gleichgewichtsmodelle eher typisch.

Die genannten Modelle unterscheiden zwischen der Substitution von Energie durch andere Produktionsfaktoren (Energieeffizienzsteigerung) und von einem Energieträger durch einen anderen Energieträger (fuel-switch), z.B. Ersatz kohlenstoffreicher durch kohlenstoffarme Energieträger, zu unterscheiden.

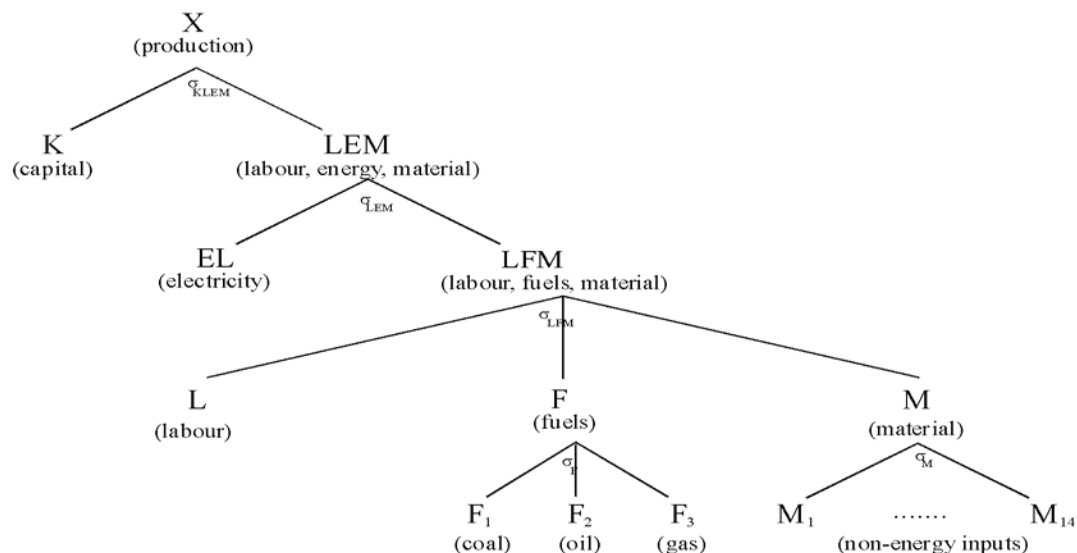


Abb. 4.2 Struktur der Produktionsfunktion im Modell GEM-E3
(aus: Schmidt und Koschel 1999, S. 158)

Elastizitäten beschreiben die relative Änderung einer Größe bezogen auf die verursachende relative Änderung einer anderen Größe, im allgemeinen die relative Mengenänderung bezogen auf eine relative Preisänderung. Als ein Typ von Elastizitäten sind für Energiemodelle besonders die Substitutionselastizitäten relevant. Substitutionselastizitäten (i.d.R. mit σ bezeichnet) beschreiben die prozentuale Änderung des Einsatzverhältnisses von zwei Faktoren in Reaktion auf eine einprozentige Änderung im zugehörigen Faktorpreisverhältnis. Sie beschreiben damit sozusagen die Leichtigkeit von Substitutionsvorgängen. Je geringer die Substitutionselastizität σ desto schwieriger die Substitutionsvorgänge, d.h. der Austausch eines Faktors durch einen anderen Faktor.

Neben der Produzentenseite kann in ähnlicher Weise die Konsumentenseite ebenfalls mit einem mehrstufigen Struktur beschrieben werden. Diese enthält entsprechende Nachfrageelastizitäten, z.B. ob das Einkommen für energieintensive Freizeitaktivitäten verwendet wird oder aber gespart und zu einem späteren Zeitpunkt möglicherweise zur Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen verwendet wird. Im

erstgenannten Fall spricht man vom sogenannten Rebound-Effekt³⁴, dem in empirischen Untersuchungen erhebliche Aufmerksamkeit geschenkt wurde und zu dessen Analyse sich insbesondere die Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle eignen. Bei der Beschreibung der Nachfrageelastizitäten sind zusätzlich Preiselastizitäten von Bedeutung. Diese beschreiben Änderungen der Nachfrage als Reaktion auf Preisveränderungen.

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind von partiellen Modellen in der Weise zu unterscheiden, daß letztere nicht von Gleichgewichtszuständen für die gesamte Ökonomie ausgehen, sondern nur für Teilbereiche der Gesamtwirtschaft. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle bilden den geschlossenen Einkommenskreislauf ab.

Die Datenbasis für Allgemeine Gleichgewichtsmodelle wird meist anhand nur eines oder weniger Bezugsjahre initialisiert bzw. kalibriert. Input-Output-Modelle verwenden häufig längere Zeitreihen.

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle bieten den Vorteil, daß Interdependenzen und Rückkopplungen innerhalb der Gesamtwirtschaft in einer einheitlichen Form berücksichtigt werden. Bei anderen Modelltypen sind dies z.T. exogene Variablen, die vom Modellierer festzulegen sind.

Hinsichtlich der Herangehensweise können folgende Differenzierungen vorgenommen werden³⁵:

- statische vs. dynamische Betrachtungsweise

Dynamische Modelle beziehen zeitliche Entwicklungen mit ein und berücksichtigen den Zustand bzw. die Veränderung von Faktoren aus Vorperioden. Statische Modelle haben die Zeit als Einflußfaktor nicht implementiert. In zunehmendem Maße wird mit dynamischen Komponenten modelliert.

³⁴ Der Rebound-Effekt (übersetzt: Rückprall-Effekt) besagt, daß das Ergebnis des technologischen Fortschritts oft durch zusätzliche Aktivitäten wieder aufgezehrt wird. Beispielsweise zeigt sich, daß Einsparungen bei den spezifischen Kraftstoffverbräuchen von Pkws durch zusätzlich gefahrene Kilometer wieder ausgeglichen werden und letztlich die Gesamtemissionen nicht abnehmen.

³⁵ vgl. Welsch 1996

- myopische vs. vorausschauende Erwartungen

Innerhalb der dynamischen Modelle wird zwischen myopischer (kurzsichtiger) und vorausschauender Erwartungsbildung unterschieden. Beim myopischen Ansatz basieren Entscheidungen auf dem Ist-Zustand ohne Kenntnisse über zukünftige Zustände. Beim vorausschauenden Ansatz wird angenommen, daß die zukünftige Entwicklung bekannt ist und in die Entscheidung mit einfließt. Während beim myopischen Ansatz Fehlinvestitionen nichts Außergewöhnliches sind, sind diese beim vorausschauenden Ansatz praktisch ausgeschlossen. Die Realität dürfte irgendwo zwischen diesen beiden Extrempunkten liegen, in dem gewisse Kenntnisse über zukünftige Entwicklungen einfließen, diese aber mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Für die Modellierung des technischen Fortschritts sind folgende wesentliche Differenzierungen üblich³⁶:

- autonom vs. induziert

Im Konzept des autonomen technischen Fortschritts werden stetige Veränderungen der Effizienz über die Zeit angenommen, beim induzierten technischen Fortschritt findet diese Veränderung z.B. auf ein Preissignal hin oder als Konsequenz intensiver Forschungsförderung statt. Beispiel ist hier die Energieeinsparung, die in einem Fall als autonome Energieeffizienzsteigerung (AEEI) berücksichtigt wird und im anderen Fall als Funktion des Energiepreises betrachtet wird.

- neutral vs. faktorvermehrend

Beim neutralen technischen Fortschritt bleibt der Energiekostenanteil im Vergleich zu anderen Kostenfaktoren für Kapital oder Arbeit unverändert, während beim faktorvermehrenden Ansatz ein abnehmender Energiekostenanteil angenommen wird.

³⁶ vgl. Welsch 1996. Für eine umfassende Klassifizierung von allgemeinen Gleichgewichtsmodellen siehe: Bhattacharyya (1996). Eine ausführliche Diskussion des technischen Fortschritts findet sich in den Abschnitten 3.4 und 6.3.

- faktorgebunden vs. faktorungebunden

Bei der faktorgebundenen Modellierung des technischen Fortschritts wird die Energieeffizienz und der realisierte technische Fortschritt von den Investitionstätigkeiten abhängig gemacht. Beim faktorungebundenen Ansatz wird dieser Zusammenhang nicht angenommen.

Energiesysteme und verfügbare Energietechniken werden in Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen nur verallgemeinert abgebildet. Im Gegensatz dazu ist der Detaillierungsgrad in Dynamischen Optimierungsmodellen³⁷ wesentlich höher. Einzelne Energiesektoren werden in Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen nur in Form einer Produktionsfunktion abgebildet, die für aggregierte Energietechnologien steht. Neuere Modelle, z.B. NEWAGE, haben zumindest einige wesentliche Teile des Energiesystems aus Bottom-up Perspektive berücksichtigt.

In der neoklassischen Theorie werden perfekter Wettbewerb, Nutzenmaximierung und die Abwesenheit von Externalitäten impliziert, während dieses nur begrenzt die Realität widerspiegelt³⁸. Die Modelle des Allgemeinen Gleichgewichts gehen grundsätzlich erst einmal von Gleichgewichtsbeziehungen aus. Marktunvollkommenheiten oder Restriktionen, wie z.B. Arbeitslosigkeit, externe Effekte, tauchen in der zugrundeliegenden Theorie nicht auf. Auch ist zweifelhaft, ob die Annahmen der perfekten Konkurrenz umfassend für alle Bereiche adäquat sind. In angewandten Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen wird in zunehmendem Maße von der Umfassendheit dieser Annahmen abgewichen. Marktunvollkommenheiten und Restriktionen werden berücksichtigt und entsprechende Anpassungen vorgenommen (Beispiel: NEWAGE³⁹).

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind besonders auf die Beschreibung langfristig ausgerichteter Marktgleichgewichte ausgerichtet. Bei langfristigen Betrachtungen spielt die adäquate Beschreibung des technischen Fortschritts eine große Rolle.

³⁷ siehe Kapitel 4.4 in diesem Bericht

³⁸ vgl. Grubb 1999, Zhang und Folmer 1998

³⁹ siehe Kapitel 5.1 in diesem Bericht

4.3 Input-Output Modelle

Grundansatz der Input-Output-Modelle⁴⁰, auch makroökonomische oder makroökonometrische Modelle genannt, ist die Simulation von Veränderungen der sektoralen Aufkommens- und Verwendungsverflechtungen in der Vergangenheit und darauf aufbauend die Erstellung von Projektionen für deren zukünftige Entwicklungen. Dabei haben Input-Output-Modelle als wesentliche Grundlage die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung (VGR)⁴¹. Die VGR stellt die wirtschaftliche Verflechtung einer Volkswirtschaft in zurückliegenden Perioden dar.

Im Zentrum dieses Modelltyps steht die ökonometrische Schätzung ausgehend von der volkswirtschaftlichen Verflechtungsmatrix und anderen statistischen Zeitreihen der Energieträger, des Arbeitsmarktes und der Umweltstatistik.

Der Input-Output-Ansatz geht ursprünglich auf Leontief⁴² zurück. In der Grundform der statistischen Input-Output-Modelle taucht die Zeit als Parameter nicht auf. Hier orientiert sich der Zeithorizont eher in Richtung kurzfristige Veränderungen. In den heute zunehmend angewandten dynamischen Modellen wird die Zeit als Parameter explizit berücksichtigt. Somit können Veränderungen in der Verflechtungsmatrix von Vorperioden berücksichtigt werden. Da dynamische Modelle einen erheblich höheren Rechenaufwand benötigen, waren dynamische Betrachtungen in der Anfangsphase der Input-Output-Modellierung noch nicht möglich. Inzwischen werden in zunehmendem Maße dynamische Zusammenhänge einbezogen.

Beispiele für Input-Output bzw. makroökonomische Modelle sind auf internationaler Ebene HERMES⁴³ und MIDAS.

⁴⁰ Für eine ausführliche Darstellung von Input-Output-Modellen siehe: RFF 1984, Fleissner et al. 1993, Meier 1984, Beutel und Stahmer 1982.

⁴¹ Diese Transaktionen werden für die Bundesrepublik Deutschland vom Statistischen Bundesamt in Wiesbaden herausgegeben.

⁴² vgl. Leontief 1966

⁴³ Italianer 1986

In Deutschland sind u.a. folgende Modelle von Bedeutung:

- PANTA RHEI⁴⁴, ein an der Universität Osnabrück entwickeltes ökonometrisches Modell,
- MIS⁴⁵, ein dynamisches, nachfragegetriebenes Input-Output-Modell,
- DIOGENES⁴⁶, ein am ZEW Mannheim entwickeltes kombiniertes Optimierungs- und Input-Output-Modell,
- die DIW-Modelle⁴⁷, umfassen mehrere statistische und dynamische Input-Output-Modelle
- das RWI-Energiemodell⁴⁸

Innerhalb der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR), auf der Input-Output-Modelle basieren, wird das Wirtschaftsgeschehen als Summe von Transaktionen zwischen ökonomischen Sektoren abgebildet und in Form von Input-Output-Tabellen zusammengefaßt. Die VGR umfaßt die Entstehung, Verwendung und Verteilung des Sozialproduktes, die Finanzströme, die Produktionsverflechtung und die Bestände an Sach- und Geldvermögen.

Für Input-Output-Modelle ist insbesondere die Input-Output-Rechnung⁴⁹ als Teilbereich der VGR mit den Input-Output-Tabellen und Inputkoeffizienten relevant. In der Input-Output-Rechnung wird die gütermäßige Verflechtung der Produktionsbereiche einer Volkswirtschaft dargestellt. Neben den inländischen Wirtschaftsprozessen werden Ein- und Ausfuhrströme ebenfalls erfaßt. Ausgehend von der Aufkommens- und Verwendungstabelle werden die Input-Output-Tabellen (auch Produktionsverflechtungstabelle genannt) und die Input-Koeffizienten ermittelt. In der deutschen Input-Output-Statistik werden die Verflechtungen aufgeteilt auf 59 Produktionsbereiche bzw. Gütergruppen dargestellt⁵⁰. Das heißt, daß für die 59 Sektoren das Aufkommen an Gütern aus inländischer Produktion und aus Importen, die Verwendung dieser Güter sowie die entstandene Wertschöpfung

⁴⁴ siehe Kapitel 5.2 in diesem Bericht

⁴⁵ siehe Kapitel 5.3 in diesem Bericht

⁴⁶ vgl. Ungenannt 2000a

⁴⁷ vgl. Bach 1994, Diekmann 1997

⁴⁸ Döhrn et al. 1987

⁴⁹ siehe: Statistisches Bundesamt 2000.

⁵⁰ Seit der Umstellung auf die einheitliche europäische Statistik (WZ93) beträgt die Differenzierung 59 Wirtschaftssektoren. In der vorherigen deutschen Systematik waren es 58 Produktionsbereiche bzw. Gütergruppen.

dargestellt wird. Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht über die Struktur von Input-Output-Tabellen.

Üblicherweise werden die gesamtwirtschaftlichen Produktionsverflechtungen in Geldeinheiten als monetäre Input-Output-Tabellen angegeben, im Rahmen des Material- und Energiefluß-Informationssystems (MEFIS) werden diese aber inzwischen auch in Masseneinheiten als physische Input-Output-Tabellen erstellt⁵¹.

Tabelle 4.1 Vereinfachtes Schema von Input-Output-Tabellen
(aus: Statistisches Bundesamt 2000, S. 11)

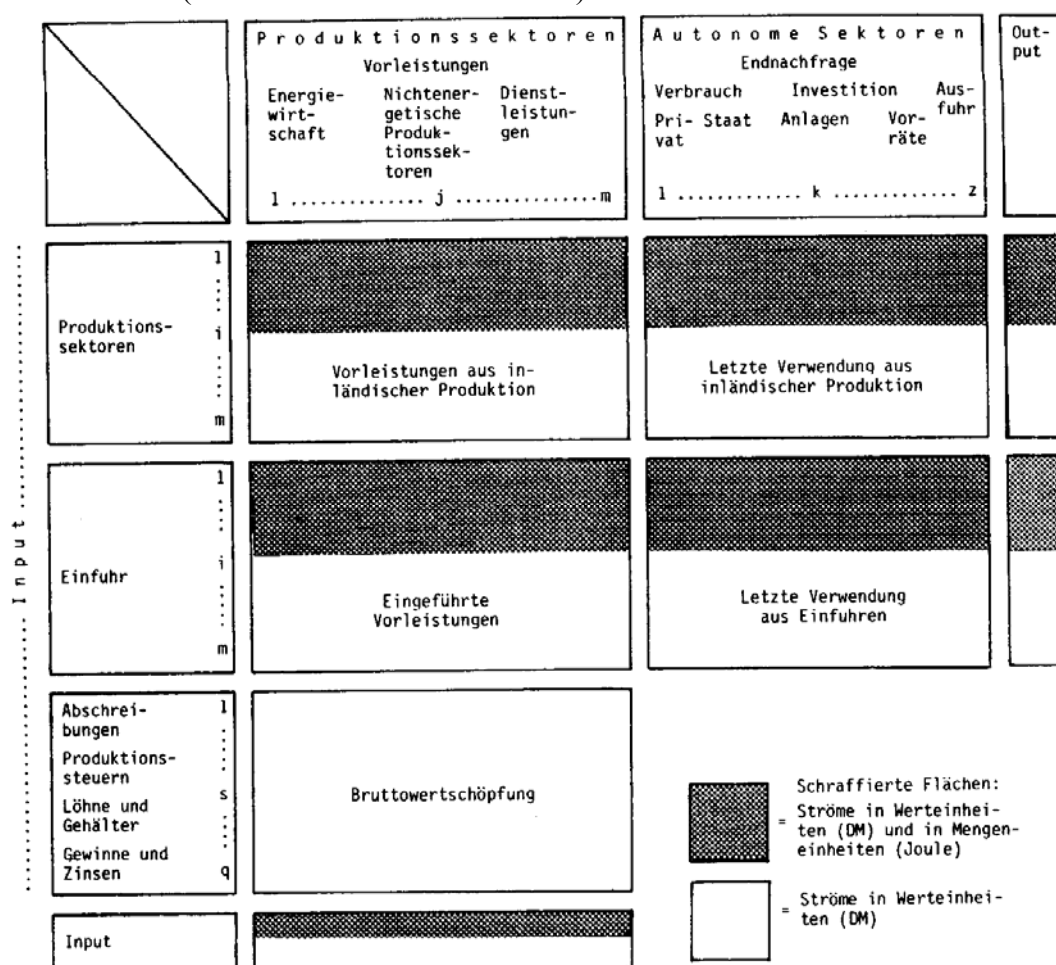
Verwendung Aufkommen	Produktions- bereiche	Konsum- ausgaben	Bruttoin- vestitionen	Übrige Welt	Insgesamt
Gütergruppen	Vorleistungen nach Gütergruppen und Produktionsbereichen	Konsumausgaben nach Gütergruppen	Bruttoinvestitionen nach Gütergruppen	Exporte nach Gütergruppen	Gesamtverwendung nach Gütergruppen
Komponenten der Wertschöpfung	Wertschöpfung nach Komponenten und nach Produktionsbereichen				
Übrige Welt	Importe nach Produktionsbereichen				
Insgesamt	Gesamtaufkommen nach Produktionsbereichen				

Input-Koeffizienten stellen für jeden Produktionsbereich die erforderlichen Inputs in Form der Vorleistungen und Komponenten der Wertschöpfung dar und werden auf den jeweiligen Produktionswert bezogen. Von diesen werden die inversen Koeffizienten abgeleitet, die eine wichtige Basis von Input-Output-Modellen darstellen.

Ergänzend zur grundlegenden Input-Output-Tabelle werden vom Statistischen Bundesamt Zusatztabelle zu Erwerbstätigen und Energie veröffentlicht. In der Energieträgerrechnung der VGR wird für alle 59 Produktionsbereiche jeweils die Verwendung von Energie aufgeschlüsselt nach 30 Energieträgerarten angegeben. Tabelle 4.4 gibt eine Übersicht über die Energieträgerrechnung innerhalb der VGR.

Innerhalb der Input-Output-Modelle ist der Grad der Endogenisierung ein wichtiges Unterscheidungskriterium. Häufig werden Bevölkerung und Arbeitsangebot sowie der Weltmarkt exogen vorgegeben. Zu den Modellen mit einem hohen Grad der Endogenisierung zählt PANTA RHEI. Hier wird die gesamtwirtschaftliche Input-Output-Tabelle einschließlich der Energieträgerrechnung möglichst detailliert abgebildet und über längere Zeiträume simuliert. Demgegenüber gehört MIS zu den Modellen mit einem wesentlich geringeren Endogenisierungsgrad. Hier wird die Produktionsverflechtung einschließlich Energieträgerrechnung nur in aggregierter Form abgebildet. Demgegenüber ist der Energieteil des Modells näher an energietechnischen Systemen orientiert. Bei MIS werden Wirtschaftswachstum und eine Reihe anderer wesentlicher exogener Größen (z.B. Bevölkerungsentwicklung, Produktivität, Außenhandel) vom Modellierer vorgegeben.

Tabelle 4.4 Übersicht über die Energieträgerrechnung der VGR
(aus: Beutel und Mürdter 1984)



⁵¹ siehe: Heinze 2000, Stahmer 2000

Aufgrund der systematischen Beschreibung der intersektoralen Verflechtung und der ökonometrischen Schätzung der Zusammenhänge bieten sich Input-Output-Modelle für die Ermittlung kurz- bis mittelfristiger Veränderungen und Auswirkungen an, so zur Analyse der Wirkungen von ökonomischen Instrumenten, z.B. einer CO₂-Steuer auf Emissionen, Wirtschaftswachstum und Beschäftigung. Die Verwendung von Input-Output-Modellen ist für die Ermittlung langfristiger Veränderungen weniger üblich. Schwierig ist auch die adäquate Berücksichtigung des technischen Wandels und der Einführung neuer Technologien.

Da die dynamischen Modelle in der Vergangenheit beobachtete Entwicklungen fortschreiben, sind sie nicht in der Lage, zukünftigen Strukturbrüchen Rechnung zu tragen, die weit über bisher beobachtete Veränderungen, z.B. die Energiekrisen, hinausgehen. Es gibt allerdings einzelne Bemühungen, zukünftige strukturelle Entwicklungen zu berücksichtigen, indem – aufbauend auf technologischen Analysen – die Koeffizienten angepaßt werden⁵².

Der als Lucas-Kritik⁵³ bezeichneter Kritikpunkt an Input-Output-Modellen besagt, daß statistische Analysen bzgl. des Verhaltens in der Vergangenheit verwendet werden, um Aussagen über zukünftiges Verhalten zu treffen. Anzustreben ist hier, daß die historischen Zeitreihen einen ausreichend langen Zeitraum abdecken, und z.B. auch die wirtschaftlichen Implikationen der Energiekrisen abdecken, um gesicherte Aussagen über weit in die Zukunft reichende Entwicklungen machen zu können.

Im Gegensatz zu Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen⁵⁴ erlauben Input-Output-Modelle eine detaillierte Wiedergabe der makroökonomischen Realität, nicht nur der sektoralen Verflechtungen, sondern auch der Ineffizienzen, Arbeitslosigkeit usw.. Diese Ineffizienzen sind im Prinzip inkompatibel mit der neoklassischen Theorie, die für die Grundform der Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle i.d.R. die Basis bildet⁵⁵.

⁵² Nathani 2000

⁵³ Lucas 1976

⁵⁴ siehe Kapitel 3.2 in diesem Bericht

⁵⁵ Neuere Entwicklungen erlauben aber inzwischen Marktunvollkommenheiten und Restriktionen in neoklassische Modelle einfließen zu lassen; vgl. Böhringer 1997.

Innerhalb der Input-Output-Modelle ist zwischen Modellen hinsichtlich des Endogenisierungsgrades zu unterscheiden. PANTA RHEI⁵⁶ bildet den gesamten Einkommenskreislauf ab, während andere Modelle, z.B. DIOGENES⁵⁷ dieses nur teilweise abbilden.

⁵⁶ siehe Kapitel 5.2

⁵⁷ vgl. Vögele 2001

4.4 Optimierungsmodelle

Optimierungsmodelle⁵⁸ haben eine im wesentlichen technische Fundierung und basieren auf dem Bottom-up Ansatz. Energiesysteme werden mit ihren technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Eigenschaften detailliert abgebildet und mit Kosten belegt. Es wird eine Optimierung des Systems angestrebt, bei der für eine vorgegebene Energienachfrage bis hin zu einem Emissionsmaximum die Kosten des Gesamtsystems minimiert werden.

Optimierungsmodelle umfassen eine detaillierte technische Analyse der existierenden und in naher Zukunft einsetzbaren Energiesysteme und -technologien. Im Gegensatz zu ökonomischen Modellen, die keine detaillierte Darstellung der technologischen Alternativen erlauben, können Optimierungsmodelle angeben, welcher Technologiemark zu welchen Kosten einzusetzen ist, um bestimmte Emissionsziele zu erreichen. Üblicherweise werden sowohl angebotsseitige als auch nachfrageseitige Maßnahmen der Energiepolitik berücksichtigt.

Es werden mathematische Verfahren eingesetzt, z.B. die lineare Programmierung, um die Gleichungssysteme in Richtung einer Zielfunktion (z.B. minimale Kosten) zu optimieren.

Es ist zwischen Modellen zu unterscheiden, die alle energieverbrauchenden Prozesse der gesamten Energiewirtschaft abbilden und solchen, die nur Teilbereiche betrachten, z.B. Modelle für die Elektrizitätswirtschaft. Bei einer Betrachtung der Gesamtheit der energieverbrauchenden Prozesse werden idealerweise alle Bereiche von der Rohstoffgewinnung, der Weiterverarbeitung und Umwandlung bis hin zum Endverbrauch und inklusive der Energieeinsparung in allen diesen Bereichen einbezogen. Diese vielfältigen Energietechnologien werden dann zu Netzwerken⁵⁹ zusammengeführt, um die Gesamteffekte auf sektoraler oder makroökonomischer Ebene abzuschätzen.

⁵⁸ Für eine Diskussion der Stärken und Schwächen von dynamischen Optimierungsmodellen siehe: Zhang und Folmer 1998; OECD/IEA 1998

⁵⁹ Häufig wird hier auch der Begriff Technikketten verwendet, da es sich aber präziser um eine Vernetzung handelt, wird hier stattdessen Netzwerk verwendet.

Energieverbrauchende und -erzeugende Prozesse sind der Fokus dieser Modellgruppe. Während bei den Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen (siehe Kapitel 4.2) und Input-Output-Modelle (siehe Kapitel 4.3) die Energiewirtschaft als Teil der Gesamtwirtschaft betrachtet werden und damit die Verflechtungen mit anderen Wirtschaftsbereichen endogenisiert werden, werden die Verflechtungen mit der Gesamtwirtschaft im Grundansatz der Optimierungsmodelle nicht endogenisiert, sondern müßten über eine Kopplung mit anderen Modellen einfließen.

Ökonomische Einflußfaktoren müssen daher exogen vorgegeben werden. Damit kommen Rückkopplungseffekte, z.B. Einflüsse von verstärkten Investitionen auf den Kapitalmarkt oder von Einkommensveränderungen auf die Energienachfrage nicht zum Tragen. Abhilfe schafft hier die Kopplung von Modellen bzw. Hybrid-Modelle. Dabei fließen Rückkopplungseffekte ein, ohne allerdings ein geschlossenes Modellkonzept zu erzielen. Schnittstellenproblematiken und Inkonsistenzen können auftreten.

Bei einer Kopplung mit Gleichgewichtsmodellen bzw. Input-Output-Modellen werden die ökonomischen Inputparameter endogenisiert. Gekoppelte Modelle bieten die Möglichkeit, die Vorteile beider Modelltypen - sowohl der Optimierungsmodelle mit ihrer detaillierten Beschreibung der energieverbrauchenden Prozesse als auch der Energiewirtschaftsmodelle mit einer umfassenden Einbindung der Energiewirtschaft in die übrigen Wirtschaftsprozesse – miteinander zu verbinden.

Beim Vergleich von Ergebnissen der dynamischen Optimierung und der Energiewirtschaftsmodelle wurde wiederholt festgestellt, daß erstere tendenziell niedrigere Kosten für die gleichen Reduktionsziele errechnen als letztere Modellgruppe⁶⁰. Eine Reihe von strukturellen Unterschieden sind hierfür verantwortlich. Hierzu gehören: Basis- bzw. Referenzszenario⁶¹,

⁶⁰ Grubb et al. 1993, Grubb 1999

⁶¹ Ausgehend von welcher Basis werden die Effekte von Maßnahmen verglichen. Diese kann ohne entsprechende Abstimmung erhebliche Unterschiede aufweisen. Eine ausführliche Diskussion hierzu findet sich in Kapitel 6.1.

Schwerpunktsetzung⁶², Unterschiede in den Systemgrenzen⁶³ und in den Kostenkonzepten⁶⁴.

Häufig wird argumentiert, daß Optimierungsmodelle zu niedrige Kosten für Emissionsminderungsmaßnahmen berechnen. Jochem⁶⁵ argumentiert hingegen, daß auch in Optimierungsmodellen, ebenso wie in Simulationsmodelle, manche Kosten zu hoch angesetzt sein können.

Um das Energiesystem realistisch abzubilden, sind nicht nur umfassende Technologie-, Kosten- und Umweltdaten erforderlich, sondern es müssen auch Nebenbedingungen (sogenannte „Bounds“) festgelegt werden. Diese beschreiben Restriktionen bzgl. der Verbreitung bestimmter Technologien und beziehen auch technische, ökonomische, gesetzliche und gesellschaftliche Randbedingungen mit ein. Diese Nebenbedingungen haben einen bedeutenden Einfluß auf die Ergebnisse der Modellierung, denn sie haben zur Folge, daß von der Optimierung als Entscheidungsprozedere unter bestimmten Umständen Abstand genommen wird. Eine realitätsnahe Festlegung der Nebenbedingungen ist daher von großem Einfluß auf die Modellergebnisse. Teilweise werden diese Nebenbedingungen nur unzureichend dokumentiert und begründet.

Die Kostenbetrachtung ist zentraler Bestandteil der Optimierungsmodelle. Kostenbetrachtungen hängen aber entscheidend von einer Reihe von Faktoren ab:

- Welche Kosten werden berücksichtigt (z.B. Investitionskosten, Betriebskosten, Transaktionskosten, Wohlfahrtsverluste)?
- Welcher Zinssatz bzw. welche Diskontrate wird angesetzt?

⁶² Hiermit ist gemeint, daß oft Optimierungsmodelle den Schwerpunkt auf Energieerzeugung und industrielle Aktivitäten setzen und Maßnahmen auf der Nachfrageseite vernachlässigt werden.

⁶³ Beispiel: Einbezug von Effekten außerhalb des Energiebereichs in den Energiewirtschaftsmodellen während diese von den dynamischen Optimierungsmodellen nicht berücksichtigt werden.

⁶⁴ Während von dynamischen Optimierungsmodellen im wesentlichen die Investitions- und Betriebskosten berücksichtigt werden, bezieht der Kostenbegriff von Energiewirtschaftsmodellen auch Transaktionskosten und Wohlfahrtsverluste mit ein.

⁶⁵ Jochem 1997. Folgende Gründe sind u.a. dazu genannt: Für heterogene Branchen werden meist keine detaillierten Energieverbrauchs- und Energieeinsparanalysen durchgeführt und stattdessen ein tendenziell überschätzender, vereinfachender Top-down Ansatz gewählt. Auch werden die Kosten für neue energiesparende Technologien auf Basis von Prototypen ermittelt, aber zukünftige Kostenreduktionspotentiale in der Fertigung unterschätzt.

- Welcher Abschreibungszeitraum und welche technische Lebensdauer wird zugrundegelegt?

Optimierungsmodelle sind sowohl international als auch national ein weit verbreiteter Energiemodelltyp. International verfügt MARKAL⁶⁶ über einen hohen Bekanntheitsgrad. Das RAINS-Modell⁶⁷ von IIASA gehört ebenfalls zu dieser Modellgruppe, wird allerdings nicht im Zusammenhang mit Fragen des Klimaschutzes sondern mit Versauerung und Ozonbildung eingesetzt.

In Deutschland sind u.a. folgende Optimierungsmodelle von Bedeutung:

- IKARUS⁶⁸, wurde unter Führung des Forschungszentrums Jülich zur Erstellung von nationaler Klimaschutzstrategien erstellt,
- PERSEUS⁶⁹: wurde an der Universität Karlsruhe für verschiedene Bereiche der Luftreinhaltepolitik und für strategische Unternehmensentscheidungen entwickelt,
- E3NET⁷⁰, wurde für die Energiesystemoptimierung als Teil des MESAP-Modellsystems an der Universität Stuttgart entwickelt,
- DSS DICTUM⁷¹, das aus der Modellierung in der chemischen Technologie stammt.

Die einzelnen Modelle unterscheiden sich in ihren Systemgrenzen, der regionalen Ausrichtung, den berücksichtigten Schadstoffen und den zu beantwortenden Fragen.

Beispiele für die Anwendung von Optimierungsmodellen reichen von der lokalen, unternehmerischen, regionalen, nationalen bis zur globalen Ebene. Optimierungsmodelle werden von Energieversorgungsunternehmen für Investitionsentscheidungen von Kraftwerken⁷² eingesetzt. Sie werden für Least-Cost-Planning Aktivitäten eingesetzt. Bundesländer haben Optimierungsmodelle für Schadstoffminderungsstrategien eingesetzt. Auf nationaler Ebene wurden sie für die Umsetzung von Klimaschutzkonzepten angewendet⁷³. In

⁶⁶ siehe Fishbone und Abilock 1981, Kypreos 1996

⁶⁷ <http://www.iiasa.ac.at/Research/TAP/>

⁶⁸ siehe Kapitel 4.4 in diesem Bericht

⁶⁹ siehe Kapitel 4.5 in diesem Bericht

⁷⁰ siehe Fahl et al. 1999

⁷¹ Dietzsch 1997

⁷² Wietschel et al. 1997c

⁷³ Hoffmann et al. 1997

bi- bzw. multinationalen Studien wurden sie im Zusammenhang mit Joint Implementation⁷⁴ und Clean Development Mechanism verwendet.

⁷⁴ Wietschel et al. 1997b

4.5 Simulationsmodelle

Simulationsmodelle⁷⁵ gehören ebenso wie die Optimierungsmodelle zur Gruppe der Bottom-up bzw. Energiesystemmodelle. Abgesehen von den einfacheren Ad-hoc Ansätzen werden die physischen Einzelprozesse in Form linearer Zusammenhänge zu Prozeßketten und Netzwerken zusammengesetzt. Technologische Veränderungen und die Integration von Einspartechniken werden konkret auf vorhandene Systeme abgestimmt und Kompatibilitäten werden im Detail geprüft.

Im Energiebereich werden sie meistens eingesetzt, um für Gegenwart und Vergangenheit die technoökonomischen Determinanten des Energieverbrauchs und der Emissionen einzelner Sektoren⁷⁶ in quantitativer Form zu bestimmen. Von größerer Bedeutung ist der Einsatz von Simulationsmodellen mit Blick auf die Zukunft, wobei hier die Ermittlung der rein technischen oder der techno-ökonomischen Energieeinspar- und Emissionsminderungspotentiale im Mittelpunkt steht.

Bei entsprechendem Expertenwissen über den zu untersuchenden Sektor ist es mit Simulationsmodellen möglich, durch Vermeidung der rein mechanistischen Vorgehensweise anderer Modellansätze mehr Realitätsnähe zu erzielen. So werden z.B. die zukünftigen Energieeinsparpotentiale im Stahlsektor nicht allein durch das Kostenminimum bestimmt⁷⁷, sondern auch von einer Reihe anderer Faktoren. Dazu gehören z.B. die praktischen Möglichkeiten der Integration neuer Einspartechniken⁷⁸ im gewachsenen Anlagenbestand, wobei u.a. die technischen Kompatibilitäten mit der vor- und nachgelagerten Prozeßkette zu beachten ist, ferner die bei den Unternehmen bereits vorliegenden Erfahrungen mit der betreffenden Technologie, der allgemeinen Einschätzung ihres Entwicklungspotentials und die Frage der Rohstoffverfügbarkeit⁷⁹. Darüber hinaus kann die technologiespezifische Kostenentwicklung im Zeitverlauf

⁷⁵ Hierunter wird ein Spektrum von Modellen verstanden, das von einfachen Ad-hoc Ansätzen (siehe OECD/IEA 1998; Zhang und Folmer 1998) bis hin zu umfangreichen Modellen zur Darstellung komplexer Zusammenhänge (vgl. Blok et al. 1999).

⁷⁶ bei großen Modellen auch für die gesamte Volkswirtschaft

⁷⁷ wie dies für dynamische Optimierungsmodelle angenommen wird.

⁷⁸ Beispiele: Corex-Technologie und DRE-Technologie

⁷⁹ z.B. bestimmte Feinerze für Corex-Technologie

bei Vorliegen entsprechender Basisdaten für die kurzfristige Entwicklung anhand der Systemkosten und für langfristige Entwicklungen über Lernkurven unter Berücksichtigung der installierten Leistung (siehe Kapitel 6.3) und im Falle von Großanlagen durch Berücksichtigung von Standortgegebenheiten⁸⁰ besser berücksichtigt werden als bei den anderen Modellen.

Simulationsmodelle bieten neben einigen Optimierungsmodellen die Möglichkeit, bereits entschiedene, aber noch nicht umgesetzte Investitionen zu berücksichtigen, die Auswirkungen von Politikentscheidungen zu untersuchen⁸¹ und die Implikationen von Politikzielen zu analysieren⁸². Technologische Entwicklungen werden in Simulationsmodellen explizit beschrieben, während Optimierungsmodelle z.T. pauschalierend auf Lernkurven zurückgreifen.

Mit zunehmender Zahl von Nebenbedingungen (Bounds) geht der Optimierungsansatz letztlich in eine Simulation über. Die Nebenbedingungen der Optimierung entsprechen damit der Expertenschätzung für die jeweiligen Parameter in der Simulation.

Simulationsmodelle verschiedenster Komplexität können für politiknahe Potentialabschätzungen eingesetzt werden⁸³. Anwendungsschwerpunkte sind Problemstellungen mit begrenzter Komplexität und wo eine Optimierung nicht in Richtung einer eindimensionalen Zielgröße erfolgt. Simulationsmodelle liefern mit begrenztem Aufwand und einer pragmatischen Herangehensweise konkrete Umsetzungsempfehlungen.

Vorteile sind die spezifische Betrachtung technischer Systeme, die mögliche Maßnahmen flexibel auf einer detaillierteren Ebene als andere Modelltypen erfassen und so die genauesten Potentialabschätzungen auf einer feingliedrigen Ebene ermöglichen. Nachteile⁸⁴ sind die Vernachlässigung von Rückkopplungseffekten mit

⁸⁰ Die zweite Anlage desselben Typs ist meist günstiger als die erste Anlage; Platzverfügbarkeit, usw.

⁸¹ z.B. Atomausstieg, Folgen der Liberalisierung des Elektrizitäts- und des Gasmarktes auf die Kosteneffizienz von Einsparmaßnahmen

⁸² z.B. in einem Backcasting-Ansatz für die KWK-Ziele der EU bis 2010

⁸³ Z.B. wurden in Teilen der EU Studie „Economic Evaluation of Quantitative Objectives for Climate Change“ (COHERENCE 1999) Ad-hoc Ansätze eingesetzt.

⁸⁴ Dies trifft auch für dynamische Optimierungsmodelle zu.

der Gesamtwirtschaft sowie die starke Abhängigkeit von der Qualität von Expertenschätzungen⁸⁵.

Innerhalb der Simulationsmodelle gibt es eine Reihe von Modellen, die sich auf die detaillierte Simulation der Entwicklung der Endenergienachfrage konzentrieren. Eine Kategorie dieser Modelle liefert eine detaillierte Simulation der Anwendung aus einer Vielzahl von Endverbrauchstechnologien. Die Simulation erfolgt unter Berücksichtigung z.B. des Kapitalstocks und der Investitionsentscheidungen von Firmen. Beispiele sind das ENUSIM Modell von AEA Technology in Großbritannien, das SAVE Modell der niederländischen Energieforschungstiftung und das ISTUM Modell der Simon Fraser Universität in Vancouver (Kanada). Im Rahmen des IKARUS Instrumentariums wurden ebenfalls Simulationsmodelle für ausgewählte Sektoren entwickelt (z.B. Industrie, Verkehr). Obwohl nicht formal ein Modell können ähnliche Analysen mit dem Informationssystem ICARUS der Universität Utrecht in den Niederlanden durchgeführt werden.

Ein ähnlicher Ansatz wird von Modellen verfolgt, die Informationen zu einzelnen Technologien aggregieren. Beispiele sind das NEMS Modell der US-amerikanischen Energy Information Agency, das Long-Term Industrial Energy Forecasting (LIEF) Modell⁸⁶ des US Argonne National Laboratory, das NEMO Modell des niederländischen Central Planning Bureau.

Neben den Submodellen innerhalb des IKARUS Instrumentariums gehören das PLANET Modell und GEMIS zu den deutschen Simulationsmodellen. Auch die von Prognos verwendeten Modelle werden zu den Simulationsmodellen gerechnet. Das PLANET-Modell⁸⁷ wurde am IER in Stuttgart entwickelt. Es baut stark auf Expertenschätzungen auf und wird derzeit vom Wuppertal-Institut im Rahmen des Modellexperiments II des Forums für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen verwendet.

⁸⁵ Dieses steht nicht immer im notwendigen Umfang zur Verfügung.

⁸⁶ vgl. Ruth et al. 1999

⁸⁷ siehe Ungenannt 2000c, Schlenzig 1997

Ebenfalls zu dieser Modellkategorie kann das GEMIS-Modell⁸⁸ (Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme) gerechnet werden. GEMIS wurde vom Öko-Institut entwickelt. Es baut auf einer umfassenden Emissionsdatenbank auf und dient der Entscheidungsfindung bzgl. Energiesysteme im Rahmen von Ökobilanz-Betrachtungen.

⁸⁸ vgl. Ungenannt 2001b

4.6 Zusammenfassende Erläuterung der Modelltypen

Im folgenden sind die wesentlichen Charakteristika der vier Modelltypen zusammenfassend erläutert.

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind von der neoklassischen Theorie geprägt. Die Grundform ohne Berücksichtigung von Ungleichgewichten ist auf mittel- bis langfristige Fragestellungen ausgerichtet. Die Energiewirtschaft wird nur in begrenztem Detaillierungsgrad aufgelöst. Aufgrund der weitgehenden Endogenisierung können Rückkopplungen zwischen Energiewirtschaft und restlicher Ökonomie ermittelt werden. Wesentliche Parameter sind die Nesting-Struktur und die Elastizitäten. Kalibriert wird meist bezogen auf ein einzelnes oder wenige Jahre. Bei der Modellierung langfristiger Entwicklungen wird die adäquate Berücksichtigung des technischen Fortschritts zur entscheidenden Stellgröße. In Abwandlung vom rein neoklassisch geprägten vollständigen Gleichgewichten werden zunehmend auch Ungleichgewichte und Marktunvollkommenheiten einbezogen.

Input-Output-Modelle gehen grundlegend von statistischen Erhebungen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) mit deren Input-Output-Matrizen und Inputkoeffizienten aus. Anstelle der neoklassischen Gleichgewichtsannahmen bilden umfangreiche statistische Zeitreihen die empirische Basis. Input-Output-Modelle sind daher auf kurz- bis mittelfristige Fragestellungen und mögliche Veränderungen durch Maßnahmen gegenüber dem derzeitigen Ist-Zustand ausgerichtet. Disaggregation ist auf die sektorale Ebene möglich.

Optimierungsmodelle können einen ähnlich feinen Detaillierungsgrad der technischen Systeme wie die Simulationsmodelle erreichen. Sie bilden allerdings im Gegensatz zu diesen die gesamte Energiewirtschaft bzw. Energietechnik in einer einheitlichen Struktur komplett ab und erfordern eine Zielgröße z.B. Kosten für die Optimierung. Verflechtungen zur übrigen Volkswirtschaft sind i.d.R. im Gegensatz zu den ökonomischen Modellen nicht enthalten. Energiesystemmodelle sind

insbesondere für kurz- bis mittelfristige Betrachtungen geeignet. Rückkopplungen zwischen Preisen und Mengen für Energie und Produkte werden berücksichtigt.

Simulationsmodelle werden zur Ermittlung der rein technischen oder der techno-ökonomischen Energieeinspar- und Emissionsminderungspotentiale eingesetzt. Bei entsprechendem Expertenwissen über den zu untersuchenden Sektor ist es mit Simulationsmodellen möglich, durch Vermeidung der rein mechanistischen Vorgehensweise anderer Modellansätze mehr Realitätsnähe zu erzielen. Im Idealfall werden dabei die relevanten technischen, ökonomischen, innovatorischen, politischen und gesellschaftlichen Aspekte berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen Energiepreisen und eingesetzten Energiemengen wird i.d.R. nicht modelliert. Der Übergang vom Optimierungsmodell zum Simulationsmodell ist durch das Ausschalten der Wahlmöglichkeiten (Freiheitsgrade) gegeben.

5 EINZELNE ENERGIEMODELLE

Im Rahmen dieses Projektes ist es nicht möglich, alle in Kapitel 4 erwähnten Energiemodelle vorzustellen. Hier wurde eine Auswahl von Modellen getroffen, die das Spektrum der verschiedenen Modelltypen abdeckt. Wenn hier im folgenden ein Modell beschrieben wird, soll dies keine Bewertung oder Qualifizierung dieses Modells im Vergleich zu anderen Modellen darstellen.

Als Beispiel für ein Allgemeines Gleichgewichtsmodell wird in Kapitel 5.1 das Modell NEWAGE des IER der Universität Stuttgart beschrieben. Als Input-Output-Modelle werden PANTA RHEI (Kapitel 5.2) der GWS Osnabrück und MIS (Kapitel 5.3) der Universität Oldenburg vorgestellt. IKARUS (Kapitel 5.4) und PERSEUS (Kapitel 5.5) sind die hier erläuterten Beispiele von Energiesystemmodellen. Ersteres besteht aus Simulationsteilmodellen mit einem Optimierungsmodul, letzteres wird zu den Optimierungsmodellen gerechnet.

Diese Modelle waren an Modellexperimenten des Forums für Energiemodelle und energiewirtschaftliche Systemanalysen beteiligt. Alle hier erläuterten Modelle haben am Modellexperiment I teilgenommen. Am Modellexperiment II war nur MIS nicht beteiligt.

5.1 NEWAGE

Das Modell NEWAGE⁸⁹ (National, European, World-wide Applied General Equilibrium modelling system) gehört zur Gruppe der Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle. Umweltpolitische Maßnahmen können bzgl. ihrer Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft und auf das Emissionsniveau bewertet werden. Das Modell verbindet die Darstellung volkswirtschaftlicher Zusammenhänge mit technologischem Know-how. Es erlaubt die Bewertung von Politikszenerarien mit hoher Flexibilität bezüglich regionaler, sektoraler und zeitlicher Dimensionen. NEWAGE wurde als Teil des Planungssystems MESAP (Modular Energy System

⁸⁹ Die Darstellung von NEWAGE basiert im wesentlichen auf folgenden Veröffentlichungen: Böhringer 1996, Hoster et al. 1997, Böhringer 1999a, Böhringer 1997b, Böhringer 1998

Analysis and Planning)⁹⁰ am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart entwickelt.

Abb. 5.1 zeigt die Grundstruktur des Modells. Die Produktionsseite wird in Form einer Input-Output-Matrix, die 10, 25 oder 58 verschiedene Produktionsgüter umfassen kann. Schwerpunkt bildet der Energiesektor mit 6 verschiedenen Energieträgern. Auf der Nachfrageseite sind 13 Konsumgüterkategorien, die aus Kombinationen der Produktionsgüter gebildet werden. Zusätzliche wichtige Komponenten sind der Staat, die Endnachfrage, der Mehrwert mit Steuern und Kapital- bzw. Arbeitseinsatz, das verfügbare Einkommen und die Ausgaben der Haushalte.

Die wesentlichen Bestandteile sind wie folgt implementiert: Arbeit und Kapital gelten als Primärfaktoren der Produktion. Der Kapitalbestand ist im wesentlichen abhängig von Abschreibungen und der Investitionstätigkeit. Beim Arbeitsmarkt werden Ungleichgewichte in Form von Arbeitslosigkeit berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen Lohnabschlüssen und Arbeitslosenquote wird über den sogenannten Philipps-Zusammenhang implementiert. Der Staat ist für die Bereitstellung öffentlicher Güter und den Transfer von Sozialleistungen zuständig. NEWAGE berücksichtigt die wichtigsten Steuern und Sozialabgaben mit ihren Verzerrungswirkungen. Der Außenhandel berücksichtigt Energieträgerimporte als vollkommene Substitute, während in den übrigen Sektoren diese unvollkommen sind. Datenbasis für die Kalibrierung des Ausgangsgleichgewichtes bilden nationale Input-Output-Tabellen und weitere Statistiken.

Mit Hilfe von Kostenfunktionen werden die Substitutionselastizitäten zwischen den Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit, Energie und Material (KLEM) abgebildet. Die Substitutionsmöglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung werden ebenso wie die zur Substitution zwischen verschiedenen Energieträgern berücksichtigt.

⁹⁰ vgl. Schaumann und Schlenzig 1997

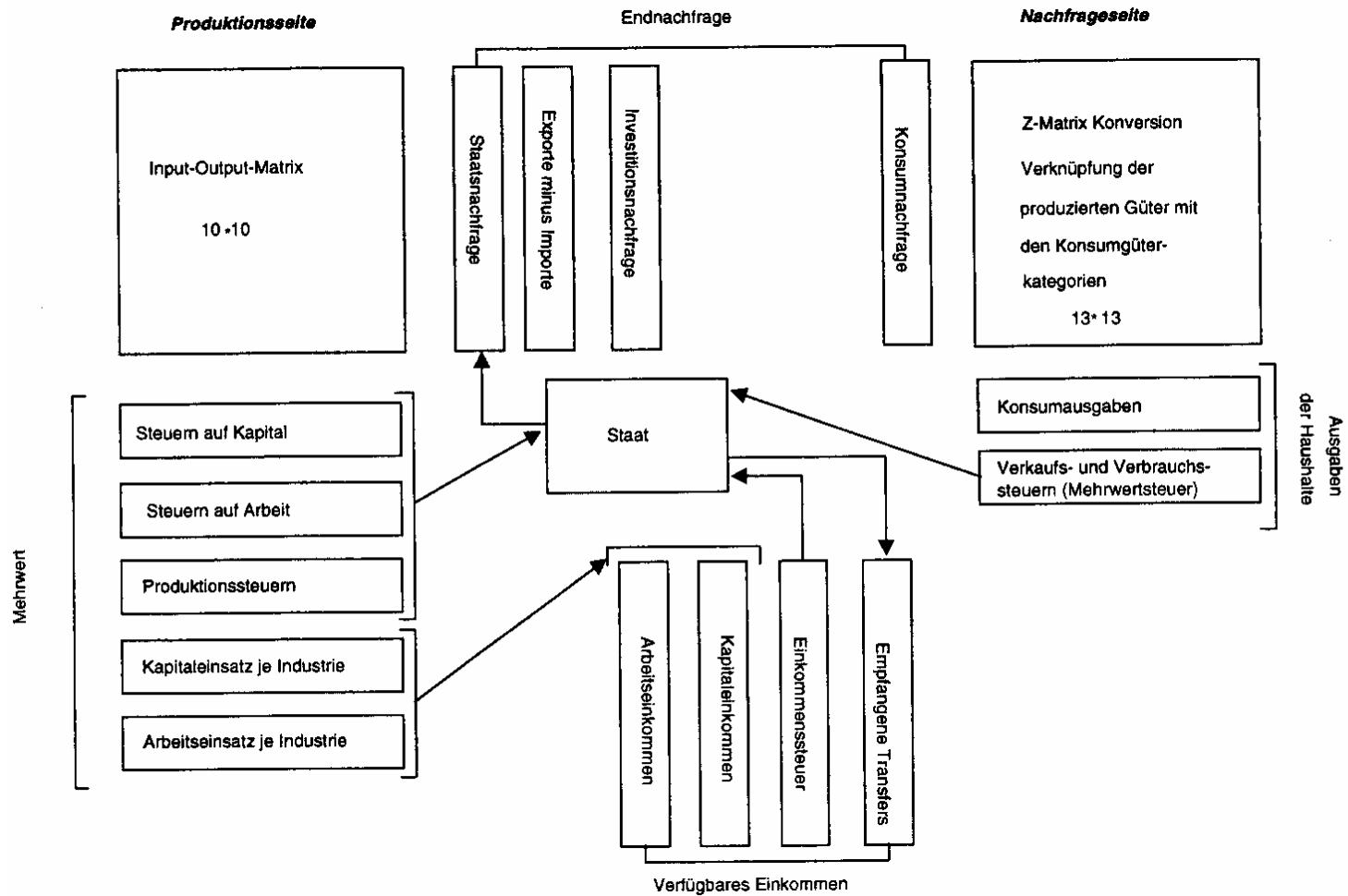


Abb. 5.1 Grundstruktur des Modells NEWAGE (aus: Böhringer 1999a, S. 194)

Im Gegensatz zu rein neoklassischen Modellen, bei denen von Gleichgewichtszuständen und vollständiger Konkurrenz in allen Bereichen ausgegangen wird, werden in NEWAGE Ungleichgewichte (z.B. Oligopole, politische Rahmenbedingungen, Arbeitslosigkeit) in Form von Preis- und Mengenrestriktionen zugelassen.

NEWAGE besteht aus drei geschlossene Submodellen:

- NEWAGE-N als Modell für die Bundesrepublik Deutschland,
- NEWAGE-E als Mehr-Länder-Modell für die Europäische Union,
- NEWAGE-W als Weltregionen-Modell mit den wichtigsten Welthandelsregionen.

Während NEWAGE-N Ungleichgewichte und Restriktionen am weitesten berücksichtigt, sind diese in NEWAGE-E und NEWAGE-W nur in sehr begrenztem Maße implementiert. Die Struktur der multi-regionalen Modellkomponenten in Form von Verknüpfungen nationaler Volkswirtschaften erlaubt die Analyse nationaler und internationaler Umweltpolitiken bzgl. Veränderungen der Umweltqualität und der Handelsbeziehungen.

In der klassischen Variante der angewandten Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle wird die Substitution von Faktoren mit Hilfe neoklassischer nicht-linearer Produktionsfunktionen dargestellt. Diese repräsentieren allerdings nur in sehr begrenztem Maße die Vielschichtigkeit realer technologischer Optionen, die anstatt ein gleichmäßiges Verhalten zu zeigen, vielmehr erhebliche Sprünge aufweisen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird in NEWAGE die sogenannte lineare Aktivitätsanalyse mittels partialanalytischer Technologiemodelle integriert. Diese erlaubt eine präzisere Abbildung technischer Systeme, wird dadurch aber wesentlich komplexer. Aufgrund von Restriktionen bei der Verfügbarkeit entsprechender Daten und der Begrenzung bei der Abbildung solcher komplexer Strukturen innerhalb des Modells, kann dieser Ansatz nur in Teilbereichen verfolgt werden. Für wesentliche Bereiche, z.B. die Elektrizitätserzeugung, werden die Substitutionsbedingungen auf Grundlage von Aktivitätsanalysen beschrieben, während andere weniger wichtige Teilbereiche mit Hilfe nicht-linearer Produktionsfunktionen und

Substitutionselastizitäten beschrieben werden. Letztlich sind damit Elemente von Bottom-up und Top-down Modellen integriert.

NEWAGE ermöglicht sowohl die Annahme von myopischen Zukunftserwartungen, d.h. Entscheidungen werden ohne Voraussicht über zukünftige Zustände getroffen und orientieren sich allein am derzeitigen Zustand, als auch von perfekter Voraussicht, d.h. zukünftige Entwicklungen werden bereits bei heutigen Entscheidungen berücksichtigt. Bei Anpassungsreaktionen auf wirtschaftspolitische Entscheidungen werden kurzfristige Anpassungskosten in Form des sogenannten partiellen „putty-clay“ Ansatzes⁹¹ beschreiben. Zur Berücksichtigung der Verteilungsgerechtigkeit und der Sozialverträglichkeit wird für den Haushaltssektor der repräsentative Verbraucher in verschiedene Gruppen disaggregiert.

Aufgrund des geschlossenen Ansatzes bei der Betrachtung der Gesamtwirtschaft ist eine konsistente Analyse von Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekten außerhalb der Energiewirtschaft und damit eine Bewertung gesamtwirtschaftlicher Effekte möglich. Aufgrund der alleinigen Fokussierung auf den Energiesektor werden mit Hilfe von Energiesystemmodellen grundsätzlich Aussagen bzgl. Auswirkungen innerhalb der Energiewirtschaft, aber nicht der Gesamtwirtschaft getroffen.

NEWAGE wurde bisher für eine Reihe von Fragestellungen im Rahmen nationaler und internationaler Klimaschutzstrategien eingesetzt, u.a. zu Kohlesubventionen⁹², zur ökologischen Steuerreform⁹³ und zu EU-Klimaschutzkonzepten⁹⁴. NEWAGE war an den Modellexperimenten I und II des Forums für Energiemodelle und energiewirtschaftliche Systemanalysen beteiligt.

⁹¹ Beim „putty-clay“ Ansatz wird von einer teilweisen Elastizität des Kapitals bezüglich eines geänderten Faktoreinsatzverhältnisses ausgegangen, nämlich im Zuge der Substitution alter Anlagen. „Putty-putty“ nimmt dagegen eine vollständige Elastizität des Kapitals vor und nach Bau von Anlagen an, während „clay-clay“ Ansätze von einer absoluten Starre des Kapitals bezüglich solcher Änderungen ausgehen.

⁹² Böhringer 1996

⁹³ Böhringer et al. 1997b

⁹⁴ Hoster et al. 1997

5.2 PANTA RHEI

PANTA RHEI⁹⁵ wurde in der Arbeitsgruppe von Prof. Bernd Meyer an der Universität Osnabrück entwickelt. PANTA RHEI ist ein ökonometrisches Input-Output-Modell, das auf das INFORGE-Modell (**I**nterindustrial **F**orecasting **G**ermany) aufbaut. INFORGE ist ein disaggregiertes ökonometrisches Simulations- und Prognosemodell⁹⁶. Es ist Teil des internationalen Modellverbundes INFORUM⁹⁷. Dieser Verbund beinhaltet 13 nationale Input-Output-Modelle und deckt eine Reihe von Volkswirtschaften von Europa, Nordamerika und Asien ab. Länder der Dritten Welt und Schwellenländer werden als Rest der Welt zusammengefaßt. Somit sind simultane Durchläufe aller Modelle mit konsistenten Weltmarktverflechtungen möglich. In PANTA RHEI wird die Darstellung der Energiebereiche und deren Luftschadstoffemissionen vertieft und stärker differenziert.

PANTA RHEI ist ein weitgehend disaggregiertes ökonometrisches Modell. Es verfolgt den Bottom-up Ansatz, d.h. die Wirtschaftsbereiche werden fein gegliedert abgebildet und davon ausgehend gesamtwirtschaftliche Schlußfolgerungen gezogen. PANTA RHEI bildet den Einkommenskreislauf geschlossen ab und ist durch vollständige Integration gekennzeichnet, d.h. die industriellen Verflechtungen werden ebenso wie die Verteilung der Einkommen, die Tätigkeit des Staates, die privaten Haushalte, die Energieverbräuche und die Schadstoffemissionen simultan modelliert. Abb. 5.2 gibt eine Übersicht über die Struktur von PANTA RHEI.

PANTA RHEI enthält weitgehend endogenisierte Variablen, nur wenige sind exogen. Exogen werden bestimmte Steuersätze, das Arbeitsangebot sowie die Weltmarktvariablen über den INFORUM-Modellverbund vorgegeben. Letztere umfassen die Import- und Exportströme, die Weltmarktpreise für Güter und Energie sowie den US-Zinssatz. Preise und Mengen sind konsistent miteinander verknüpft, nicht-lineare Beziehungen erlauben die Abbildung des Strukturwandels.

⁹⁵ Diese Darstellung des Modells basiert im wesentlichen auf folgenden Veröffentlichungen: Meyer et al. 1999a, Meyer et al. 1999b, Frohn et al. 1998

⁹⁶ vgl. Meyer und Ewerhart 1999

⁹⁷ vgl. Nyhus 1991

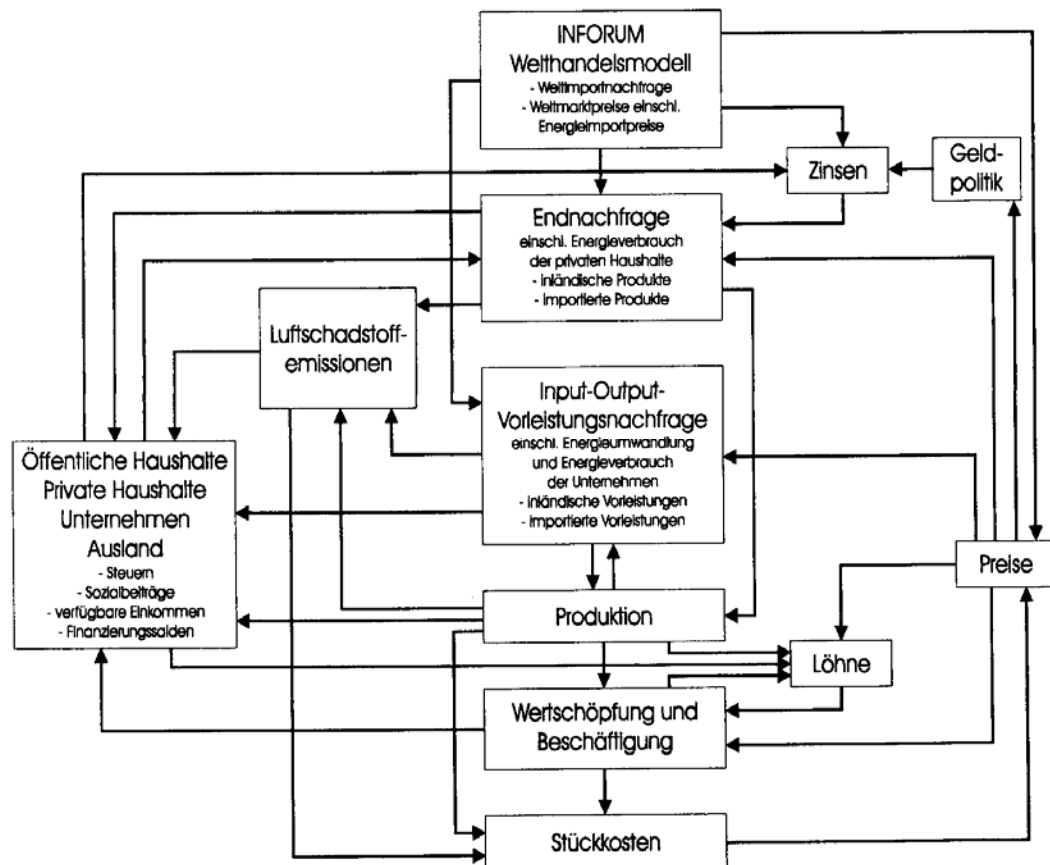


Abb. 5.2 Übersicht über die Struktur von PANTA RHEI
(aus: Meyer et al. 1999b, S. 87)

PANTA RHEI baut im Gegensatz zu Gleichgewichtsmodellen nicht auf das neoklassische Theoriegebäude auf, statt dessen geht es von einer begrenzten Rationalität der Agenten aus. Auf Verwendung von Produktionsfunktionen wird weitgehend verzichtet. Das Verhalten der Akteure wird empirisch geschätzt und statistisch auf Basis umfangreicher Zeitreihen abgesichert.

Die Datenbasis von PANTA RHEI bildet die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung (VGR) und die Umweltökonomische Gesamtrechnung (UGR) des Statistischen Bundesamtes, die Arbeitszeit- und Arbeitsvolumenrechnung des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) und die INFORM-Welthandelsdatenbank ab. Es werden Zeitreihen zurück bis 1980 simuliert und Projektionen üblicherweise bis zum Jahre 2010 erstellt. Die Input-Output-Rechnung, die Energieträgerrechnung und die Arbeitsvolumenrechnung sind die zentralen Komponenten des Modells.

Die Input-Output-Rechnung im Modell basiert auf Arbeiten des Statistischen Bundesamtes. Produktionsbereiche und die Gütergruppen werden funktionell jeweils in 58 Unterteilungen untergliedert. Neben der Herstellung und der Endnachfrage inländischer Produkte werden Importe, Vorleistungen der Produktion und die Endnachfrage sowohl für die inländische Produktion als auch für die Importe jeweils getrennt für die 58 Gütergruppen ausgewiesen. Die Bruttowertschöpfung wird ebenfalls getrennt für die 58 Produktionsbereiche berechnet. Die Endnachfrage wird für folgende sechs Komponenten separat ausgewiesen: Privater Verbrauch, Staatsverbrauch, Ausrüstungen, Bauten, Vorratsveränderung und Ausfuhr.

Die Energieträgerrechnung in PANTA RHEI basiert auf der Energieträgerrechnung des Statistischen Bundesamtes. Diese baut auf der Konzeption des „System of Integrated Environmental And Economic Accounting“ (SEEA) der Vereinten Nationen⁹⁸ auf.

PANTA RHEI unterscheidet 29 Energieträger. Der Energieinput wird für die 58 Produktionsbereiche⁹⁹ sowie die privaten Haushalte jeweils getrennt nach allen 29 Energieträgern ausgewiesen. Auf der Seite der Gütergruppen werden die 29 Energieträger im wesentlichen durch fünf Gütergruppen der Energiewirtschaft zugeordnet.

PANTA RHEI lehnt sich stark an die Systematik des Statistischen Bundesamtes an. Die Berechnung der Emissionen folgt dem Konzept des emissionsrelevanten Energieverbrauchs, d.h. er wird dort verbucht, wo die Emission tatsächlich in Form der Verbrennung stattfindet. Nicht-energetische Verbräuche und Ausfuhren werden entsprechend herausgerechnet. Emissionsfaktoren bilden letztlich die Basis der Emissionsberechnungen. Sie werden getrennt nach Energieträgern und Verwendungssektoren ausgewiesen. Die Emissionen von 8 Luftschadstoffen (CO₂, SO₂, NO_x, NMVOC, CH₄, CO, N₂O, Staub) werden berücksichtigt.

⁹⁸ vgl. UNO 1993.

⁹⁹ Die 58 Produktionsbereiche entsprechen der bis Mitte der 90er Jahre gültigen Struktur der deutschen Systematik. Die inzwischen gültige Verflechtungsstruktur von 59 Produktionsbereichen bzw. Gütergruppen basiert auf der neuen europäischen Statistik (WZ93).

Der Emissionsteil berücksichtigt trendbehaftete Emissionskoeffizienten. Der technische Fortschritt wird durch einfache Zeittrends abgebildet sowie als preisabhängiger Effekt berücksichtigt. Rückwirkungen der Luftschadstoffemissionen auf die Ökonomie und die Energiewirtschaft sind nicht implementiert.

In der Arbeitsvolumenrechnung stellen die Beschäftigtenzahlen sowie die jährlichen Arbeitsstunden aufgegliedert nach den 58 Produktionsbereichen zur Verfügung. Die Arbeitsmarktdaten sind damit wie andere Komponenten des Modells funktionell und nicht institutionell gegliedert. Effekte von Arbeitszeitverkürzungen können damit im Detail erfaßt werden.

PANTA RHEI wurde für eine Reihe von Fragestellungen im Zusammenhang mit einer ökologischen Steuerreform und mit Klimaschutzmaßnahmen verwendet: So wurden die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen einer CO₂-Steuer, einer Mineralölsteuererhöhung und von CO₂-Zertifikaten verglichen¹⁰⁰. Die wirtschaftlichen Auswirkungen einer CO₂-Steuer zur Erreichung des bundesdeutschen Reduktionsziels von 25 % bis 2005 wurden quantifiziert¹⁰¹. Im Auftrag des Statistischen Bundesamtes wurde die „Nachhaltigkeitslücke“ modelliert¹⁰². Weitere Auftraggeber bzw. Kooperationspartner sind das Bundesforschungsministerium (BMBF), Fraunhofer-ISI und das Umweltbundesamt. PANTA RHEI war sowohl am Modellexperiment I zum Klimaschutz als auch am Modellexperiment II zum Atomausstieg beteiligt¹⁰³. Ein Schwerpunkt von PANTA RHEI beim Modellexperiment I waren Variantenvergleiche zur Verwendung von Ökosteuerereinnahmen.

¹⁰⁰ siehe Meyer et al. 1999a

¹⁰¹ siehe Meyer et al. 1997

¹⁰² siehe Meyer et al. 1998

¹⁰³ Forum 1999, Ungenannt 2000

5.3 MIS

Das Modell MIS wurde im Rahmen des IKARUS-Projektes als makroökonomisches Input-Output-Modell an der Universität Oldenburg bzw. vom Bremer Energie-Institut entwickelt und angewendet¹⁰⁴.

MIS hat im Rahmen des IKARUS-Projektes folgende Aufgaben:

- Bereitstellung von Rahmendaten in Form von Referenzszenarien zur Generierung der Nachfrage für das Optimierungsmodell,
- als Instrument zur volkswirtschaftlichen Konsistenzprüfung der Ergebnisse des Optimierungsmodells im Bereich Energietechnologien.

MIS ist ein nachfragegetriebenes, dynamisches Top-down Modell. Eine Reihe von globalen Stellgrößen sind vom Benutzer festzulegen. Dies umfaßt die gesamtwirtschaftliche Nachfrage mit Wachstumsrate, Struktur der Nachfrage, Bevölkerung, Produktivität, aber auch Substitutionselastizitäten, Energiepreise u.a.. Zeitabhängigkeiten werden ebenso wie die Abhängigkeiten von Preisen und anderen Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Abb. 5.3 gibt eine Übersicht über die Struktur des Modells. MIS hat als wesentliche Komponenten einen Input-Output-Generator und ein Wachstumsmodell. Diese sind verknüpft mit einer Reihe von Submodellen: Investitionsmodell, Beschäftigungsmodell, Bevölkerungsmodell, Wohnungsmodell, Verkehrsmodell und Elektrizitätsmodell.

Die Input-Output-Struktur im MIS Modell kann wie folgt veranschaulicht werden (siehe Abb. 5.4). Das Modell umfaßt 8 Energiesektoren, 8 Verkehrssektoren sowie 14 andere Sektoren (Landwirtschaft, Industrie, Dienstleistungen). Die 58 Sektoren der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung werden damit zum einen zusammengefaßt, zum anderen aber auch in den Bereichen Energie und Verkehr weiter differenziert.

¹⁰⁴ Die Darstellung des Modells basiert im wesentlichen auf folgenden Veröffentlichungen: Gerdey und Pfaffenberger 1999, Pfaffenberger und Kemfert 1997, Kuckshinrichs et al. 1998, Grundmann 1999, Kemfert 1998.

MIS bildet die Volkswirtschaft insgesamt gröber als rein auf der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) basierende Systeme ab. Einige Teilbereiche (Verkehr, Raumwärme, Wohnungen und Elektrizitätswirtschaft) werden allerdings differenzierter dargestellt als rein VGR-basierte Modelle.

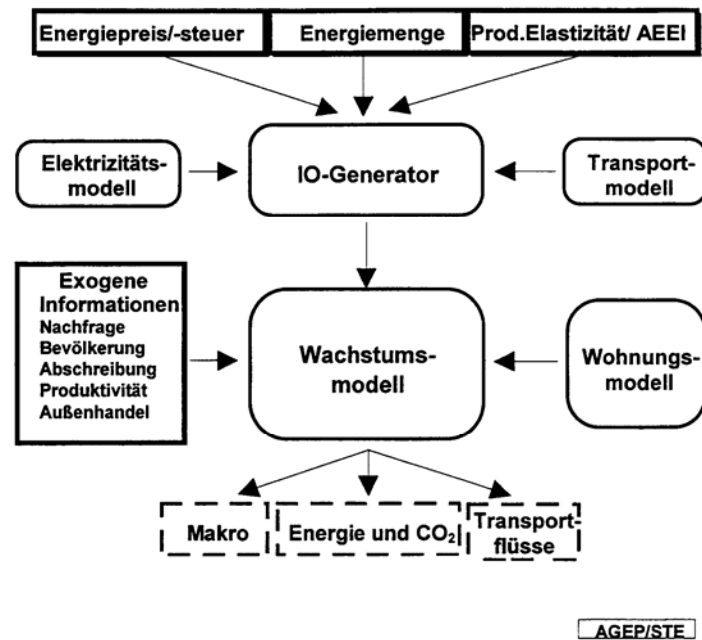


Abb. 5.3 Übersicht über die Struktur von MIS (aus: Grundmann 1999, S. 102)

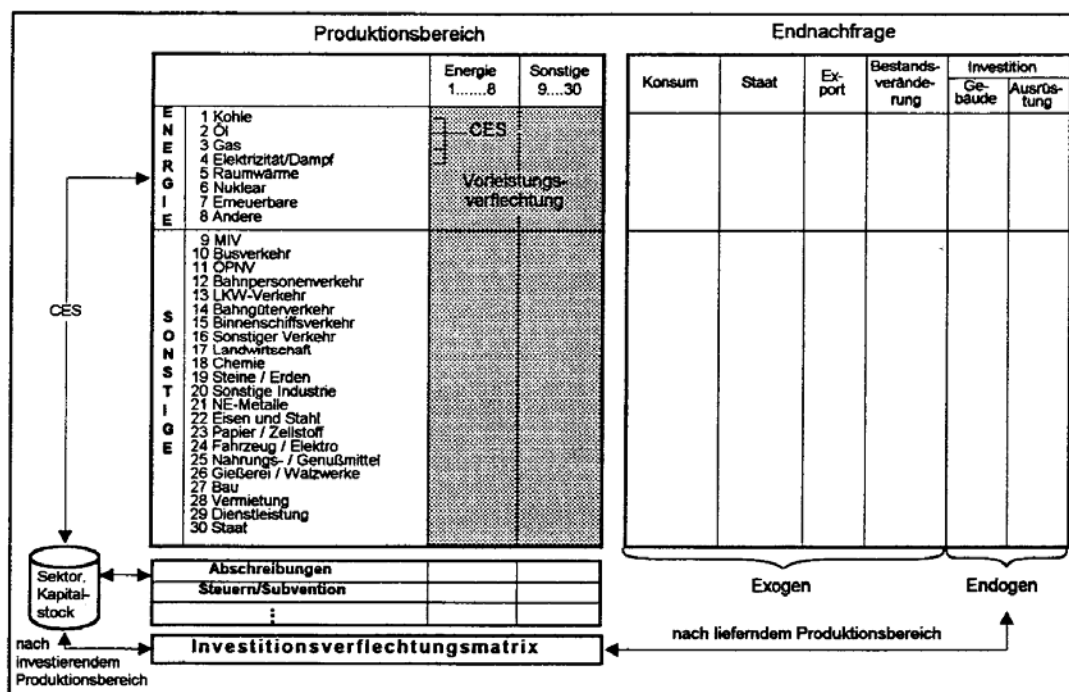


Abb. 5.4 Input-Output-Struktur (aus: Markewitz et al. 1998, S. 17)

Das Energiemodell bildet folgende Sektoren getrennt ab: Kohle, Mineralöl, Gas, Strom und Dampf, Raumwärme für Privathaushalte, Kernbrennstoffe, regenerative Energien und sonstige Energien.

Eine Übersicht über die Vorgehensweise im Modellverlauf gibt Abb. 5.5. Grundsätzlich ist die Vorgehensweise wie folgt: Nach der Vorgabe der Wachstumsrate und der Aufteilung bzgl. Konsum, Staatsverbrauch und Außenhandel erfolgt die Berechnung der erforderlichen Investitionen unter Berücksichtigung des Kapitalstocks als Konsistenzprüfung. Diese Prüfung ist ein iterativer Prozeß. Die Vorgaben werden so lange angepaßt, bis konsistente Ergebnisse vorliegen.

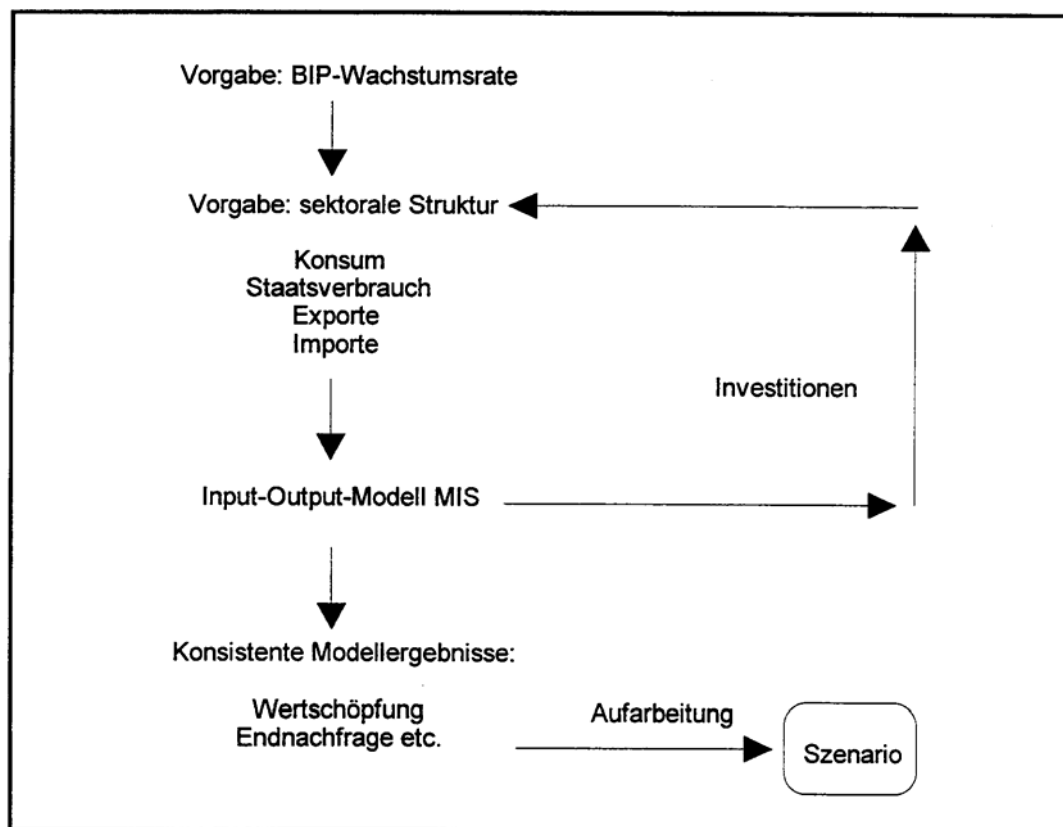


Abb. 5.5 Vorgehensweise im Modellverlauf (aus: Grundmann 1999, S. 107)

Während die Struktur der Nachfrage für Konsum, Staat, Exporte und Importe exogen vorgegeben sind, sind die Investitionen demgegenüber endogenisiert. Über ein separates Investitionsmodell wird die Verflechtung zwischen sektoralen Investitionstätigkeiten, liefernden und investierenden Sektoren sowie dem Kapitalstock abgebildet.

Mit Hilfe von Energieszenarien werden ausgehend von Preis- und Mengenvorgaben die Verteilung der Energieträger und die CO₂-Emissionen ermittelt. Die Substitution von Energie und Kapital wird anhand einer Produktionsfunktion basierend auf der „Constant Elasticity of Substitution“ (CES) festgelegt. Somit werden die Substitutionselastizitäten der jeweiligen Sektoren geschätzt. Zukünftige Energiesparmaßnahmen werden über autonome Energieeffizienzverbesserungen (AEEI) abgebildet.

Betrachtungszeitraum von MIS ist bis zum Jahr 2020. Konjunkturelle Einflüsse werden nicht berücksichtigt. Neben dem Basisjahr 1989 wird nur noch für 2005 eine Zwischenrechnung durchgeführt.

Ziel war es, MIS als gesamtwirtschaftliches Modell an IKARUS zu koppeln. Dies ist aber nur in Ansätzen erfolgt und würde später nicht weiterverfolgt. In der letzten Zeit wurden die neuesten Daten des Statistischen Bundesamtes einbezogen und die sektorale Struktur entsprechend angepaßt, das Strommodell verfeinert und der Zeithorizont in die Zukunft erweitert.

Anwendungsbeispiele der MIS-Modells sind Klimaschutzpolitiken zur CO₂-Minderung¹⁰⁵. So wurden Veränderungen beim Kapitaleinsatz und die Beschäftigungswirkung einer CO₂-Steuer mit einem Referenzszenario ermittelt. MIS war am Modellexperiment I des Forums für Energiemodelle und energiewirtschaftliche Systemanalysen beteiligt.

¹⁰⁵ Kemfert und Kuckshinrichs 1997, Kuckshinrichs 1996

5.4 IKARUS

IKARUS¹⁰⁶ (Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien) wurde im Rahmen eines Verbundforschungsvorhabens vom BMBF in Auftrag gegeben und von einer Reihe von Forschungsinstituten und Universitäten unter Führung des Forschungszentrums Jülich erarbeitet. IKARUS bildet das Energiesystem in Deutschland mit Energieflüssen, Emissionen und Kosten ab.

Das IKARUS Instrumentarium umfaßt diverse Elemente, darunter das MIS Modell (siehe Kapitel 5.3), das lineare Optimierungsmodell (IKARUS-LP), die Kopplung mit MARKAL und diverse Simulationsmodelle (Industrie, Verkehr u.a.). Dieser Abschnitt gliedert sich wie folgt: Nach der Historie des IKARUS Projektes folgt eine Erläuterung des IKARUS-LP und eine Übersicht über die Anwendung des IKARUS-MARKAL Modells.

Das IKARUS Projekt

IKARUS wurde vor dem Hintergrund des CO₂ Minderungsbeschlusses der Bundesregierung und der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Bundestages initiiert. Damit sollte die Umsetzung des Reduktionsbeschlusses und die Entwicklung von Reduktionsstrategien auf eine wissenschaftliche Basis gestellt werden.

IKARUS besteht im wesentlichen aus sehr stark disaggregierten Technologiedatenbanken, die sektoral strukturiert sind und für sich genommen im Prinzip eigenständige Simulationsmodelle darstellen. Die sektoralen Teilmodelle werden mit Hilfe eines Optimierungsmoduls zu einem Gesamtmodell zusammengefaßt und für politikrelevante Fragen eingesetzt. Als Optimierungsmodul wurde anfangs das LP-Modul auf Basis der linearen Programmierung entwickelt und eingesetzt. Später erfolgte die Kopplung mit MARKAL. In den späteren Anwendungen von IKARUS im Rahmen der Modellexperimente des Forums für

¹⁰⁶ Diese Darstellung basiert im wesentlichen auf folgenden Veröffentlichungen: Kraft et al. 1999, Markewitz et al. 1998, Martinsen et al. 1997, Frohn et al. 1998

Energiemodelle und des UBA-Projektes „Politiksznarien für den Klimaschutz“ wird IKARUS-MARKAL eingesetzt.

Das IKARUS-Projekt umfaßt folgende Teilprojekte:

- Modellentwicklung, Raumwärme, Strom und Fernwärme, Verkehr (STE, FZ Jülich)
- Datenbank (FIZ Karlsruhe)
- Primärenergie (DIW Berlin)
- Energieumwandlung, –speicherung, –transport, und –verteilung (Universität Stuttgart)
- Haushalte und Kleinverbraucher (TU München)
- Industrie (ISI Karlsruhe)
- Personen- und Güterverkehr (TÜV Rheinland)
- Querschnittstechniken¹⁰⁷ (FfE München)
- Verifikation (TFF, FZ Jülich)

IKARUS besteht aus folgenden Hauptkomponenten (siehe Abb. 5.6): Datenbank, Kettenmodell, Optimierungsmodell und makroökonomisches Modell.

Grundlage der Technikdatenbank bilden fein aufgelöste Einzeltechnologien. Es wurden etwa 2000 repräsentative Technologien einbezogen. Diese werden in Form hoch verdichteter Technologieaggregate mit gewichteten Anteilen von Einzeltechnologien zusammengefaßt. Diese werden zu einem Kettenmodell zusammengeführt. Dabei werden Einzeltechnologien mit vor- und nachgelagerten Technologiesequenzen verknüpft.

Einzeltechnikdaten sowie Modelldaten für die jeweiligen Bereiche wurden jeweils von den zuständigen Projektpartnern erarbeitet. Die Teilbereiche sind insoweit selbständig, daß detaillierte Bestandsanalysen und sektorale Szenarien separat erstellt werden können.

¹⁰⁷ Diese Kategorie umfaßt sektor- und branchenübergreifende Techniken zur Energieumwandlung, z.B. Pumpen, Antriebssysteme, Wärmetauscher, Verbrennungsmotor-Blockheizkraftwerke.

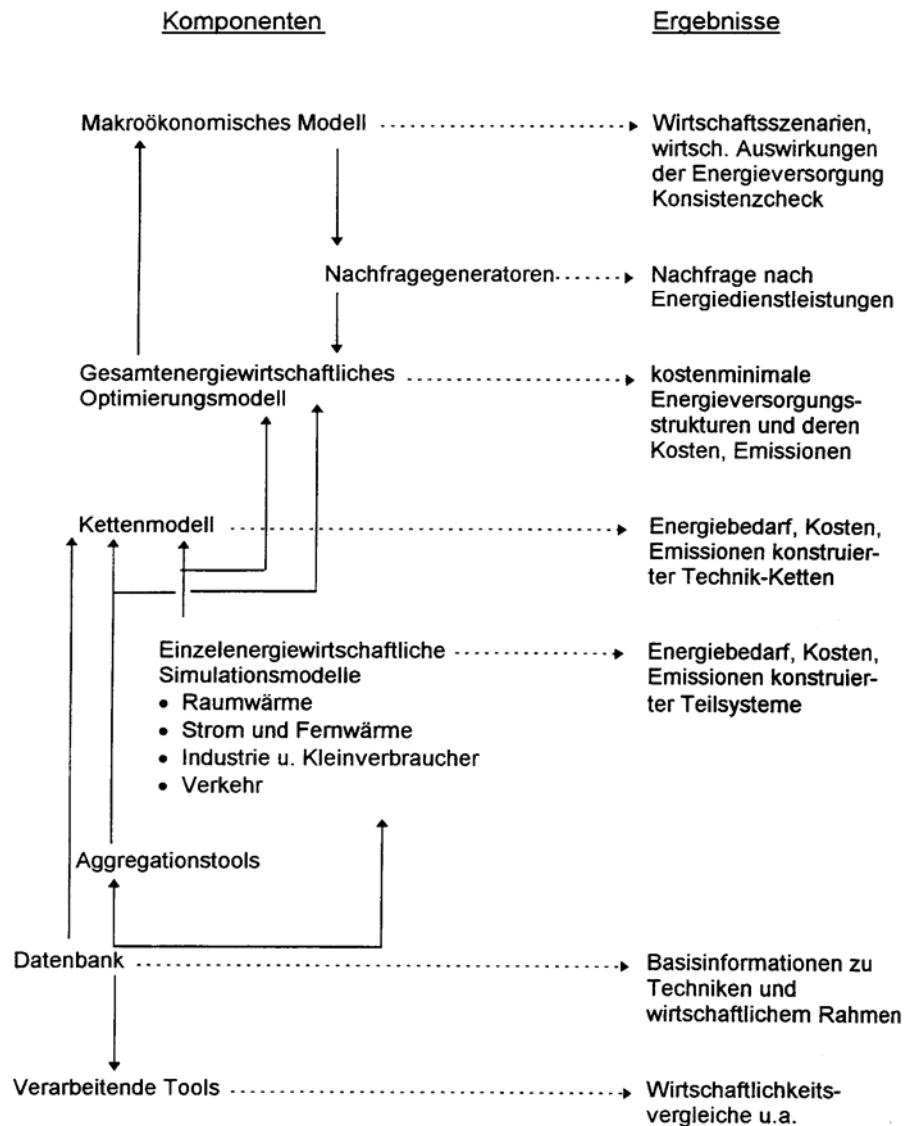


Abb. 5.6 Komponenten des IKARUS-Modells und deren jeweilige Ergebnisse
(aus: Hoffmann et al. 1997, S. 8)¹⁰⁸

Das IKARUS-LP Modell

Technologien werden als repräsentative Technologien nach dem Platzhalterkonzept charakterisiert. Diese werden nur mit ihren Eigenschaften (Energieinputs und -outputs, Kosten und Emissionen) beschrieben und werden erst quantifiziert und in das Kettenmodell eingebaut, wenn diese tatsächlich eingesetzt werden. Grundsätzlich wird jeweils die billigere Alternative bezogen auf eine bestimmte Nachfragekategorie

¹⁰⁸ Die Simulationsmodelle für Strom und Fernwärme waren ursprünglich geplant, wurden aber später nicht realisiert.

gewählt. Modellinterne Schranken (Bounds), z.B. hinsichtlich Verfügbarkeit, sind zusätzliche Kriterien bei der Auswahl von Technikkombinationen.

Einzelbereiche können in Form von Simulationsmodellen separat betrachtet werden und fließen in das Kettenmodell ein. Dies umfaßt Raumwärme, Strom und Fernwärme, Industrie und Kleinverbraucher sowie Verkehr. Deren Ergebnisse fließen sowohl in das Technikkettenmodell als auch in das Optimierungsmodell ein.

Das Optimierungsmodell besteht aus einem linearen Gleichungssystem mit linearer Zielfunktion sowie Restriktionen, Bilanzgleichungen und Bedarfsgleichungen. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird das sogenannte Simplex-Verfahren angewendet.

Zur Einbindung des Modells in die makroökonomischen Rahmenbedingungen diene das dynamische Input-Output-Modell MIS¹⁰⁹, das von der Arbeitsgemeinschaft Energie- und Systemplanung (AGEP) der Universität Oldenburg entwickelt wurde. Erste Ansätze zur Kopplung von IKARUS und MIS wurden später nicht mehr weiterverfolgt.

Die Energieflüsse werden im Modell mit den Bereichen Primärenergie, Energieumwandlung und Endenergie für alle wesentlichen Energieträger abgebildet (siehe Abbildung 5.7). IKARUS ist modular aufgebaut. Damit können einzelne Module verändert bzw. angepaßt werden, ohne daß alle Komponenten gleichzeitig angepaßt werden müssen. Das Optimierungsmodell IKARUS-LP verfolgt einen quasi-statischen¹¹⁰, technikorientierten Ansatz.

¹⁰⁹ siehe Kapitel 4.2 dieses Berichtes

¹¹⁰ Quasi-statische Modellierung bedeutet, daß die Optimierung getrennt für die drei Referenzjahre 1989, 2005 und 2020 und nicht über einen mehrperiodischen Zeitraum erfolgt.

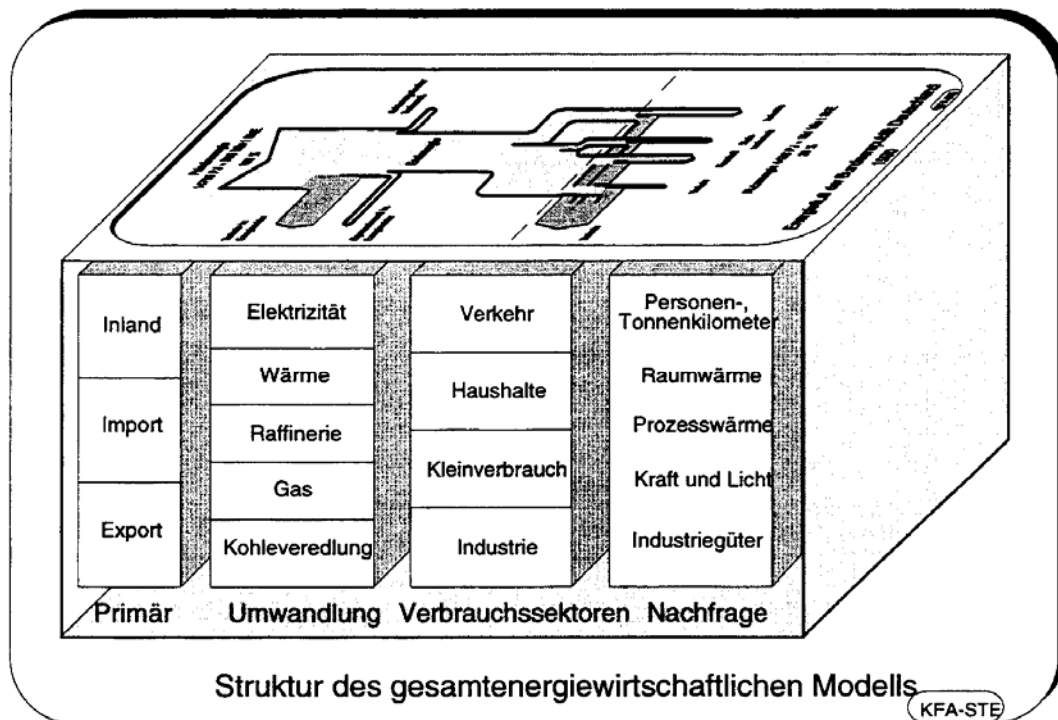


Abb. 5.7 Modulare Struktur des IKARUS-LP Modells
(aus: Martinsen et al. 1997, S. 16)

Durch die Vorgabe von Emissionsminderungszielen können kostenminimale Wege zur Erreichung der Ziele ermittelt werden. Neben der Kostenminimierung können auch andere Zielfunktionen gewählt werden. So kann z.B. festgelegt werden, daß die Emissionen bei einem gegebenen Kostenrahmen minimiert werden.

Ähnlich wie andere Dynamische Optimierungsmodelle können die Ergebnisse stark von den vorgegebenen Restriktionen (Bounds) abhängen. Ohne eine ausreichende Differenzierung würde das Modell abhängig von den Emissionsbegrenzungszielen einseitig in Richtung bestimmter technologischer Optionen tendieren.

Das IKARUS-Modell ermöglicht die Beantwortung von Fragen bezogen auf das Gesamtsystem, einzelne Sektoren, einzelne Energieträger und einzelne Technologien. Es berücksichtigt 90 Energieträgertypen, die zu vierzehn Hauptenergieträgern zusammengefaßt werden.

Bezogen auf die Bereiche Primärenergie, Energieumwandlung und Endenergie wird das Energiesystem in IKARUS wie folgt abgebildet:

Die primärenergieseitige Bewertung nicht-fossiler Energieträger erfolgt nach der Wirkungsgradmethode in Anlehnung an die Vorgehensweise der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.

Zur Beschreibung der Energieflüsse wurde das Energiesystem in die folgenden zehn Hauptsektoren mit weiteren Subsektoren differenziert: primäre Energieträger, Raffineriesektor, Veredlungssektor, Gassektor, Stromsektor, Wärmesektor, Industriesektor, Kleinverbrauch, Verkehr und Haushalte.

Auf der Nachfrageseite wird zwischen 70 Größen differenziert, die exogen festgelegt werden und im wesentlichen Energiedienstleistungen umfassen. Für einige wesentliche Bereiche werden zeitliche Einflüsse berücksichtigt. So wird für die Stromnachfrage zwischen drei Jahreszeiten und jeweils Tag und Nacht differenziert.

Die klimarelevanten Emissionen werden von der Primärenergieförderung bis zur Endenergienutzung erfaßt. Damit können auch vorgelagerte Emissionen sowohl auf nationaler Ebene für inländische Förderung als auch auf internationaler Ebene für Importe einfließen. Neben CO₂ werden auch andere Klimagase berücksichtigt, wenn diese bei der Verbrennung von Brennstoffen entstehen bzw. im Zusammenhang mit Energiesystemen stehen. Neben Kohlendioxid (CO₂) werden auch andere Klimagase CH₄, N₂O und fluoriierte Gase berücksichtigt, sofern Daten verfügbar sind.

Als Systemgrenze gilt das deutsche Energiesystem. Es werden die anthropogen energiebedingten Treibhausgasemissionen aus der Umwandlung und Nutzung von Energie erfaßt. Nicht berücksichtigt wird die nicht-energetische Nutzung von Energieträgern, industrielle Prozeßemissionen, Abfallwirtschaft (außer Müllverbrennung) sowie nicht-energetische Emissionen der Forst- und Landwirtschaft. Nicht erfaßt werden ebenfalls externe Kosten, CO₂-Abscheidungstechnologien, kumulierte Energieaufwendungen, graue Emissionen und steuerliche Aufwendungen als Kostenfaktor. Das Kostenkonzept berücksichtigt Investitionskosten, Entsorgungskosten, Stilllegungskosten sowie fixe und variable Kosten. Als Diskontrate wird 5 % angenommen.

Als Basisjahr wurde 1989 festgelegt. Die zukünftige Entwicklung sollte für die Jahre 2005 und 2020 modelliert werden. Später wurde eine Aktualisierung für 1995 als Basisjahr erstellt. Es wurden allein die Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger, die energiebedingten Emissionen, modelliert.

Das IKARUS-MARKAL Modell

IKARUS wurde inzwischen gekoppelt mit dem MARKAL-Modell eingesetzt. Es wurde für die Identifizierung einer kostenminimalen Klimaschutzstrategie für Deutschland verwendet. Es war am Modellexperiment I und II des Forums für Energiemodelle und für Energiewirtschaftliche Systemanalyse beteiligt¹¹¹. Im Rahmen der Vorbereitung des zweiten Klimaberichtes für die Klimarahmenkonvention wurde das FZ Jülich vom Umweltbundesamt beauftragt, das Forschungsprojekt „Politiksznarien für den Klimaschutz“ zu bearbeiten, welches in den ersten Vorhaben den Zeithorizont bis 2005 betrachtete¹¹², während die jüngste Arbeit den Zeitrahmen bis 2020 ausweitet¹¹³.

¹¹¹ siehe Kraft et al. 1999

¹¹² siehe Ziesing et al. 1997 und Schön et al. 1997.

¹¹³ Diekmann et al. 1999

5.5 PERSEUS

Die PERSEUS-Modellfamilie¹¹⁴ (**P**rogram **P**ackage for **E**mission **R**eduction **S**trategies in **E**nergy **U**se and **S**upply) wurde am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) der Universität Karlsruhe unter Leitung von Prof. Rentz entwickelt. Es handelt sich um ein Energie- und Stoffflußmodell, das auf dem Energieflußmodells EFOM (Energy Flow Optimization Model) und dem um den Bereich Umwelt erweiterten EFOM-ENV Modell basiert. Als Luftschadstoffe standen anfangs Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Staub im Vordergrund. Später wurden auch Treibhausgase aufgenommen.

PERSEUS gehört zu den Bottom-up aufgebauten Energiesystemmodellen. Es bildet Energiesysteme mit Schwerpunkt Energieumwandlungstechnologien ab. Das Energie- und Stoffflußmodell PERSEUS beschreibt die Transformation von Energie, Stoffen und Emissionen mit ihren technologischen, ökonomischen und ökologischen Charakteristika.

PERSEUS ist ein mehrperiodisches, lineares Optimierungsmodell. Es werden die Primärenergiegewinnung, Energieumwandlung und die Bereitstellung von Endenergie konsistent abgebildet. Neben technischen und umweltrelevanten Sachverhalten werden auch ökonomische Aspekte berücksichtigt. Unter Beachtung von Restriktionen wird eine kostenminimale Energieversorgung ermittelt. Neben der linearen Programmierung wurden eine Reihe weiterer Optimierungsalgorithmen für PERSEUS implementiert: unscharfe lineare Optimierung (Fuzzy Sets), Gemischt-Ganzzahlige Lineare Programmierung (GGLP), stochastische lineare Programmierung, iterative Optimierung und Dekompositionsalgorithmen.

Die verschiedenen Modelle der PERSEUS-Modellfamilie wurden für Analysen in einer Reihe von Ländern eingesetzt, für strategische Entscheidungen von Unternehmen und zur Beantwortung vielfältiger energiewirtschaftlicher und

¹¹⁴ Diese Darstellung basiert im wesentlichen auf folgenden Veröffentlichungen: Fichtner et al. 1999, Wietschel et al. 1997a

umweltpolitischer Fragen angewendet. Zielsetzung von PERSEUS ist die Erarbeitung von strategischen Empfehlungen zur Systemoptimierung. Optimierte wird mit Hilfe quantitativer, analytischer Optimierungsmethoden mit dem Ziel der Ausgabenminimierung. Es wird die Kapitalwertmethode mit dem abgezinste Ausgaben als Zielgröße verwendet.

PERSEUS beinhaltet eine detaillierte Technikdatenbank mit über 900 Technologie zur Umwandlung, Transport und Verwendung von Energie. Diese beinhaltet Beschreibungen von Input- und Outputenergie, Nutzungsgrad und Nutzungsdauer, Kosten und Emissionen.

Zeitverläufe und Ganglinien der Stromnachfrage und der Fernwärmeversorgung fließen in das Modell ein. So wird zwischen Sommer und Winter unterschieden und fünf bis sieben Zeitbereiche an typischen Tagen (z.B. 8.00 bis 10.00 an einem Sommerwerktag) festgelegt. Damit können auf der Nachfrageseite Energiesparmaßnahmen detailliert modelliert werden.

Abb. 5.8 gibt eine Übersicht über die Struktur von PERSEUS. Die Lastkurvendatenbank und Prozeßdatenbank sowie die Nutzenergienachfrageprognose liefern die Szenariodaten. Mit Hilfe der Strukturdaten und der Szenariodaten wird die Entwicklung des Energiesystems und die wirtschaftliche Entwicklung optimiert.

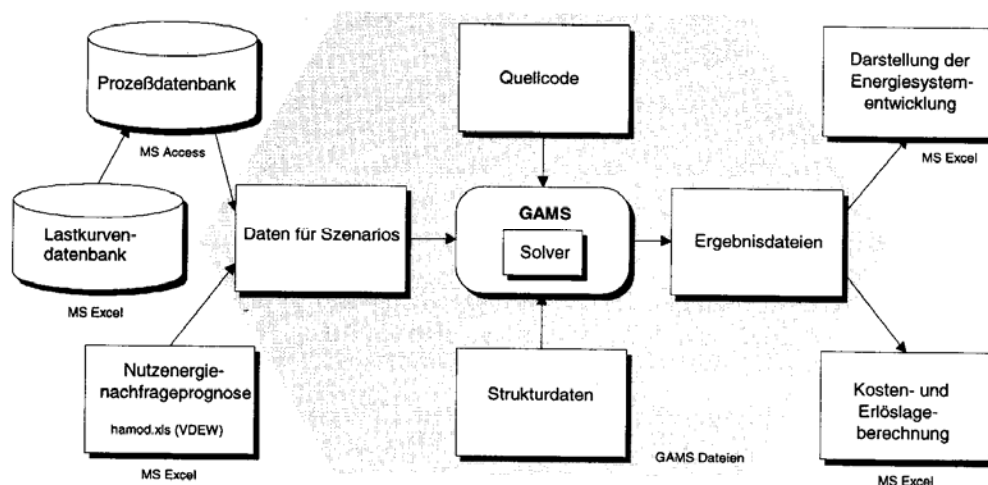


Abb. 5.8 Struktur von PERSEUS (aus: Fichtner et al. 1999, S. 220)

Innerhalb der PERSEUS-Modellfamilie wurden folgende spezifisch ausgerichtete Einzelmodelle entwickelt:

- das nationale Modell PERSEUS-NAT
- das Modell für Energieversorgungsunternehmen PERSEUS-EVU
- die interregionale Version PERSEUS-ICE (Interregional Competition Energy)
- PERSEUS-RRN: Resource Recovery Network
- PERSEUS-IRP: Integrated Resource Planning

PERSEUS war an den Modellexperimenten I und II des Forums für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen beteiligt.

Zur Modellierung von Klimagasemissionen werden neben CO₂ weitere Treibhausgase, die entsprechenden Sektoren sowie mögliche Minderungsoptionen berücksichtigt. Mit PERSEUS können auch andere Fragestellungen der Luftreinhaltung betrachtet werden: bodennahes Ozon und die Versauerung von Böden.

6 KRITISCHE FAKTOREN UND SYSTEMATISCHE UNTERSCHIEDE

Annahmen und Restriktionen können in der Energiemodellierung bedeutende Einflüsse auf die Ergebnisse haben. Im folgenden Kapitel wird erläutert, welche Faktoren besonders hervorzuheben sind und wie systematische Unterschiede zu erklären sind. Folgende Aspekte werden hier näher erläutert: die Effizienzlücke bzw. No-Regret-Maßnahmen, Technologieentwicklung, Basisszenarien und Endogenisierung vs. Detaillierungsgrad.

Für die Ermittlung der Auswirkungen von Maßnahmen ist von wesentlicher Bedeutung, von welchen Entwicklungen ohne Maßnahmen ausgegangen wird. Die Problematik der Basis- bzw. Referenzszenarien wird in Abschnitt 6.1 diskutiert.

Einige Modelle ermitteln CO₂-Reduktionspotentiale zu geringen oder sogar negativen Kosten. Andere Modelle berechnen schon für geringe CO₂-Reduktionen erhebliche Kosten. Diese als No-Regret-Maßnahmen bzw. Effizienzlücke bezeichnete Problematik wird in Abschnitt 6.2 erläutert.

Für die langfristige Emissionsentwicklung sind Fragen der Technologieentwicklung von entscheidender Bedeutung. In Abschnitt 6.3 wird beschrieben, wie Technologieentwicklung in den Energiemodellen berücksichtigt wird.

Ziel von Energiemodellen ist es, einen hohen Endogenisierungsgrad aber auch eine möglichst detaillierte Abbildung der Realität zu erzielen. Abschnitt 6.4 geht auf den Zusammenhang zwischen Endogenisierung und Detailtreue ein.

6.1 Basis- bzw. Referenzszenario

Um mögliche Auswirkungen von Maßnahmen im Klimaschutz abzuschätzen, werden zwei grundlegende Vergleiche gezogen:

- Jahr x gegenüber heute; Beispiel: Änderung der CO₂-Emissionen gegenüber 1990
- Jahr x mit Maßnahmen gegenüber Jahr x ohne Maßnahmen; Beispiel: Vergleich der Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes mit Klimaschutzmaßnahmen gegenüber einer Entwicklung ohne zusätzliche Maßnahmen.

Für beide Vergleichstypen ist von wesentlicher Bedeutung, was als Referenz- bzw. Basisszenario angenommen wird, d.h. wie sich Wirtschaft und Technologien ohne gezielte Klimaschutzmaßnahmen bis zum Jahr x entwickeln. In vielen Fällen sind diese Faktoren im Modell nicht endogenisiert, sondern müssen exogen vorgegeben werden.

Innerhalb von moderierten Studien mit mehreren Energiemodellen werden meist Annahmen über die Rahmenbedingungen, die gesamtwirtschaftliche Entwicklung, die der Bevölkerungszahl, der Energiepreise usw. festgelegt. Dies wurde auch in den beiden bisherigen Modellexperimenten des Forums für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen angewendet¹¹⁵. Damit war die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Modelle sichergestellt.

Wichtige Annahmen für die Teilbereiche umfassen:

- Raumwärme: Bevölkerungsentwicklung, Entwicklung der Wohnfläche
- Verkehr: Verkehrsnachfrageentwicklung, modal-split
- Energieerzeugung und Energieumwandlung: absolute Höhe der zukünftigen Brennstoffpreise und relatives Verhältnis der Brennstoffpreise zueinander

Beispielsweise ist für die Konkurrenzfähigkeit von erdgasbetriebenen GuD-Kraftwerken gegenüber mit Importkohle befeuerten Steinkohlekraftwerken das Preisverhältnis von Erdgas zu Steinkohle von großer Bedeutung. Wird in einem

¹¹⁵ Vgl. Forum 1999

Szenario ein niedriger Preis von Erdgas gegenüber Kohle angesetzt, sind erdgasbetriebene GuD-Kraftwerke konkurrenzfähig gegenüber kohlebefeuernden Kraftwerken. Damit wäre der klimabedingte Ausbau von erdgasbetriebenen GuD-Kraftwerken ohne Zusatzkosten möglich. Bei einem umgekehrten Preisverhältnis wäre dies demgegenüber nur mit Zusatzkosten zu erreichen.

6.2 No-Regret-Maßnahmen und Effizienzlücke¹¹⁶

Bei der Umsetzung von Maßnahmen zum Klimaschutz steht i.d.R. die Identifikation kostengünstiger Maßnahmen und die Ermittlung der Gesamtkosten für die Erreichung eines bestimmten Minderungsziels im Vordergrund. Über die Kosten der Erreichung von Minderungszielen gehen die Auffassungen weit auseinander. Tendenziell ist festzustellen, daß Studien von Energiesystemmodellen niedrigere Kosten für die Erreichung eines bestimmten Klimaschutzziels ansetzen als energieökonomische Modelle.

Energiesystemmodelle identifizieren z.T. Maßnahmen mit negativen Kosten, d.h. auch ohne Klimaschutzziel wäre es vom volkswirtschaftlichen Gesichtspunkt aus sinnvoll, diese Maßnahmen durchzuführen¹¹⁷. Insbesondere in weniger entwickelten Ländern wird von bedeutenden Potentialen berichtet (vgl. Abb. 6.1).

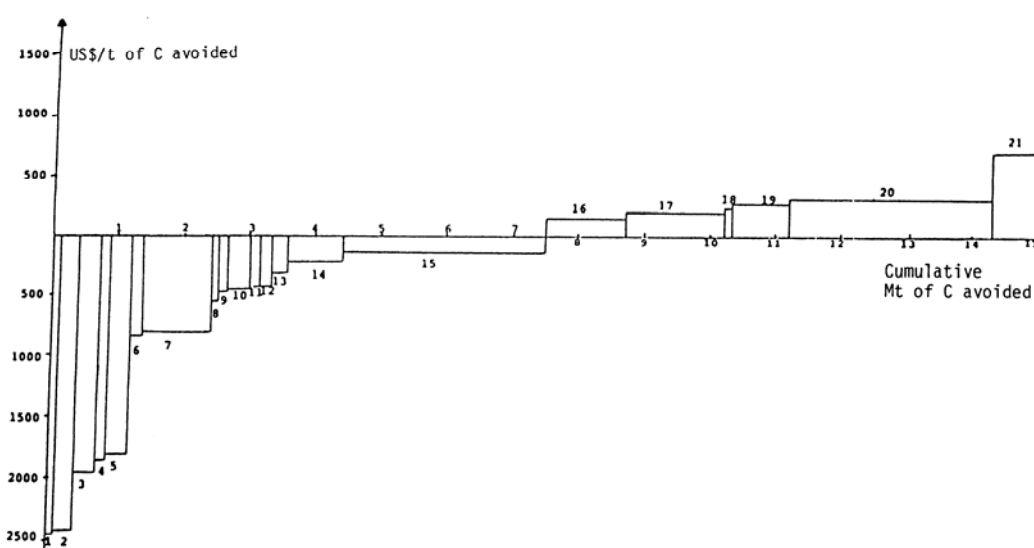


Abb. 6.1 CO₂-Minderungskostenkurve für Brasilien (Grubb et al. 1993)

Ähnliches – zumindest in eingeschränktem Maße – gilt auch für Deutschland (vgl. Jochem 1997). Diese Potentiale, die mit negativen bzw. ohne zusätzliche Kosten

¹¹⁶ vgl. Hakonsen/Mathiesen 1997, Hourcade/Chapuis 1995

¹¹⁷ Warum diese z.T. aus betriebswirtschaftlichen Gründen nicht rentabel ist, bzw. andere Hemmnisse bestehen, wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

durchgeführt werden können, werden unter dem Begriff No-Regret-Politiken bzw. Maßnahmen zusammengefaßt¹¹⁸.

Ökonomische Studien bezweifeln oft den Umfang bzw. die Existenz dieser Minderungspotentiale mit negativen Kosten. Es wird von einem rationalen Verhalten der Akteure ausgegangen und argumentiert, daß andere Gründe dafür verantwortlich sind, warum bestimmte Minderungspotentiale, die sich mittels geringer Kosten realisieren lassen, nicht umgesetzt werden. Zu diesen Gründen gehören Konsumentenpräferenzen, versteckte Kosten, Nebeneffekte und Marktunvollkommenheiten. Es ist auch zu berücksichtigen, daß Entscheidungen oft auf Basis betriebswirtschaftlicher Kalkulationen durchgeführt werden, während hier das volkswirtschaftliche Optimum anzustreben wäre.

6.2.1 Konsumentenpräferenzen

Zwei Produkte mit unterschiedlichen Charakteristika, z.B. Energieverbräuche, können vom technischen Standpunkt aus dasselbe leisten (Beispiel: Glühlampen und Energiesparlampe). Beide erzeugen Licht, aber mit unterschiedlichen Energieverbräuchen, Kaufpreisen, Lebensdauern und Lichtqualitäten. Wegen des hohen Preises von Energiesparlampen oder wegen der unterschiedlichen Lichtqualität werden diese nicht in dem Maße eingesetzt, wie eine alleinige Orientierung an der Lichtleistung und an den diskontierten Gesamtkosten erwarten lassen würde. In Mitteleuropa wird das von Glühbirnen Licht bevorzugt, während z.B. in Spanien eher das Licht von Energiesparlampen als angenehm empfunden wird.

Ähnliches gilt für Pkws, wo Energieeinsparpotentiale durch kleinere Motoren realisierbar wären. Auch hier gelten ähnliche Einschränkungen, daß Konsumenten sich oft bewußt für den größeren Motor entscheiden, weil damit auch zusätzliches Prestige verbunden ist, der über die alleinige Transportleistung hinausgeht.

¹¹⁸ Die Verwendung des Begriffs „No-Regret“ ist nicht einheitlich. In anderen Zusammenhängen können andere Anwendungen gebräuchlich sein.

In rein technischen Einheiten gemessen sind oft keine bedeutenden Unterschiede feststellbar. Trotzdem setzen sich am Markt nicht unbedingt die energieeffizienteren und weniger klimaschädlichen Geräte durch. Hierfür können eine Reihe von Gründen verantwortlich sein. Neben ökonomischen Gründen (Investitionskosten, Amortisationszeit etc.) spielen auch nicht offensichtliche Gründe eine Rolle. Dieser Bereich wird auch mit dem Begriff Konsumentenpräferenzen oder Komfortunterschiede bezeichnet.

Bei der Kaufentscheidung spielen damit auch andere Produktcharakteristika eine Rolle, die letztlich über die Energieeffizienz und die Auswirkungen auf die Klimagasemissionen entscheiden. Unklar bleibt weiterhin, ob und mit welchem Aufwand diese Konsumentenpräferenzen veränderbar sind. Während Energiesystemmodelle eher von einem begrenzten Aufwand und zunehmend klimafreundlichen Präferenzen ausgehen, bezweifeln dies energieökonomische Modelle. Least-Cost-Planning (LCP) und Integrated Resource Planning (IRP) versuchen entsprechende Präferenzen zu verändern.

6.2.2 Versteckte Kosten

Für die Kalkulation von Energiespar- und Klimaschutzmaßnahmen sind eine Reihe von Kostenarten von Bedeutung. Für die klassische Investitionskostenrechnung fließen die direkten Investitionskosten, die Betriebskosten und die Instandhaltungskosten ein. Darüber hinaus können allerdings noch weitere Kosten z.B. für die Vorbereitung, Planung und die Begleitung des Investitionsvorhabens anfallen. Wenn die optimale Lösung noch nicht bekannt ist und erst gesucht werden muß, sind damit zusätzliche Kosten verbunden. Hierunter fallen Kosten für die Informationsbeschaffung und für das Know-how zur Realisierung des Vorhabens.

Den Unterschied zwischen den reinen Investitionskosten und evtl. zusätzlich anfallenden versteckten Kosten wird im folgenden am folgenden Beispiel des Contracting erläutert. Ein Krankenhaus verfügt über eine Heizungsanlage. Da es selber über wenig energietechnisches Know-how verfügt aber deren Kosten minimieren möchte, wird ein Contracting-Unternehmen mit der Wärmeerzeugung

beauftragt. Dieses Unternehmen hat entsprechendes Know-how zur Identifizierung von günstigeren Optionen. Der festgelegte Preis für die gelieferte Wärme bewegt sich zwischen den bisherigen Kosten und den Investitionskosten für das Contracting-Unternehmen. Die Differenz zwischen dem vertraglich vereinbarten Preis und den Investitionskosten kann mit den versteckten Kosten verglichen werden, die die Kosten für Know-how, Information etc. des Contracting Unternehmens abdeckt.

Umstritten ist, ob und in welchem Umfang diese versteckten Kosten existieren. Wo die Energiekosten zu den bedeutende Kostenfaktoren gehören, ist davon auszugehen, daß dieses Know-how in ausreichendem Maße vorhanden ist und entsprechende Kosten für die Informationsbeschaffung nicht anfallen. Demgegenüber sind für Bereiche, wo die Energiekosten keine bedeutenden Kostengröße sind, entsprechende Informationsdefizite zu vermuten und zusätzliche verdeckte Kosten anzusetzen.

6.2.3 Nebeneffekte

Neben den primären Zielgrößen (Leistung, Kosten, CO₂-Emissionen) von Investitionen in Zusammenhang mit Klimaschutz können eine Reihe von Nebeneffekten auftreten. Diese können sowohl in positive als auch in negative Richtung wirken.

Oft vermindern Klimaschutzmaßnahmen nicht nur die CO₂-Emissionen, sondern auch die Emissionen von anderen Luftschadstoffen. So reduzieren sich mit dem Ausbau erdgasbetriebener GuD-Kraftwerke anstelle von Kohlekraftwerken nicht nur die CO₂-Emissionen sondern auch die SO₂-, NO_x- und Staubemissionen. Da durch andere umweltpolitische Richtlinien die Minderung dieser Schadstoffe gefordert wird, fallen diese Minderungskosten nur einmal an. Deshalb kann die Emissionsminderung der anderen Schadstoffe als Zusatznutzen verbucht werden.

Außerdem können bei Klimaschutzmaßnahmen neben der Emissionsminderung auch andere Zusatznutzen z.B. im sozialen Bereich oder bei der Beschäftigung (siehe Kapitel 7.1) realisiert werden.

6.2.4 Marktunvollkommenheiten

Die Realisierung von Maßnahmen mit negativen bzw. ohne positive Kosten kann auch dadurch gehemmt sein, daß sich aus verschiedenen Gründen kein Marktgleichgewicht einstellt:

- politische Vorgaben
- Informationsdefizite
- Aufspaltung von Kosten, Nutzen und Entscheidungsbefugnis

Ein Beispiel für den letzten Punkt dieser Marktunvollkommenheiten gehört das Vermieter-Mieter-Problem. Gemeint ist hiermit, daß der Mieter zwar die Kosten für die Brennstoff- und Betriebskosten der Heizungsanlage zu tragen hat, daß er aber keine Entscheidungsbefugnis bzgl. der Art und der Realisierung der Heizungsanlage hat. Diese liegt beim Vermieter. Da der Vermieter die Kosten für die Errichtung der Heizungsanlage zu tragen hat, aber nicht für die Betriebs- und insbesondere nicht für die Brennstoffkosten aufzukommen hat, wird er versuchen eine möglichst kostengünstige Heizungsanlage zu errichten. Demgegenüber liegt es im Interesse des Mieters, die Betriebs- und Brennstoffkosten möglichst gering zu halten. Da es aber in der alleinigen Entscheidungsbefugnis des Vermieters liegt, die Heizungsanlage auszuwählen und ggf. zur erneuern, stehen die Brennstoffkosten und damit verbundene CO₂-Emissionen nicht im Zentrum der Investitionsentscheidung.

Insbesondere bei der Raumwärme werden in Energiesystemmodellen große Potentiale für die Minderung von CO₂-Emissionen gesehen. Für Mietwohnungen bleibt unklar, wie die entscheidende Barriere, das Vermieter-Mieter-Problem, gelöst werden kann. Ein wichtiger Ansatz sind hier ordnungsrechtliche Maßnahmen, z.B. Anforderungen an Wärmedämmung und Heizungsanlagen. Bei Wohnungen und Häusern im Besitz der darin Wohnenden werden bisher nicht realisierte Einsparpotentiale u.a. mit Informationsdefiziten begründet.

Marktunvollkommenheiten und Marktungleichgewichte existieren auch in anderen Bereichen des Energiesektors. So kann die politische Vorgabe der

Mindestverstromung deutscher Steinkohle auch als Marktungleichgewicht betrachtet werden.

Es wird aber auch argumentiert, daß politisch-motivierte Marktungleichgewichte nicht nur negative Wirkungen auf die Umwelt haben, sondern auch dem Klimaschutz dienen können, indem z.B. regenerative Energien durch festgelegte Einspeisevergütungen gefördert werden. Diese wären ohne die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen nicht realisiert worden.

6.2.5 Arten von Zusatznutzen und -kosten

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß eine Reihe von Zusatzkosten, Barrieren und Hemmnisse gegenüber der Realisierung von CO₂-Minderungsmaßnahmen bestehen, die bei einer vordergründigen Betrachtung der Realisierungskosten nicht unbedingt erfaßt werden. Die gesamte Effizienzlücke wird von Grubb et al. (1991) in folgende sieben Kategorien unterteilt (siehe Abbildung 6.2):

- Konsumentenwiderstand (consumer resistance)
- versteckte Kosten (hidden costs)
- Rebound Effekte (take-back)
- korrigierbare Hemmnisse (correctable barriers)
- externe Kosten außerhalb von Treibhausgasen (non-greenhouse externalities)
- die von politischen Maßnahmen unabhängige Umsetzung (business-as-usual take-up)
- positive Konsumentenpräferenzen (positive consumer preference)

Grubb et al. (1991) unterscheidet zwischen den ingenieurtechnisch ermittelten, offensichtlich verfügbaren Einsparungen und den realisierbaren Einsparungen (siehe folgende Abb. 6.2). Die folgende Illustration dient der Veranschaulichung der verschiedenen Komponenten der Effizienzlücke, ohne notwendigerweise die tatsächliche Größe abzubilden.

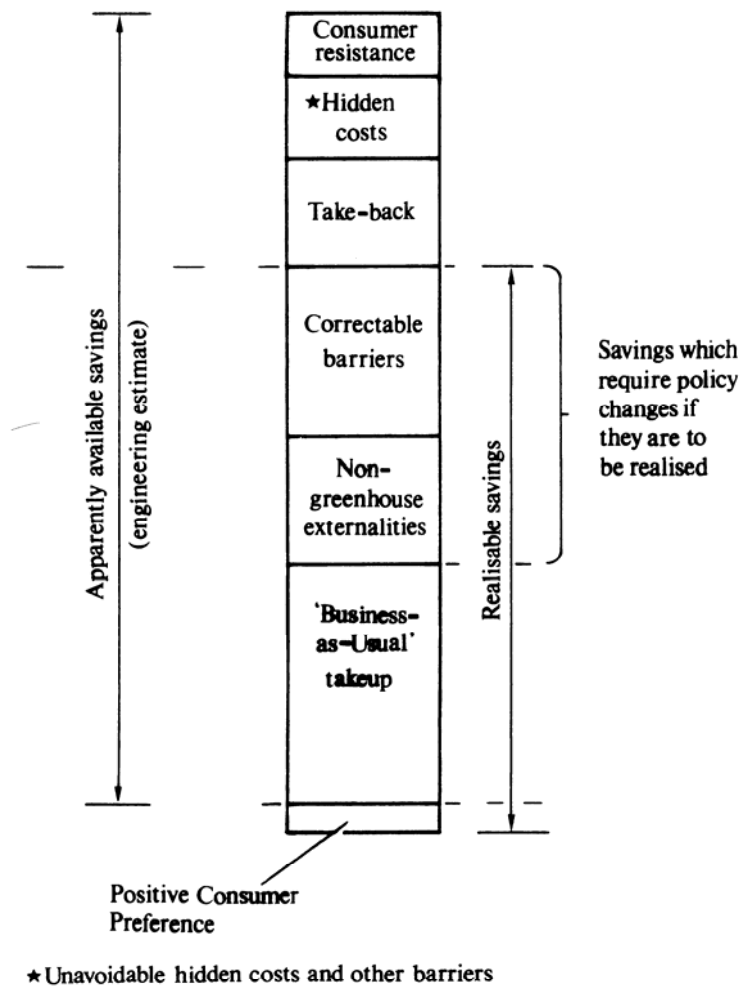


Abb. 6.2 Komponenten der Effizienzlücke (Grubb et al. 1991)

Die gesamte Höhe des Balkens gibt die ingenieurtechnische Abschätzung der verfügbaren Kostenminderungspotentiale wieder. Abzüglich des Konsumentenwiderstands, der versteckten Kosten und der Rebound-Effekte verbleiben noch die realisierbaren Kostenminderungspotentiale. Diese Potentiale können grundsätzlich mit Nettogewinn erzielt werden. Diese beinhalten die korrigierbaren Hemmnisse, die externen Kosten außerhalb von Treibhausgasen und die von politischen Maßnahmen unabhängige Umsetzung sowie zusätzlich die positiven Konsumentenpräferenzen. Letztlich bleibt offen, welcher Teil der Gesamtpotentiale tatsächlich realisierbar ist.

6.3 Technologieentwicklung¹¹⁹

Energiotechnologien haben sich in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt. Die Wirkungsgrade von Kraftwerken wurden verbessert. Das produzierende Gewerbe benötigt für die Herstellung derselben Produkte immer weniger Energie. Wirtschaftsentwicklung und Energieverbrauch haben sich entkoppelt.

Annahmen über die zukünftige Entwicklung von Technologien sind von großer Bedeutung für die langfristige Entwicklung der CO₂-Emissionen und die mit Klimaschutzmaßnahmen verbundenen Kosten. Dies ist sowohl für die Modellierung auf der disaggregierten Ebene von Einzeltechnologien als auch auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene relevant.

Historische Analysen haben gezeigt, daß es eine Reihe von technologischen Entwicklungen in der Vergangenheit über die Zeit oder abhängig von der installierten Leistung gegeben hat:

- Übergang von kohlenstoffreichen Brennstoffen hin zu kohlenstoffarmen Energieträgern: Abb. 6.3 zeigt den globalen Trend in Richtung einer kohlenstoffärmeren Energieversorgung seit Beginn der Industrialisierung.

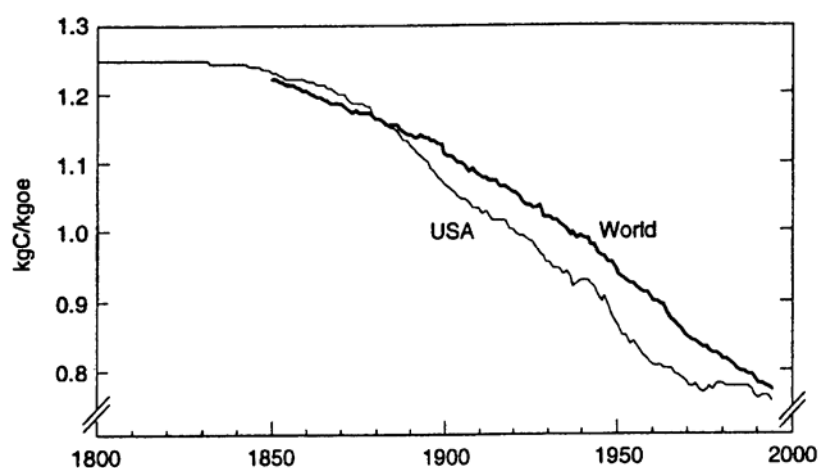


Abb. 6.3 Historische Entwicklung der Kohlenstoffintensität von Energieträgern (Grübler et al. 1999)¹²⁰

¹¹⁹ Vgl. auch Ausubel 1995, Azar/Dowlatabadi 1999, Carraro/Hourcade 1998, Goulder/Mathai 2000, Goulder/Schneider 1999, Gritsevskiy/Nakicenovic 2000, Grübler et al. 1998, Grübler/Messner 1998, Jaffe/Stavins 1994, Kydes 1999

- Abnahme der spezifischen Energieverbräuche in der Geschichte (siehe Abb. 6.4):

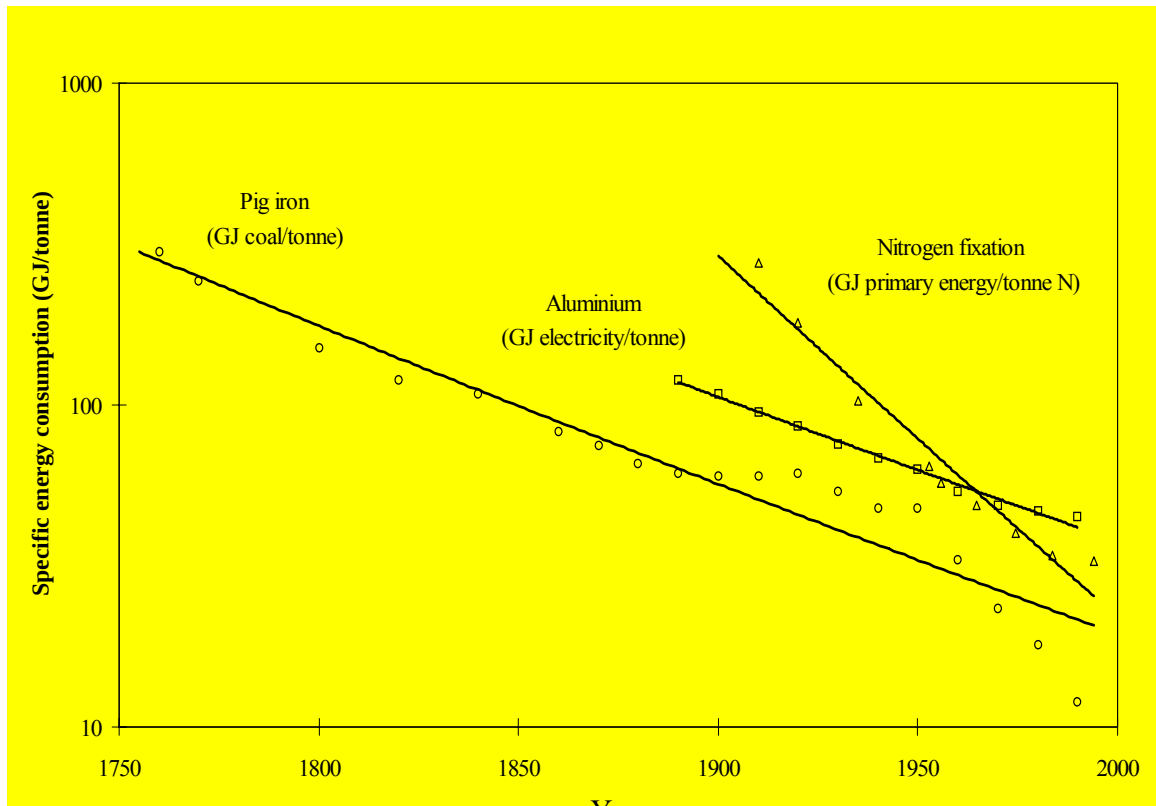


Abb. 6.4 Änderung der spezifischen Energieverbräuche über die Zeit (de Beer, 1998)

¹²⁰ Die Einheit (kgC/kgoe) gibt die Masse Kohlenstoff (kg C) im Verhältnis zu Einheiten Öläquivalent (kg oe) an. 1 kg Öläquivalent entspricht 44 MJ.

- Abnahme der Gestehungskosten von Energietechnologien mit zunehmender installierter Leistung (siehe Abb. 6.5):

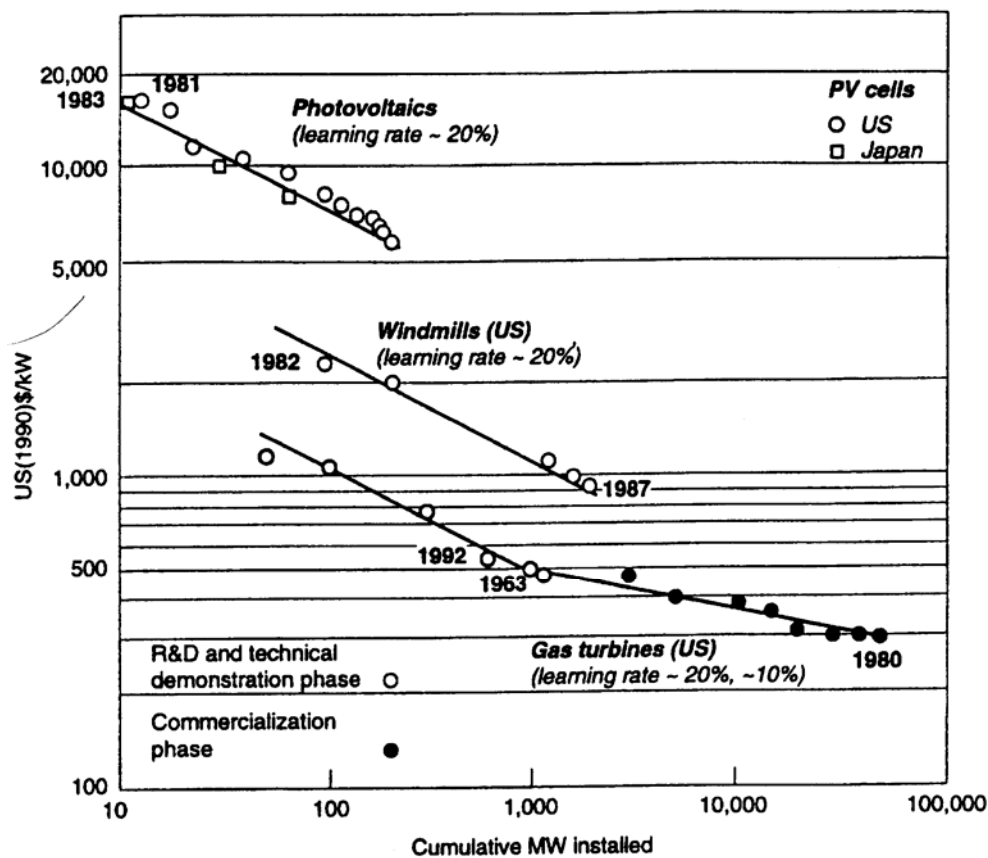


Abb. 6.5 Zusammenhang zwischen Investitionskosten von Energietechnologien und der installierten Leistung (Grübler et al. 1999)

Ob, in welchem Umfang und mit welchen Kosten sich die Gestehungskosten für Energie z.B. aus regenerativen Energien bzw. die Brennstoffzelle sich in Zukunft entwickeln werden und in welchem Umfang diese konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Energieträgern sind, wird für die langfristigen Kosten von Klimaschutz mitentscheidend sein.

In Energiemodellen wird die technologische Entwicklung in unterschiedlichen Differenzierungsgraden modelliert. Energiesystemmodelle, als Bottom-up Modelle, gehen von spezifischen Einzeltechnologien mit hohem Detaillierungsgrad aus und betrachten die technologische Entwicklung explizit auf der Ebene der Einzeltechnologien, mit ihren spezifischen Charakteristika bzgl. Kosten, Emissionsfaktoren etc.

Wenn die Entwicklung von Technologien vereinfacht oder in aggregierter Form beschrieben wird, sind folgende Aspekte relevant:

- Autonome Energieeffizienzsteigerung (autonomous energy efficiency improvement AEEI), d.h. die relativen Energieverbräuche von Geräten und Anlagen sich kontinuierlich verringern.
- Lernkurven: In Anlehnung an die Vorgehensweise in Abb. 6.5 werden kontinuierliche Verbesserungen der Erzeugungskosten abhängig von der installierten Leistung und der Marktdurchdringung angenommen.
- Energieverbräuche: Zunahme der Energieeffizienz über die Zeit
- Energiepreise: relativ zu anderen Energieträgern und zu anderen Substitutionsfaktoren (Arbeit, Kapital, Material).

6.4 Grad der Endogenisierung vs. Detaillierungsgrad¹²¹

Energiemodelle können über verschiedene Grade an Endogenisierung verfügen. Dies besagt, welcher Anteil an Faktoren innerhalb des Modells beschrieben und bestimmt wird. Ziel ist die Rückkopplung der Auswirkungen von Maßnahmen auf die Inputfaktoren.

Simulationsmodelle gehören zu den Modellen mit einem niedrigen Endogenisierungsgrad. I.d.R. werden Faktoren mittels Expertenschätzung exogen vorgegeben, nicht direkt mit Modellergebnissen verknüpft und über Szenarien variiert. Der technologische Detaillierungsgrad liegt bei Simulationsmodellen oft höher als bei anderen Modelltypen, indem z.B. technische Systeme und Voraussetzungen für die Umsetzung von Minderungsmaßnahmen differenzierter abgebildet werden.

Bei Optimierungsmodellen bleiben Wechselwirkungen mit der Gesamtwirtschaft i.d.R. exogen. Die Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten mit der Gesamtwirtschaft kann durch die Kopplung mit einem energieökonomischen Modell erzielt werden. Der Detaillierungsgrad technischer Systeme ist hier oft geringer als in Simulationsmodellen.

In Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen und einem Teil der makroökonomischen Modelle (z.B. PANTA RHEI) wird der gesamte Einkommenskreislauf in das Modell integriert und die Endnachfrage endogen bestimmt. In anderen energieökonomischen Modellen (z.B. MIS) wird z.B. die Endnachfrage nicht endogen ermittelt sondern exogen vorgegeben.

Grundsätzlich ist ein hoher Endogenisierungsgrad positiv zu bewerten, da Rückkopplungseffekte nicht abhängig vom Expertenwissen berücksichtigt werden, sondern implizit in das Modell integriert werden und damit auch komplexere Rückkopplungseffekte Eingang finden. Für Modelle mit niedrigem

¹²¹ vgl. auch die Diskussion von Böhringer/Welsch 1997 und Böhringer et al. 1998 zur partial- bzw. totalanalytischen Betrachtungsweise und zur Geschlossenheit des Modellansatzes

Endogenisierungsgrad können Rückkopplungseffekte nur stark vereinfacht einbezogen werden.

Nicht vergessen werden sollte allerdings auch, daß ein hoher Grad der Endogenisierung oft zu Lasten des Detaillierungsgrades geht. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle und Input-Output-Modelle als Modelle mit hohem Endogenisierungsgrad verfügen meist nur über eine sehr grobe Detailwiedergabe. Modelle mit hohem Detaillierungsgrad (z.B. viele Simulations- und Optimierungsmodelle) verfügen oft nur über einen geringen Endogenisierungsgrad. Den Zusammenhang zwischen Endogenisierungsgrad und Detailwiedergabe zeigt schematisiert folgende Abbildung 6.6.

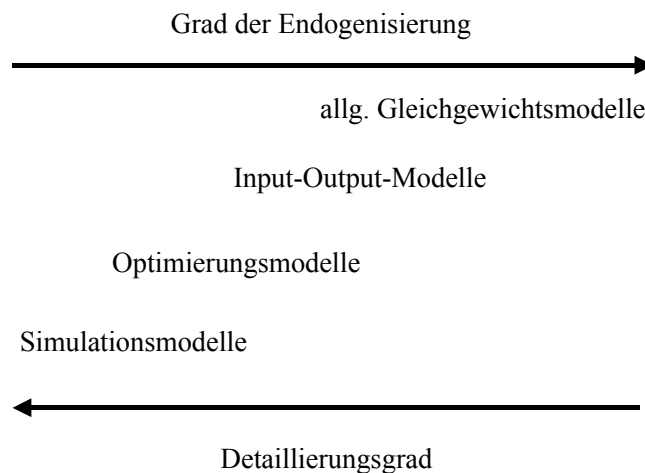


Abb. 6.6 Zusammenhang zwischen Endogenisierungsgrad und Detailwiedergabe

Am Ende ist es eine Abwägungsfrage, ob eine detailgetreue Abbildung oder eine umfassende Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten wichtiger ist. Beides angemessen zu erreichen, bedarf letztlich der Kopplung von Modellen oder Hybridmodelle.

7 ANWENDUNGEN VON ENERGIEMODELLEN

Energiemodelle werden in einer Reihe von Kontexten und für eine Vielzahl von Fragestellungen angewendet. Das Spektrum möglicher Fragestellungen wurde bereits im Kapitel 2 erläutert. Im folgenden werden beispielhaft einige Anwendungsbeispiele vertieft vorgestellt.

Ob und in welchem Umfang durch Energiesteuern neue Arbeitsplätze geschaffen werden, ist wichtig für die politische Durchsetzbarkeit von Energiesteuern und Klimaschutzmaßnahmen. Gründe für die Unterschiedlichkeit in den Ergebnissen verschiedener Studien werden in Abschnitt 7.1 erläutert.

Kraft-Wärme-Kopplung gilt als klimaschonende Technologie zur Strom- und Wärmeerzeugung. Es wird allerdings nur von einem Teil von Modellergebnissen bestätigt, daß diese zu den kostengünstigen Maßnahmen gehört. Andere setzen demgegenüber Prioritäten bei anderen Technologien. Diese Thematik wird in Abschnitt 7.2 aufgegriffen.

Der Bereich Verkehr ist schon heute eine wichtige CO₂-Quelle. Es wird erwartet, daß der Verkehr in seiner Bedeutung noch weiter zunehmen wird. In Abschnitt 7.3 wird die Modellierung des Verkehrs in Energiemodellen dargestellt. Ergänzend wird beispielhaft als reines Verkehrsmodell das TREMOD des ifeu-Instituts vorgestellt.

7.1 Beschäftigungseffekte und Klimaschutz

Umweltpolitische Maßnahmen sind in Deutschland heute oft leichter gesellschaftlich durchsetzbar, wenn positive gesamtwirtschaftliche und auch beschäftigungswirksame Effekte zu erwarten sind¹²². Genau diese These wird unter dem Stichwort „doppelte Dividende“ diskutiert: Können umweltpolitische Maßnahmen sowohl positive Wirkungen auf die Umwelt (erste Dividende) und positive Effekte für die Beschäftigung und die Volkswirtschaft (zweite Dividende) erreichen. Für Maßnahmen zum Klimaschutz auf der einen und eine ökologische Steuerreform mit einer CO₂- bzw. Energiesteuer auf der anderen Seite wird diese intensiv diskutiert. Energiemodelle haben hier wichtige Beiträge geleistet.

Im folgenden wird eine Übersicht über die Anwendung von Energiemodellen im Zusammenhang mit Beschäftigungseffekten von Klimaschutzmaßnahmen und von Energiesteuern gegeben. Es werden wesentliche Konzepte der Herangehensweise vorgestellt und Ursachen für die Unterschiede zwischen Modellergebnissen aufgezeigt.

Ziel dieses Abschnittes ist es nicht zu klären, welcher Beschäftigungseffekt von einer Klimapolitik ausgeht, sondern vielmehr die Gründe für die Abweichungen in den Modellergebnissen darzustellen.

Nach einem Überblick über die Bandbreite prognostizierter Beschäftigungseffekte folgt eine ausführliche Darstellung der viel diskutierten Studien des DIW und des RWI. Anschließend werden wesentliche Faktoren bzw. kritische Größen für die Modellierung der Beschäftigungswirkung von klimapolitischen Maßnahmen erläutert. Zum Abschluß folgt ein Ausblick.

¹²² Dieses mag für andere Länder unterschiedlich sein. So sind in den Niederlanden Beschäftigungseffekte von Klimaschutzmaßnahmen vor einigen Jahren thematisiert worden, inzwischen ist dies dort aber ohne Bedeutung.

7.1.1 Die Bandbreite der Ergebnisse

Eine Vielzahl von Studien zu Beschäftigungseffekten einer ökologischen Steuerreform bzw. von einer Energie- bzw. CO₂-Steuer wurden erarbeitet¹²³. Diese gehen von stark abweichenden Steuersätzen oder Maßnahmenbündeln aus. Auch ist die Frage der Rückvergütung der Steuereinnahmen unterschiedlich gelöst.

Bei diesen Untersuchungen zeigen sich starke Abweichungen in den Beschäftigungseffekten klimapolitischer Maßnahmen: von 1,5 Mio. zusätzlichen Arbeitsplätzen (Meyer et al. 1997) bis zu 5 % Verlust der Gesamtbeschäftigung (Böhringer et al. 1997b). Abbildung 7.1 gibt eine Übersicht über die Bandbreite der Ergebnisse.

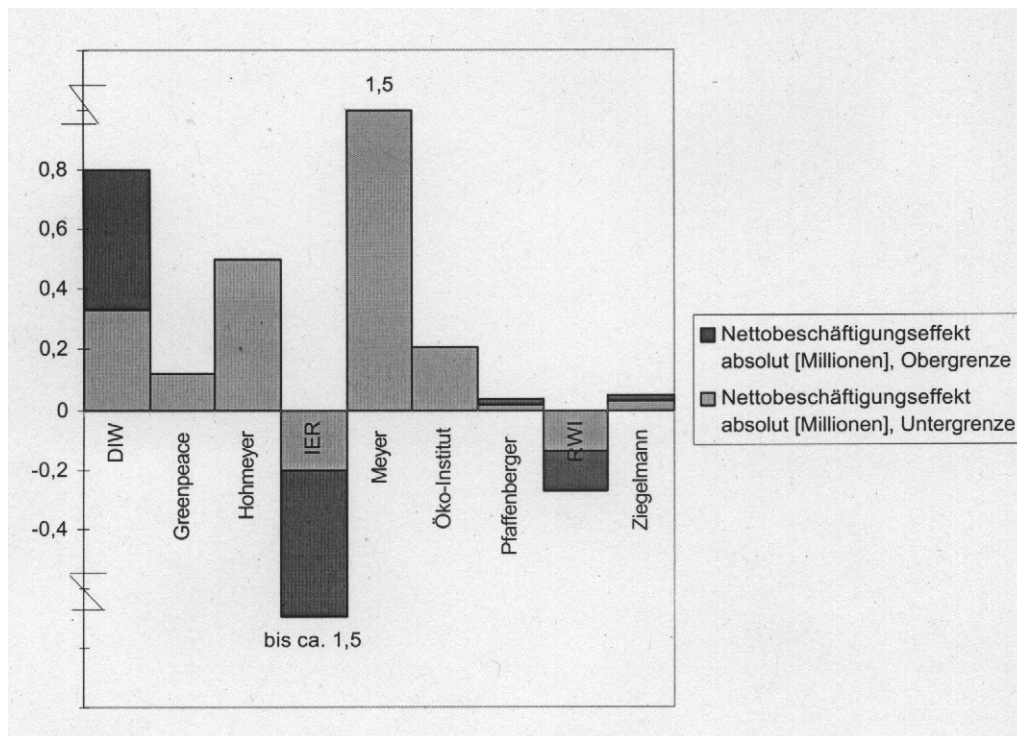


Abb. 7.1 Übersicht über Modellergebnisse zu Beschäftigungseffekten klimapolitischer Maßnahmen (aus: Scheelhaase 2001)

¹²³ vgl. Scheelhaase 2000, Böhringer et al. 1998, Böhringer/Welsch 1997, Kirchgässner 1998, Bach et al. 1995b, Hillebrand/Wackerbauer 1996, Hettich et al. 1996, Richter/Wiegard 1997, Lottje 1998, Walz 1997, Mohr et al. 1997, Welsch 1998, Goulder 1994, Matthes 1997, Kemfert/Welsch 2000, Hillebrand et al. 1996, Bach et al. 1995, Böhringer et al. 1997a, Linscheidt/Linnemann 1997, Böhringer et al. 1997b

Einige Studien¹²⁴ ermittelten insgesamt einen positiven Beschäftigungseffekt, andere¹²⁵ berichteten von Beschäftigungsverlusten gegenüber dem jeweiligen Referenzszenario.

Da diese Modellergebnisse sich nicht auf dasselbe Maßnahmenbündel beziehen, ist dieser Vergleich mit großer Vorsicht zu genießen. Meyer et al. (1997) untersuchen die Auswirkungen einer von 10 DM/t CO₂ über 10 Jahre auf 420 DM/t CO₂ steigenden CO₂-Steuer. DIW und RWI betrachten eine Energiesteuer, die über einen Zeitraum von 15 Jahren jährlich zu einer realen Verteuerung von Energie um 7 % führt. Erhebliche Unterschiede ergeben sich auch in der Rückverteilung der zusätzlichen Steuereinnahmen: Diese reicht von einer Pro-Kopf-Auszahlung an die privaten Haushalte, über eine Senkung des Arbeitgeberanteils der Sozialversicherung bis hin zur Senkung von Steuern für Unternehmen.

Wenn die Unterschiede in der Zielrichtung und Fragestellung der Ergebnisse berücksichtigt werden, ist nicht verwunderlich, daß es zu erheblichen Abweichungen in der Größe der Beschäftigungseffekte kommt. Dabei weichen die Auswirkungen auf das Steuersystem, die Steuerquote und das Nettosteueraufkommen stark voneinander ab.

Im folgenden werden beispielhaft zwei Studien zu gesamtwirtschaftlichen Wirkungen und Beschäftigungseffekten von Energiesteuern erläutert¹²⁶:

- die im Auftrag von Greenpeace vom DIW erstellte Studie „Wirtschaftliche Auswirkungen einer ökologischen Steuerreform“¹²⁷
- die RWI-Studie „Regionalwirtschaftliche Wirkungen von Steuern und Abgaben auf den Verbrauch von Energie“¹²⁸

¹²⁴ Meyer et al. 1997, Bach et al. 1995, Kirchgässner 1998, Scheelhaase 2000, Welsch 1998, Kirchgässner 1998, Bach et al. 2001b

¹²⁵ Böhringer et al. 1997a, Hillebrand/Buttermann 1996

¹²⁶ vgl. auch Linscheid/Linemann 1997

¹²⁷ Bach et al. 1995

¹²⁸ Hillebrand/Buttermann 1996

Beispiel DIW-Studie¹²⁹

Ziel der DIW-Studie ist es, die Folgen einer umfangreichen Energiebesteuerung zu untersuchen. Das Aufkommen der Steuer wird zur Senkung der Abgabenlast der Steuerzahler und für eine direkte Rückerstattung verwendet.

Die DIW-Studie verwendet drei getrennte Modellrechnungen¹³⁰: eine Prognose der Entwicklung des Energieverbrauchs, eine Schätzung der sektoralen Preisentwicklung auf Basis eines statischen Input-Output-Ansatzes, eine Simulation der Konjunktur mit Hilfe eines ökonometrischen Makromodells.

Annahmen:

- Reale Verteuerung der Energie um 7 % jährlich über einen Zeitraum von 15 Jahren
- Rückfluß des Steueraufkommens zu 70 % zur Senkung der Arbeitgeberanteile zur Sozialversicherung, 30 % als pauschaler Pro-Kopf-Transfer

Das Modell des DIW verfolgt einen bottom-up Ansatz und quantifiziert - differenziert nach Verbrauchssektoren – technologische und verhaltensbedingte Einsparpotentiale. Für Privathaushalte wird für den Zeitraum von 15 Jahren von einer Einsparung der gesamten Endenergie (Brennstoffe plus Strom) von 27 % und für Kleinverbraucher von 20% gegenüber dem Referenzszenario ausgegangen. Im Verkehrsbereich wird trotz erheblicher Verteuerung von Benzin um 41 % und von Diesel um 56 % der Endenergieverbrauch des Verkehrs nicht abnehmen, sondern im Vergleich zu 1989 leicht ansteigen. Gegenüber dem Referenzszenario wurde beim Benzinverbrauch eine Minderung um 3 % und für Diesel um 20 % berechnet. Für das verarbeitende Gewerbe ergibt sich im Jahre 2010 eine Abnahme des Energieverbrauchs um 5 % gegenüber dem Referenzszenario.

Grundansatz des DIW-Modells ist, daß steuerbedingte Energiepreiserhöhungen folgende Effekte haben:

- Umsetzung verfügbarer aber bisher nicht realisierter Energieeinsparung zur Substitution von Energie durch andere Produktionsfaktoren und

¹²⁹ Bach et al. 1994

- zur Beschleunigung des technischen Fortschritts in Richtung geringerer Energieintensität.

Veränderungen der Wirtschaftsstruktur und Standortverlagerungen ins bzw. aus dem Ausland werden nicht berücksichtigt. Der Produktionswert bleibt deshalb gegenüber dem Referenzszenario unverändert.

Nach 10 Jahren ergeben sich für die Basisvariante Beschäftigungsgewinne von 610.000 gegenüber dem Referenzszenario. Diese variieren zwischen 300.000 und 800.000 für unterschiedliche Annahmen bzgl. Wechselkursentwicklung, Tariflohnentwicklung, Struktur- und Substitutionseffekte sowie öffentliche Investitionen.

Beispiel RWI-Studie¹³¹

Ziel der RWI-Studie ist es, eine kostenminimale Stromerzeugung mit Emissionsreduktionen bei gegebenen Technologien und Kosten zu ermitteln. Randbedingungen wie die Mindesteinsatzmengen von Steinkohle sowie Begrenzungen der technischen Ausbaupotentiale von regenerativen Energien werden berücksichtigt.

Die RWI-Studie beruht auf zwei Teilmodellen: einem Kraftwerksmodell¹³² und einem Energiemodell¹³³. Das RWI-Kraftwerksmodell bildet die deutsche Stromversorgung und -verteilung mit ihren Kosten und Technologien differenziert nach Energieträger und Erzeugungstechnologie ab. Das RWI-Energiemodell beruht auf einem in 28 Sektoren disaggregierten Input-Output-Modell. Das Kraftwerksmodell ist mit dem Energiemodell gekoppelt, so daß Strukturveränderungen der Wirtschaft im Kraftwerksmodell berücksichtigt werden.

Im Energiemodell des RWI wird zwischen energieintensiver Grundstoffindustrie, weniger energieintensiven Wirtschaftsbereichen, privatem Wärme- und Stromverbrauch, sowie privatem und gewerblichem Kraftstoffverbrauch unterschieden. Für jeden Teilsektor werden Energieverbrauchsgleichungen ermittelt,

¹³⁰ siehe Hettich et al. 1997, S. 203

¹³¹ siehe Hillebrand/Buttermann 1996

¹³² siehe Hillebrand 1991

die als Funktion einer allgemeinen Nachfragekomponente, einer relativen Preiskomponente und einer preisautonomen technologischen Trendkomponente dargestellt werden.

Für die energieintensive Grundstoffindustrie werden starke Verbrauchsrückgänge durch Standortverlagerungen festgestellt. Für die weniger energieintensiven Wirtschaftsbereiche wird ein Verbrauchsrückgang von 8 – 15 % insbesondere durch Abnahme des Wärmebedarfs ermittelt. Für die Privathaushalte wird eine Abnahme des Energieverbrauchs von 16 % gegenüber dem Referenzszenario durch Senkung des spezifischen Energieverbrauchs aber auch durch Änderungen bei der Wohnfläche errechnet.

Für den privaten Verkehr wird ein Verbrauchsrückgang von 7 % angenommen. Dieser ergibt sich weniger durch technologische Innovationen und Senkung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs als vielmehr durch Veränderungen der Verkehrsleistung aufgrund des geringeren verfügbaren Einkommens. Hinsichtlich Beschäftigungseffekte kommt die RWI-Studie auf einen Verlust von 400.000 Beschäftigten im Vergleich zum Referenzszenario.

In der RWI-Studie werden zwar Standortverlagerungen von energieintensiven Betrieben ins Ausland modelliert, die Zuwanderung von Betrieben aus dem Ausland aber pauschal als vernachlässigbar angenommen. Darüber hinaus werden kurze Sanierungszeiträume für Wärmedämmung im Gebäudebestand angenommen

¹³³ vgl. Döhrn et al. 1987

7.1.2 Kritische Größen

Für die Modellierung der ökologischen und ökonomischen Effekte von Klimaschutzmaßnahmen und Energiesteuern sind eine Reihe kritischer Größen von Bedeutung¹³⁴: Substitutionseffekte, Lohnentwicklung und Arbeitsmarkt, internationaler Standortwettbewerb sowie direkte und indirekte Wirkungen.

Substitutionseffekte

Änderungen der Energienachfrage bei Veränderungen der Energiepreise und bei Veränderungen der Preisrelation zu anderen Faktoren (Kapital, Arbeit) sind wesentlich für die Frage der Auswirkungen von Energiesteuern auf die Emissionen. Während auf einem hochaggregierten Niveau die Variation der Substitutionskoeffizienten verhältnismäßig klein ist, können diese auf disaggregiertem Niveau erhebliche Unterschiede aufweisen. Dieses hängt im wesentlichen von der Einschätzung technischer und wirtschaftlicher Potentiale zur Energieeinsparung und -substitution und deren Hemmnisse ab¹³⁵. Während technisch-orientierte Studien tendenziell stärker die noch vorhandenen aber nicht realisierten Potentiale hervorheben, betonen ökonomisch ausgerichtete Studien tendenziell stärker die Fragen der Hemmnisse. Diese Thematik steht auch in engem Zusammenhang mit der in Kapitel 6.2 diskutierten Frage der „No-Regret-Maßnahmen“ und der „Effizienzlücke“.

Lohnentwicklung und Arbeitsmarkt

In diesem Zusammenhang sind zwei Fragen entscheidend:

- Wie werden sich die Tariflöhne entwickeln, wenn Energiesteuern zu einer Erhöhung der Lebenshaltungskosten führen und ein aufkommensneutraler Rückfluß der Steuereinnahmen z.B. über eine Verringerung der Sozialbeiträge beschlossen wird. Wie werden dadurch die Lohnforderungen der Gewerkschaften beeinflusst? Mit höheren oder niedrigeren Lohnforderungen?
- Wie werden sich Veränderungen in den Lohnkosten (geringere Sozialversicherungsbeiträge, Tarifpolitik) auf die Beschäftigung auswirken? In

¹³⁴ vgl. hierzu auch die Ausführung von Böhringer et al. 1998 zu Anforderungen an die Modelle zur adäquaten Abbildung der Zusammenhänge.

welchem Umfang wird es durch die Entlastung der Arbeitskosten zu einer höheren Nachfrage nach Arbeitskräften kommen?

Für die Vorhersage der Beschäftigungseffekte von Energiesteuern und Klimaschutzmaßnahmen haben diese Fragen einen entscheidenden Einfluß auf die Ergebnisse¹³⁶. Die empirische Absicherung einer Modellierung dieser Zusammenhänge steckt noch in den Anfängen.

Internationaler Standortwettbewerb

Ein nationaler Alleingang mit einer Erhöhung der Energiekosten und einer Verringerung der Arbeitskosten hat Auswirkungen auf die Konkurrenzfähigkeit inländischer Standorte. Die Wettbewerbssituation energieintensiver Betriebe würde sich verschlechtern und die Position arbeitsintensiver Betriebe tendenziell verbessern. Dies kann zu einer Standortverlagerung energieintensiver Betriebe ins Ausland und zu einer Zuwanderung arbeitsintensiver Betriebe ins Inland beitragen. Unklar bleibt, welcher Faktor überwiegt und damit die Gesamtbilanz positiv oder negativ ausfällt.

Direkte und indirekte Wirkungen

Es ist zwischen direkten und indirekten Wirkungen zu unterscheiden. Es ist davon auszugehen, daß direkte Wirkungen i.d.R. berücksichtigt werden. So haben z.B. Veränderungen der Energiepreise direkte Wirkungen auf die Energienachfrage.

Bei den indirekten Wirkungen hängt dies davon ab, in welchem Maße Rückkopplungseffekte berücksichtigt sind. Zu den indirekten Wirkungen gehört z.B. auch, daß bei einer Erhöhung des verfügbaren Einkommens auch energieverbrauchende Geräte angeschafft werden und damit letztlich wieder eine Zunahme der Energieverbräuche bewirkt wird. Während in partialanalytischen¹³⁷ Betrachtungen diese Rückwirkungen meist unberücksichtigt bleiben, wäre eine totalanalytische¹³⁸ Herangehensweise mit einer vollständigen Abbildung des Einkommenskreislaufs zu bevorzugen.

¹³⁵ vgl. Jochem 1997

¹³⁶ vgl. hierzu Welsch 1998

¹³⁷ d.h. nur Teile der Volkswirtschaft, z.B. die Energiewirtschaft wird modelliert.

Auch aus technischer Perspektive sind indirekte Wirkungen relevant, z.B. wenn bei CO₂-Minderungsmaßnahmen auch die Emission anderer Luftschadstoffe reduziert wird (siehe hierzu Abschnitt 6.2.3).

7.1.3 Ausblick

Die Modellierung einer Energie-/ bzw. CO₂-Steuer hängt wesentlich von den Annahmen ab, welche Steuerbasis und –höhe sowie welcher Rückfluß der Steuereinnahmen gewählt wird. Dabei können positive oder negative Beschäftigungswirkungen von Energie- bzw. CO₂-Steuern berechnet werden. Damit eine Energiesteuer zu einer „doppelten Dividende“ führt und es neben positiven Auswirkungen auf die Umwelt auch zu positiven Effekten der Beschäftigungssituation kommt, können Energiemodelle Anhaltspunkte zur Ausgestaltung einer entsprechenden Politik geben.

¹³⁸ D.h. die Volkswirtschaft mit dem gesamten Einkommenskreislauf wird modelliert.

7.2 Kraft-Wärme-Kopplung¹³⁹

7.2.1 Der technisch ökonomische Kontext

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Erdgas als Brennstoff gilt als vielversprechende Technologie zur Strom- und Wärmeerzeugung im Rahmen von Klimaschutzkonzepten aufgrund der gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme. Damit kann der Energiegehalt der Brennstoffe besser ausgenutzt werden. Moderne erdgasbetriebene GuD-Kraftwerke ohne Wärmeauskopplung erreichen zwar Wirkungsgrade von bis zu 58 %, die gleichzeitig anfallende Wärme wird allerdings nicht genutzt. Der heutige deutsche Kraftwerkspark wandelt im Durchschnitt ca. 35 % des Energiegehaltes der Brennstoffe in Strom um, der Rest wird als Wärmeverlust in die Umgebung abgegeben. Für eine bestmögliche Ausnutzung der Energiegehalte in fossilen Brennstoffen und zur Erreichung der Klimaschutzziele wird daher der verstärkte Ausbau der erdgasbetriebenen Kraft-Wärme-Kopplung gefordert. Für den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung ist grundsätzlich zwischen Heizkraftwerken mit Fernwärmenetz, industrieller Kraft-Wärme-Kopplung und Blockheizkraftwerken ggf. mit Nahwärmeversorgung zu unterscheiden.

Der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung konkurriert hier mit der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. Als Kriterien für den Einsatz stehen betriebswirtschaftliche Rentabilität, volkswirtschaftliche Kosten und ökologischen Auswirkungen (insbesondere CO₂-Emissionen) des Einsatzes einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage mit anderen Formen der Wärme- und Strombereitstellung im Vordergrund.

Vergleichsuntersuchungen werden z.T. anhand konkreter Projekte mit dezidierten Angaben zum Strom-Wärmebedarf, aber auch auf der Ebene nationaler Studien über die CO₂-Minderungskosten verschiedener Technologien und Maßnahmen durchgeführt. Als Energiemodelle wurden schwerpunktmäßig Simulationsmodelle und dynamische Optimierungsmodelle eingesetzt.

¹³⁹ vgl. auch AGFW 2000, Drillisch et al. 2000, Traube 1998, Traube 1999

Während in den letzten Jahren die Entwicklung und der Einsatz KWK-Anlagen tendenziell zugenommen hat, hat die Liberalisierung des Strommarktes zu einer erheblichen Verschärfung des Wettbewerbs in der Stromerzeugung geführt. Dies hat auch die Wettbewerbsbedingungen für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erheblich verschlechtert. Aufgrund von stärkerer Konkurrenz und Überkapazitäten in der Stromerzeugung werden Großabnehmern nun Strombezugspreise von 5 Pfg/KWh statt zuvor 12 – 15 Pfg/kWh angeboten (Traube 1999). Damit hat sich die betriebswirtschaftliche Rentabilität für KWK-Anlagen erheblich verschlechtert. Inzwischen ist es zu Abschaltungen von KWK-Anlagen aus rein betriebswirtschaftlichen Gründen gekommen.

Da aus klimapolitischen Gesichtspunkten ein Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung auf Erdgasbasis gewünscht ist, werden daher politische Maßnahmen diskutiert, wie die vorhandenen KWK-Anlagen geschützt und der weitere Ausbau forciert werden kann. Als mögliche Maßnahmen standen im Raum:

- Quotenregelung mit Zertifikathandel: Es wird ein Mindestanteil von KWK-Strom an der gesamten Stromerzeugung vorgegeben. Für die Erzeugung von KWK-Strom werden Zertifikate ausgegeben. Unternehmen, die mehr als die erforderliche Quote an KWK-Strom produzieren, können diese am Markt verkaufen, während Unternehmen, die diese Quote unterschreiten, diese am Markt zukaufen müssen.
- Bonusregelung: Hier soll mit Hilfe einer Umlage auf die Strompreise den Erzeugern von KWK-Strom eine zusätzliche Vergütung von z.B. 2 Pfg/kWh gewährt werden (vgl. Fischdick/Hennicke 1999).
- freiwillige Selbstverpflichtung der Stromwirtschaft

Mittlerweile sind die Fördermodalitäten für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zwischen der Bundesregierung und der deutschen Wirtschaft in einer Mischform geregelt worden.

Eine Reihe von Studien wurden im Zusammenhang mit der ökonomischen Bewertung und den ökologischen Auswirkungen von KWK-Anlagen im Vergleich zu Anlagen mit getrennter Strom- und Wärmeerzeugung erstellt. Ein Teil der Studien betrachtete

ein Spektrum von konkreten Anwendungsfällen (Traube/Schulz 2001, Greßmann et al. 1999). Andere bewerteten die Kraft-Wärme-Kopplung auf nationaler Ebene (Markewitz 2000, Markewitz 2001, Ziesing 2000, Müsgens et al. 2000). Während beim ersten Teil der Studien die Vorteilhaftigkeit der KWK für konkrete Anwendungsfälle differenziert wird, steht bei letzteren Fragen der Gesamtpotentiale und der übergreifenden Vergleiche zwischen gekoppelter und getrennter Produktion von Strom und Wärme im Vordergrund.

Die Wirtschaftlichkeit neuer KWK-Anlagen unter Berücksichtigung von Klimaschutzziele wird im Vergleich zu neuen Anlagen der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme zumindest von einigen Autoren positiv bewertet.

Greßmann et al. (1999) stellte keine grundsätzlichen Vor- oder Nachteile der gekoppelten bzw. getrennten Erzeugung von Strom und Wärme hinsichtlich externer Kosten fest. Diese sind fallabhängig. Vielmehr war die Brennstoffwahl ein wesentlich wichtigeres Kriterium. Hier zeigte Erdgas die geringsten externen Kosten.

Traube/Schulz (2001) ermittelten für eine Reihe von Anwendungsfeldern ökologische und ökonomische Vorteile einer gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme auf Erdgasbasis gegenüber einer getrennten Erzeugung. Erhebliche Unterschiede ergaben sich zwischen der betriebswirtschaftlichen und der volkswirtschaftlichen Kalkulation. Während aus volkswirtschaftlicher Sicht alle BHKWs größer 50 kW_{el} vorteilhafter gegenüber der getrennten Erzeugung sind, ergibt sich für die betriebswirtschaftliche Kalkulation, daß die KWK-Anlagen größer als 50 kW_{el} unrentabel sind.

Matthes/Ziesing (2000) untersuchten die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme für sechs Größenklassen zwischen 14 kW und 200 MW. Für alle KWK-Anlagen ergaben sich ökologische Vorteile. Ökonomische Vorteile zeigten sich für Anlagen größer als 300 kW. Gegenüber abgeschriebenen Kraftwerken, die zu Grenzkosten ihren Strom anbieten, ist keine KWK-Anlage wirtschaftlich zu betreiben.

Markewitz (2000) hat verschiedene Maßnahmen zur CO₂-Minderung mit Hilfe des IKARUS-Modells untersucht und hier die CO₂-Minderungskosten durch Ausbau von

KWK-Anlagen mit anderen Maßnahmen verglichen. Es zeigte sich, daß der Ausbau der KWK-Kopplung mit niedrigerer Priorität zu werten ist als Maßnahmen wie Ersatz von Steinkohlekraftwerken durch GuD-Kraftwerke, Wärmedämmung von Altbauten und die Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene.

7.2.2 Ursachen für die unterschiedliche Bewertung der KWK

Beim Vergleich der Studien ergeben sich eine Reihe von Ursachen für die unterschiedliche Bewertung der gekoppelten im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. Als wesentliche ergebnisbestimmende Faktoren wurden identifiziert:

- Brennstoffwahl
- Strom- und Wärmeerlöse
- Erdgaspreise
- Energiebesteuerung
- Zinssatz
- Abschreibungsfristen
- Stromkennzahlen
- Einbezug von Altanlagen
- CO₂-Minderungsziel
- Berücksichtigung externer Kosten

Ob davon ausgegangen wird, daß die derzeitigen niedrigen Stromerlöse für Eigenerzeugung eine vorübergehende Erscheinung sind oder ob sich mittelfristig wieder höhere Preise erzielen lassen, ist von wichtiger Bedeutung für die betriebswirtschaftliche Rentabilität von KWK-Anlagen und damit für die Kosten der CO₂-Minderung durch verstärkten KWK-Einsatz. So ermittelte Traube/Schulz (2001), daß sich derzeit nur kleine, in das Niederspannungsnetz eingebundene BHKWs sich aufgrund einer höheren Stromvergütung rechnen.

Ähnliches gilt für die Erdgaspreise. Hier würden bei höher angesetzten Erdgaspreisen die Stromerzeugung mittels KWK-Anlagen weniger rentabel sein im Vergleich zu Stromerzeugungsanlagen auf Basis anderer Brennstoffe. Wenn hohe Erdgaspreise im

Vergleich zur Kohle angesetzt werden, bewirkt dies eine geringere Konkurrenzfähigkeit erdgasbetriebener KWK-Anlagen gegenüber Kohlekraftwerken. Demgegenüber ist bei niedrigen Erdgaspreisen im Vergleich zur Kohle von einer besseren Konkurrenzfähigkeit erdgasbetriebener KWK-Anlagen auszugehen. In letzterem Fall ist von geringeren Kosten für den Umbau der Elektrizitätswirtschaft in Richtung verminderter Klimagasemissionen und KWK-Ausbau auszugehen.

In Zukunft ist von einer Weiterentwicklung der Technologie bzgl. Stromkennzahlen und Wirkungsgraden auszugehen. Ob und wie stark hier Verbesserungen für die gekoppelte und die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme angenommen werden, kann ebenfalls entscheidenden Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit der einen oder anderen Technologie haben.

Insgesamt wird damit deutlich, daß für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen oft die ökologischen Vorteile gegenüber der getrennten Erzeugung überwiegen, daß aber die Wirtschaftlichkeit gegenüber der getrennten Erzeugung in Zukunft unsicher ist und umstritten ist, mit welcher Priorität der Ausbau der KWK-Anlagen zur Erreichung der Klimaschutzziele verfolgt werden sollte. Wesentliche Unsicherheitsfaktoren sind hier die zukünftige Entwicklung der Energiemärkte und -technologien. Aufgrund der z.T. geringen Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit oder in den ökologischen Auswirkungen kann es zum sogenannten „Penny-Switching“ Effekt¹⁴⁰ kommen und kleine Veränderungen bei den kritischen Annahmen zum Vorteil bzw. Nachteil der entsprechenden Technologie kommen.

¹⁴⁰ „Penny Switching“ steht für kleine Veränderungen in den Annahmen bzw. Inputfaktoren, die einen großen Einfluß auf die Ergebnisse haben können, so daß auf einmal die empfohlenen Aktivitäten komplett von einer zur anderen überwechseln.

7.3 Verkehr¹⁴¹

Der Verkehrsbereich ist derzeit mit 19 % an den deutschen CO₂-Gesamtemissionen beteiligt (BMU 1997). Aufgrund zukünftig steigender Verkehrsleistungen wird erwartet, daß die Bedeutung des Verkehrs noch weiter zunehmen wird.

Während in anderen Bereichen (Stromerzeugung, Brennstoffwahl) von kostenorientierten Entscheidungen ausgegangen wird, stehen im Verkehrsbereich, insbesondere im Personenverkehr, andere Kriterien im Vordergrund: Zeit, Bequemlichkeit, Sicherheit und evtl. Umweltverträglichkeit. Kostenaspekte werden zwar auch berücksichtigt, spielen aber bei der Verkehrsmittelwahl nur eine untergeordnete Rolle. Für eine Modellierung der Verkehrsemissionen ist es daher fraglich, ob diese schwerpunktmäßig auf Wirtschaftlichkeitskriterien beruhen sollte.

7.3.1 Der Verkehrsbereich in den einzelnen Modelltypen

Der Verkehrsbereich wird in den einzelnen Modelltypen sehr unterschiedlich abgebildet:

In Energiesystemmodellen wird der Verkehrsbereich in Personen- und Güterverkehr aufgeteilt und mit spezifischen Charakteristika für die Verkehrsarten (Öffentlicher Verkehr, Pkw usw.) abgebildet. Z.T. werden diese weiter nach Pkw-Größe, Alter usw. differenziert. Ausgehend von Expertenschätzungen bzgl. der Entwicklung der spezifischen Emissionen, der Gesamtverkehrsnachfrage und des Modal-Splitt werden somit die zukünftigen CO₂-Emissionen des Verkehrsbereichs abgeschätzt. Das im folgenden Kapitel 7.3.2 erläuterte TREMOD-Modell ist ein reines Verkehrsmodell, das auf dem Simulationsansatz beruht. Es geht von der Methodik her ähnlich wie Simulationsmodelle vor, bildet die einzelnen Technologien und Maßnahmen aber wesentlich detaillierter ab.

¹⁴¹ vgl. auch Enquete-Kommission 1994, Brosthaus 1995

In Input-Output-Modellen taucht der Verkehr als Teil einzelner Wirtschaftszweige der Aufkommens- und Verwendungstabelle der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) auf. Zu den Wirtschaftszweigen bzw. Gütergruppen mit explizitem Bezug zum Verkehr gehören:

- Handelsleistung mit Kfz, Reparatur an Kfz, Tankleistungen (Nr. 35)
- Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen (Nr. 39)
- Schifffahrtsleistungen (Nr. 40)
- Luftfahrtleistungen (Nr. 41)

Hier werden allerdings nur Leistungen für Unternehmen aufgeführt. Die Endnachfrage der privaten Haushalte, z.B. der Benzinverbrauch für Privat-Pkw, ist in der Endnachfrage enthalten. Eine Differenzierung nach Brennstoffen erfolgt hier über die Energieträgerrechnung.

Für Allgemeine Gleichgewichtsmodelle taucht der Verkehrsbereich in einigen Modellen (z.B. NEWAGE) in den Wirtschaftszweigen bzw. Gütergruppen der Input-Output-Tabelle, ggf. in aggregierter Form auf. Auf der Ebene der Elastizitäten taucht der Verkehrsbereich i.d.R. nicht differenziert für die einzelnen Wirtschaftszweige bzw. Gütergruppen in Form separat geschätzter Elastizitäten auf. Der Verkehrsbereich wird nicht explizit modelliert sondern implizit im Modell als Teil der Endnachfrage bzw. in aggregierter Form im repräsentativen Produzenten und Konsumenten enthalten. Daher können meist auch keine separaten Aussagen für den Verkehr gemacht werden. In einzelnen Modellen, z.B. MIS, wird der Verkehrsbereich differenziert betrachtet. MIS enthält ein separates Transportmodul.

Ausgehend von diesen modellhaften Abbildungen der Realität können für die einzelnen Modelltypen folgende Schlußfolgerungen gezogen werden: Mit Hilfe von Energiesystemmodellen, die eine akzeptable Differenzierung der Verkehrssysteme beinhalten, ist es daher grundsätzlich möglich, Aussagen über die Rolle einzelner Verkehrsträger und die Wirkung spezifischer Maßnahmen im Verkehrsbereich zu treffen.

Vorteile der Anwendung von Energiesystemmodellen hinsichtlich Fragestellungen aus dem Verkehrsbereich ergeben sich durch die Kopplung mit anderen

Energiebereichen. Nachteile sich die meist exogene Vorgabe der Gesamtverkehrsnachfrage¹⁴².

Mit Input-Output-Modellen, die bis auf die Ebene der 59 Wirtschaftszweige disaggregiert sind, ist zumindest eine Differenzierung hinsichtlich der Hauptverkehrsgruppen möglich. Auch ist bei einigen Modellen die Nachfrageseite endogenisiert. Wesentlicher Nachteil ist die nur sehr begrenzte Differenzierung, die abgesicherte Aussagen über Teilbereiche des Verkehrs schwer möglich macht.

Im folgenden wird beispielhaft als reines Verkehrsmodell, das TREMOD-Modell des IFEU-Instituts vorgestellt. Dieses bildet die Verkehrssysteme und –technologien mit ihren Charakteristika wesentlich differenzierter ab, als dies meist in Energiesystemmodellen umgesetzt ist. Als Nachteil von Verkehrsmodellen ist zu berücksichtigen, daß Wechselwirkungen mit Entwicklungen außerhalb des Verkehrssektors nicht endogenisiert sind, sondern in Form von Szenarien exogen vorgegeben werden, z.B. die Einkommensentwicklung und die daraus resultierenden Veränderungen bei der Verkehrsnachfrage.

7.3.2 Das TREMOD-Modell

Das TREMOD-Modell (Transport Emission Estimation Model) wurde vom IFEU-Institut in Heidelberg im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt¹⁴³. Es dient der Abschätzung zukünftiger Entwicklungen der Schadstoffemissionen des Verkehrs und der Bewertung von Minderungsmaßnahmen. Das deutsche Verkehrssystem mit Personen- und Güterverkehr sowie sonstigem Kfz-Verkehr wird sehr detailliert mit Fahr- und Verkehrsleistungen, Auslastungsgraden, technischen Eigenschaften der Bestände, spezifischen Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren abgebildet. Als Schadstoffe werden neben den Treibhausgasen Kohlendioxid und N₂O auch andere Luftschadstoffe berücksichtigt: Stickstoffoxide, Kohlenwasserstoffe, Benzol, Kohlenmonoxid, Partikel und Schwefeldioxid. Zukünftige Entwicklungen können in Jahresschritten bis zum Jahre 2010 projiziert werden. Das

¹⁴² Dieser Nachteil trifft auch für reine Verkehrsmodelle zu.

¹⁴³ Knörr et al. 2000, Knörr/Höpfner 1998, Ungenannt 2001a

TREMODO-Modell berücksichtigt neben dem Straßenverkehr auch den Schienenverkehr, die Binnenschifffahrt und den Flugverkehr. Es werden sowohl die direkten Emissionen als auch die indirekten Emissionen aus der vorgelagerten Verarbeitung und Umwandlung einbezogen.

Die Datenbasis des TREMOD-Modells geht u. a. von Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes, des Verbandes der Automobilindustrie (VDA), der Deutschen Bahn AG, des TÜV Rheinland, der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen und des Statistischen Bundesamtes aus.

TREMODO bietet den Vorteil, daß neben den direkten verkehrsbedingten CO₂-Emissionen auch vorgelagerte Ketten, z.B. die Bahnstromerzeugung, Mineralölverarbeitung differenziert betrachtet und berücksichtigt werden¹⁴⁴. Knörr et al. (2000) ermittelte für die direkten und indirekten Emissionen des Verkehrs für 1995 ca. 220 Mio. t CO₂, wohingegen in BMU (1997) und Stein/Strobel (1999) von ca. 170 Mio. t CO₂ berichtet werden. Die Differenz ist mit den unterschiedlichen Systemgrenzen (z.B. in der Abgrenzung nach dem Standortprinzip statt reiner inländischer Flugverkehr) und methodischen Ansätzen hinsichtlich der Berücksichtigung der indirekten Emissionen zu begründen. Ziesing et al. (1999) projizierte für 2020 direkte CO₂-Emissionen des Verkehrs von 183 Mio. t CO₂ im Basisszenario (Zunahme um 10 % gegenüber 1990). Knörr et al. (2000) demgegenüber berechneten eine Zunahme auf 270 Mio. t CO₂ (Zunahme um ca. 23 % gegenüber 1995).

Mit TREMOD kann daher ein breites Spektrum an Fragen zur zukünftigen Entwicklung der Schadstoffemissionen des Verkehrs und zur Effektivität von politischen Maßnahmen beantwortet werden. Beispiele sind (siehe Knörr/Höpfner 1998):

- Bedeutung von Kurzstreckenfahrten für die Schadstoffemissionen
- Entwicklung der CO₂-Emissionen bezogen auf einzelne Verkehrsmittel
- Auswirkungen neuer Grenzwerte auf die Schadstoffemissionen

¹⁴⁴ Von Nachteil ist allerdings, daß die indirekten Wirkungen von umweltpolitischen Maßnahmen auf den Verkehrsbereich, die nicht nur rein verkehrspolitisch wirken, mit Hilfe von Verkehrsmodellen im

- Maßnahmenvergleich zur Senkung der Benzolemissionen

Die Erstellung bzw. Aktualisierung von TREMOD (Knörr et al. 2000) erfolgte für die Verkehrsarten in enger Abstimmung mit folgenden Institutionen:

- Straßenverkehr: Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
- Schienenverkehr: Deutsche Bahn AG
- Flugverkehr: UBA Forschungsvorhaben 105 060 85 „Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs“

Das TREMOD-Modell gehört damit zur Gruppe der technisch-orientierten Systemmodelle. Es bildet den Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr in sehr detaillierter Form – differenzierter als in Energiesystemmodellen – mit Charakteristika zum Alter, Emissionsverhalten, Nutzungsdauer und zur Fahrleistung ab. Die Vorgehensweise orientiert sich an der Vorgehensweise der Simulationsmodelle, indem aufbauend auf aktuellen Prognosen z.B. vom ifo-Institut oder vom DIW Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Verkehrs erarbeitet werden. Eine Kopplung der Verkehrsnachfrage mit Veränderungen des Bruttosozialproduktes und der Bevölkerungsentwicklung erfolgt nicht, bzw. wird nur in Form von Szenarien eingefügt. Energiepreise werden zwar im Modell nicht explizit berücksichtigt, die Abhängigkeit der Entwicklung des Straßenverkehrs von der Entwicklung des Kraftstoffpreises ist allerdings implizit in den Szenarien enthalten (vgl. Dreher et al. 1999).

8 SYSTEMATISCHER VERGLEICH DER MODELLTYPEN

In vorherigen Kapiteln werden Modelltypen und Einzelmodelle ausführlich beschrieben und der Aufbau, kritische Faktoren und die Anwendung diskutiert. In diesem Abschnitt folgt nun die Zusammenführung all dieser Aspekte zu einer umfassenden Übersicht zur Charakterisierung der vier Modelltypen. Ziel ist es, systematische Unterschiede und Ähnlichkeiten aufzuzeigen.

Im ersten Teil (Kapitel 8.1) werden diese in Tabellenform vorgestellt. Es folgt eine weitergehende Erläuterung anhand der jeweiligen Charakteristika. Für die einzelnen Modelltypen werden diese im Anschluß zusammengefaßt.

8.1 *Übersicht des Modellvergleichs*

Es gilt allerdings zu betonen, daß eigentlich innerhalb der Modelltypen weiter zu differenzieren wäre, weil zwischen diesen nicht zu vernachlässigende Unterschiede bestehen. Aufgrund der Vielzahl der Modelle ist dies im Rahmen dieses Vorhabens nicht praktikabel. Die angegebenen Charakteristika der Modelltypen sind daher im Rahmen des Vorhabens als Richtschnur zu betrachten und gelten nicht unbedingt für alle Einzelmodelle des jeweiligen Modelltyps.

Folgende Tabelle 8.1 zeigt die wesentlichen Merkmale der vier Typen von Energiemodellen.

Im zweiten Teil dieses Kapitels (8.2) folgt ein umfangreicher Vergleich der vier Typen von Energiemodellen. Ziel ist es, Unterschiede und Ähnlichkeiten, sowie Stärken und Schwächen aufzuzeigen.

Tabelle 8.1 Zusammenfassender Vergleich der Energiemodelltypen¹⁴⁵

	Allgemeine Gleichgewichtsmodelle	Input-Output Modelle	Optimierungsmodelle	Simulationsmodelle
Zeithorizont	mittel- bis langfristig	kurz- bis mittelfristig	kurz- bis langfristig	kurz- bis langfristig
Betrachtungsschwerpunkt	Mikroökonomie	Makroökonomie	technische Energiesysteme mit Kostenstruktur	technische Systeme mit konkreten Rahmenbedingungen und Hemmnissen
Kalibrierung	meist ein Bezugsjahr	meist viele Jahre	ein Bezugsjahr	ein Bezugsjahr
kritische Faktoren	Nesting-Struktur, Elastizitäten	Qualität der historischen Zeitreihe, Dynamisierung	Nebenbedingungen (Bounds)	Qualität der technischen und ökonomischen Analyse
Detaillierungsgrad des Energiesystems	gering	gering	hoch	teilweise hoch
Systemgrenze	Gesamtwirtschaft	Gesamtwirtschaft	Energiesystem	Energiesystem
Flexibilität bzgl. gesamtwirtschaftlicher Fragestellungen	hoch	hoch	begrenzt	niedrig
Flexibilität bzgl. sektoraler Fragestellungen¹⁴⁶	niedrig	hoch	mittel	mittel
Verflechtungen und Rückkopplung mit der Gesamtwirtschaft	berücksichtigt	berücksichtigt	nicht implizit, nur über Kopplung	nicht berücksichtigt

¹⁴⁵ Die hier angegebenen Charakteristika der Modelltypen stellen grundsätzlich modelltypische Charakteristika da. Einzelne Modelle können in ihren Charakteristika allerdings erheblich davon abweichen.

¹⁴⁶ Dies ist zu unterscheiden von der Flexibilität bzgl. sektoraler Anpassung. Diese ist für Input-Output-Modelle gering.

Tabelle 8.1 (fortgesetzt)

	Allgemeine Gleichgewichtsmodelle	Input-Output Modelle	Optimierungsmodelle	Simulationsmodelle
klassische Fragestellungen	gesamtwirtschaftliche Auswirkungen umweltökonomischer Instrumente	sektorale Auswirkungen umweltökonomischer Instrumente	Kosteneffektivitätsanalysen	Identifizierung prioritärer technischer Maßnahmenbündel
Preis-Mengen-Relationen	implizit	Implizit	berücksichtigt	nur z.T., nicht implizit berücksichtigt
Rationalität und Marktgleichgewichte	im Grundsatz angenommen	nicht relevant	impliziert für zukünftige Entscheidungen	unabhängig
Entwicklung des Referenzszenarios	endogen	abhängig vom Endogenisierungsgrad, meist im wesentlichen endogen	plausible Expertenannahmen	mit wesentlichen exogenen Vorgaben
Technologie und Technologieentwicklung	i.d.R. als eine oder wenige Technologien zusammengefaßt	aggregiert auf Ebene der Verflechtungsstrukturen	als Einzeltechnologien und explizite Schätzung der jeweiligen zukünftigen Entwicklung	als Einzeltechnologien und explizite Schätzung der jeweiligen zukünftigen Entwicklung
Modellgenerator			meist ja	meist nein
Stärken	geschlossenes Theoriegebäude	breite empirische Fundierung, sektorale Disaggregation der Industriesektoren	anwendbar für technische Gesamtsysteme und technologische Detailfragen, flexible Einsatzmöglichkeit	auch ohne Zielgröße für Optimierung einsetzbar, anwendbar für technische Gesamtsysteme und technologische Detailfragen
Schwächen	geringe empirische Basis, oft geringer sektoraler Differenzierungsgrad	statischer Theoriehintergrund, beruht allein auf historischen Analysen, aufwendige Modellerstellung und -pflege	impliziert rationale Optimierungsentscheidungen, starker Einfluß von Bounds	ökonomische Einflüsse unterrepräsentiert, basiert wesentlich auf der Qualität des Expertenwissens

Tabelle 8.1 (fortgesetzt)

	Allgemeine Gleichgewichtsmodelle	Input-Output Modelle	Optimierungsmodelle	Simulationsmodelle
Theoretische Fundierung	Neoklassik	historische Analysen der volkswirtschaftlichen Verflechtungsmatrix	Optimierung hinsichtlich technisch-ökonomischer Kriterien	primär technologische Determinierung des Energiesystems
Umsetzung der Modellierung	Entscheidungen entsprechend Nesting und Elastizitäten	ökonometrische Schätzung der Zusammenhänge der Verflechtungsmatrix	Technologiedatenbank mit Optimierungsalgorithmus	Technologiedatenbank, Expertenwissen
Flexibilität bzgl. technischer Detailfragen	gering	gering	hoch, abhängig vom Detaillierungsgrad der Technologiedatenbank	hoch bei begrenzter Komplexität
Flexibilität bzgl. des Bezugsraums	mittel	grundsätzlich möglich, für existierende Modelle gering	hoch	möglich
Dynamisierung	modellimmanent	in unterschiedlichem Maße implementiert	explizit über Einzeltechnologien	explizit über Einzeltechnologien
Angebots-/Erzeugungsmodellierung	Produktionsfunktion mit Nesting und Elastizitäten	über Modellierung der Verflechtungsstruktur	endogen	Szenarien
Nachfrage-/Verbrauchsmodellierung	Nachfrageelastizitäten	endogen, z.T. auch exogen	z.T. exogen über Szenarien, z.T. gekoppelt mit Wirtschaftsentwicklung	anhand von Szenarien, ausgehend vom Wirtschaftswachstum

8.2 Ausführliche Beschreibung des Modellvergleichs

Die Darstellung in Tabelle 8.1 kann nur vereinfacht die realen Sachverhalte skizzieren. Eine ausführlichere Darstellung wichtiger Einzelpunkte folgt in diesem Abschnitt.

- **Theoretische Fundierung und Betrachtungsschwerpunkte**

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle gehen vom neoklassisch geprägten rationalen Verhalten des repräsentativen Produzenten und Konsumenten aus, der versucht, seinen Gewinn bzw. Nutzen zu maximieren. Der Fokus liegt damit bei den mikroökonomischen Entscheidungsprozessen.

Input-Output-Modelle basieren auf historischen Analysen der volkswirtschaftlichen Verflechtungsmatrix und haben damit einen makroökonomischen Betrachtungsschwerpunkt mit sektoraler Disaggregation.

Optimierungsmodelle gehen von einer im wesentlichen von Technologiewahl determinierten Energiesystem aus, das in Richtung von Zielgrößen optimiert wird.

Simulationsmodelle gehen ebenfalls von einem technisch determinierten Energiesystem aus. Die Technologiewahl erfolgt allerdings explizit, ohne daß eine Optimierungsroutine implementiert oder Zielgröße erforderlich ist. Bei Simulationsmodellen wie auch den Optimierungsmodellen ist eine Technologiedatenbank mit ausführlicher Beschreibung der jeweiligen Charakteristika von zentraler Bedeutung.

- **Zeithorizont und Kalibrierung**

In Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen werden Parameter meist anhand eines Bezugsjahres geschätzt. Aufgrund der starken theoretischen und der geringeren empirischen Fundierung liegt der Schwerpunkt der Betrachtungen eher im mittelfristigen bis langfristigen Bereich.

Input-Output-Modelle basieren auf umfangreichen Zeitreihen, die i.d.R. über eine Dekade und länger reichen. Der mögliche Prognosezeitraum liegt in der

Größenordnung der historischen Zeitreihe und bildet damit den Schwerpunkt bei kurz- bis mittelfristigen Betrachtungen.

Optimierungsmodelle und Simulationsmodelle gehen von einem Bezugsjahr aus. Während für den kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont die Einzeltechnologien explizit modelliert werden, werden langfristige Entwicklungen über pauschalisierte Veränderungsraten angesetzt.

- **Flexibilität**

Die Flexibilität des Einsatzes der Modelltypen hängt wesentlich vom Zusammenhang ab. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle bieten im Allgemeinen eine hohe Flexibilität bzgl. verschiedener gesamtwirtschaftlicher Fragestellungen. Input-Output-Modelle zeigen Einsatzflexibilität bei sektoralen Fragen, sind aber für existierende Modelle wenig flexibel hinsichtlich des räumlichen Bezugsraumes. Optimierungsmodelle und Simulationsmodelle sind grundsätzlich flexibel hinsichtlich technologischer Detailfragen. Optimierungsmodelle bedürfen einer oder mehrerer Zielgrößen, während Simulationsmodelle auch für preisunelastische Bereiche flexibel (aber auch mit einer unvermeidlichen Willkür) einsetzbar sind.

- **Modellierung des Energiesystems und der Energietechnologien**

Energieökonomische Modelle bilden das Energiesystem hochaggregiert ab. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle haben in der Grundform repräsentative Produktionsfunktionen, die dann häufig für Sektoren weiter differenziert werden. Input-Output-Modelle beschreiben das Energiesystem auf der Ebene von Wirtschaftssektoren, ohne auf Einzeltechnologien herunterzubrechen.

Optimierungsmodelle und Simulationsmodelle bilden das Energiesysteme detailliert bis auf die Ebene von Einzeltechnologien ab. Diese sind damit auch für die Bearbeitung von sehr spezifischen Fragen zur Anwendung und Umsetzung von Technologien geeignet.

- **Kritische Faktoren**

Ergebnisbestimmende Faktoren von Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen sind im wesentlichen die Nesting-Struktur (d.h. die Abfolge der Entscheidungsprozesse hinsichtlich der Inputfaktoren Arbeit, Kapital, Materialien, verschiedene Brennstoffe) und die Elastizitäten. Die empirische Basis der Elastizitäten ist eher begrenzt. Die Elastizitäten werden in der Grundform für Schlüsselsektoren als repräsentativ angenommen.

Die Belastbarkeit der Ergebnisse von Input-Output-Modellen wird wesentlich von der Qualität der historischen Zeitreihen und ihrer Dynamisierung bestimmt. Aufgrund von Brüchen in der statischen Datenbasis erfordert die Ableitung eines konsistenten Datensatzes umfangreiche Vorbereitungsarbeiten. Aufgrund des sich beschleunigenden strukturellen Wandels sind statische Betrachtungen immer weniger adäquat.

Optimierungsmodelle sind im wesentlichen bestimmt durch eine detailgetreue Abbildung der Energietechnologien und ihrer Charakteristika sowie der Nebenbedingungen. Restriktionen und Randbedingungen sowohl technischer, ökonomischer als auch politischer Art können erheblichen Einfluß auf das Ergebnis haben. Nur eine sehr detaillierte und präzise Abbildung der einzelnen Charakteristika und Zusammenhänge kann diese Effekte begrenzen aber nicht ausschließen.

Für Simulationsmodelle sind zum einen die zugrundeliegenden Technologiedatenbanken und zum anderen die einfließenden Expertenschätzungen ergebnisbestimmend. Marktanteile von technischen Systemen werden vorgegeben. Über Szenarien wird der Einfluß der Schätzung der zukünftigen Entwicklung transparenter gemacht.

- **Klassische Fragestellungen**

Fragen von umweltökonomischen Maßnahmen und ihre Auswirkungen mit gesamtwirtschaftlicher und nicht spezifisch sektoraler Wirkungsweise sind typische Fragestellungen von Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen. Eine differenziertere Betrachtungsweise bedarf der Anpassung der Modelle.

Input-Output-Modelle beschäftigen sich klassisch mit sektoralen und gesamtwirtschaftlichen Ansätzen und Wirkungen von umweltökonomischen Maßnahmen und mit Fragestellungen des Strukturwandels.

Optimierungsmodelle haben in den Bereichen Technikbewertung und kostenoptimale Lösungen Anwendungsschwerpunkte. Mit zunehmender Einbindung weiterer wirtschaftlicher Aspekte reicht die Anwendung bis hin zur Bewertung der Umsetzung komplexerer umweltpolitischer Maßnahmen.

Simulationsmodelle zielen primär auf die Technikwahl und die Identifizierung von Maßnahmenbündeln ab.

- **Der gesamtwirtschaftliche Zusammenhang und Marktbedingungen**

Der wirtschaftliche Kontext der Energiewirtschaft steht im Zentrum der energieökonomischen Modelle. Der Energiesektor wird als ein Teil unter anderen der Gesamtwirtschaft betrachtet. In den Energiesystemmodellen steht der Energiesektor im Zentrum und die Verbindung zu anderen Bereichen wird als exogene Größe berücksichtigt, ohne die anderen Bereiche im Modell abzubilden.

Ideale Marktbedingungen mit rationalem Verhalten der Akteure, Konkurrenzgleichgewichte, Profit- und Nutzenmaximierung sowie vollständiger Information sind die Grundannahmen der Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle, die für bestimmte Teilaspekte jeweiliger Problemstellungen realitätsnäher angepaßt wird.

Für Input-Output-Modelle ist die Frage der Marktgleichgewichte und der Rationalität nicht relevant.

Rationales Verhalten und vollständige Information wird von Optimierungsmodellen zwar nicht für das existierende Energiesystem, aber für zukünftige Entscheidungen impliziert.

Ergebnisse von Simulationsmodellen setzen nicht notwendigerweise rationales Verhalten und kostenoptimale Lösungen voraus.

- **Preis-Mengen-Relationen**

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle setzen den Schwerpunkt bei preislichen Beziehungen und berücksichtigen physische Mengen nur am Rande. Auswirkungen von Preisveränderungen auf physische Mengen sind implizit einbezogen. Komplexe Input-Output-Modelle bilden sowohl Geld- als auch physische Einheiten weitgehend ab. Preisliche Effekte werden über die historische Analyse berücksichtigt.

Bei Energiesystemmodellen stehen physische bzw. energetische Einheiten im Zentrum. Mengenveränderungen als Reaktion auf preisliche Veränderungen werden in Optimierungsmodellen automatisch berücksichtigt, z.B. bei der Brennstoffwahl. In Simulationsmodellen werden diese über Schätzungen und Szenarien einbezogen.

9 ANWENDUNG VON ENERGIEMODELLEN: ZUORDNUNG VON FRAGESTELLUNGEN UND AUSBLICK

Neben der systematischen Beschreibung der Energiemodelle und der Grundtypen ist ein weiteres Ziel dieses Forschungsvorhabens die Zuordnung von Fragestellungen zu Energiemodellen bzw. Grundtypen. Hierfür wurde in Kapitel 2 eine Übersicht von Fragestellungen erarbeitet und ein Strukturierungsansatz relevanter Aspekte entwickelt. Im folgenden wird dieser Strukturierungsansatz für beispielhafte Fragestellungen und die Energiemodelltypen angewendet.

Die verschiedenen Energiemodelltypen (evtl. auch die Einzelmodelle innerhalb eines Modelltyps) setzen unterschiedliche Schwerpunkte und sind deshalb nicht für alle Fragestellungen gleichermaßen geeignet. In einigen Fällen ist es nur eine Frage der Anpassung bzw. des Ausbaus der Energiemodelle, um auf neue spezifische Fragestellungen einzugehen.

Energiemodelle befinden sich in einem kontinuierlichen Weiterentwicklungsprozeß. Sie werden fortlaufend in vielen Aspekten verfeinert und ausgebaut. Es wäre daher fragwürdig, hier den Ansatz „Welches Modell kann welche Fragestellungen beantworten?“ zu verfolgen. Selten kann mit einem eindeutigen „ja“ oder „nein“ geantwortet werden.

Im Anschluß werden eine Reihe von Kriterien für die Zuordnung von Fragestellungen in Form einer Kriterienliste zusammengestellt. In Anlehnung an die Vorgehensweise bei Ökobilanzen wird anschließend diskutiert, ob Normungsprozesse auch für Energiemodelle sinnvoll sein könnten.

9.1 Verwendung des Strukturierungsansatzes

Als alternativer Ansatz wurde hier mit dem in Kapitel 2 vorgestellten Strukturierungsansatz weitergearbeitet. Für beispielhafte Fragestellungen werden relevante Dimensionen und Aspekte markiert (siehe Tabelle 9.1 bis 9.5). Ähnliches wurde für die vier Energiemodelltypen durchgeführt (siehe Tabelle 9.6 – 9.9). Anhand

der Größe der Überschneidungen kann dann die Nähe zwischen Fragestellungen und Modell ermittelt werden.

Aufgrund der Vielzahl möglicher Fragestellungen kann dies allerdings nur anhand von Beispielen durchgeführt werden. Diese stammen sowohl aus dem technischen als auch aus dem ökonomischen Kontext. Die folgenden fünf Fragestellungen wurden beispielhaft ausgewählt:

- Frage 1: Ist die Kraft-Wärme-Kopplung als prioritäre Technologie für die kosteneffiziente Erreichung von Emissionsminderungszielen einzusetzen? (Tabelle 9.1)
- Frage 2: Welche wirtschaftlichen Auswirkungen hat die Umsetzung des Klimaschutzprogramms der Bundesregierung? (Tabelle 9.2)
- Frage 3: Welche Potentiale bieten sich durch Joint Implementation Projekte zwischen Rußland und Deutschland? (Tabelle 9.3)
- Frage 4: Welche regenerativen Energien sind vor dem Hintergrund von Klimaschutzzielen prioritär zu fördern? (Tabelle 9.4)
- Frage 5: Welche Mittelrückflußvarianten sind bei der Ökosteuer hinsichtlich beschäftigungs-, sozial- und umweltpolitischer Ziele zu favorisieren? (Tabelle 9.5)

Aus der Anwendung dieses Strukturierungsansatzes für die Modelltypen sind folgende Schlußfolgerungen zu ziehen (vgl. Tabelle 9.6 – 9.9)¹⁴⁷:

- Von allen Modelltypen werden die Kategorien „Quellen anderer Klimagase“ und „Klimafolgen“ meist stiefmütterlich behandelt, weil diese im Zusammenhang mit Energiemodellen bisher wenig politisch thematisiert wurden. Einzelne Energiemodelle berücksichtigen inzwischen andere Klimagase. Der Bereich Klimafolgen bleibt eine Domäne der „Integrated Assessment Modelle“.

¹⁴⁷ Diese sind z.T. selbstverständlich bzw. allseits bekannt, werden aber hier der Vollständigkeit halber trotzdem genannt.

- Zwischen energieökonomischen Modellen und Energiesystemmodellen sind erhebliche Unterschiede feststellbar. Schwerpunkte der Energiesystemmodelle bilden die Beschreibung der CO₂ Quellen, während die sozio-ökonomischen Effekte wenig Beachtung finden. Umgekehrt setzen energieökonomische Modelle Schwerpunkte im Bereich der sozio-ökonomischen Effekte und ökonomische Maßnahmen, sind aber auf Seiten der CO₂ Quellen und Senken grob vereinfachend.
- Allgemeine Gleichgewichtsmodelle und Input-Output-Modelle unterscheiden sich in der Abdeckung der Aspekte wenig voneinander. Input-Output-Modelle sind oft stärker sektoral disaggregiert.
- Zwischen Optimierungsmodellen und Simulationsmodellen sind auf diesem Weg keine grundsätzlichen Unterschiede feststellbar.
- Beim Bezugsraum sind energieökonomische Modelle auf die nationale bis globale Ebene ausgerichtet, während Energiesystemmodelle zusätzlich auch kleinräumige Strukturen abdecken können.

Tab. 9.1 Relevante Aspekte innerhalb des Strukturierungsansatzes bezogen auf Frage 1 (Kraft-Wärme-Kopplung)

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	<u>national</u>	multinational	global					
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	Zukunft								
Zeithorizont	<u>kurzfristig</u>	<u>mittelfristig</u>	<u>langfristig</u>								
Wissenschaftsdisziplin	<u>Technik</u>	<u>Ökonomie</u>	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	<u>Reserven</u>	<u>Rohstoffgewinnung</u>	<u>Transport</u>	<u>Umwandlung</u>	<u>Verbrauch</u>						
Energiesystemstruktur	zentral	<u>dezentral</u>	Insel								
Energieträger und -quellen	<u>Öl</u>	<u>Gas</u>	<u>Steinkohle</u>	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	<u>Biomasse</u>	Wind	Solarthermie	Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	<u>Tagesgang</u>	<u>Wochengänge</u>	<u>Jahresgänge</u>	Jahresmittel							
Energieverbraucher	<u>Energieversorgung</u>	<u>Verkehr</u>	<u>Industrie</u>	<u>Gebäude</u>	<u>Land- und Forstwirtschaft</u>	<u>Bergbau</u>	<u>Kleingewerbe/Handel</u>				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
CH ₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	<u>Energieerzeugung</u>								
N ₂ O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	<u>Energieerzeugung</u>							
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NOx	Kohlenwasserstoffe							
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	<u>Investitionen</u>	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	<u>Versorgungssicherheit</u>	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	<u>Intergenerationsfragen</u>					
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	<u>Vorsorgeprinzip</u>	<u>No-Regret-Politik</u>	Anpassung (Adaptation)	<u>Laissez Faire</u>							
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbrauch	<u>Umwandlungstechnologien</u>	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal							
Instrumente	<u>Ordnungsrecht</u>	<u>Steuern/Abgaben</u>	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtungen	<u>Subventionen</u>	<u>Festpreisgarantien</u>	<u>Quoten</u>	<u>Forschung und Entwicklung</u>			
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquoten						

Tab. 9.2 Relevante Aspekte innerhalb des Strukturierungsansatzes bezogen auf Frage 2 (Klimaschutzprogramm)

Übergreifende Dimensionen										
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	national	multinational	global				
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	Zukunft							
Zeithorizont	kurzfristig	mittelfristig	langfristig							
Wissenschaftsdisziplin	Technik	Ökonomie	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht
CO₂ Quellen und Senken										
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	Umwandlung	Verbrauch					
Energiesystemstruktur	zentral	dezentral	Insel							
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	Biomasse	Wind	Solarthermie
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	Jahresmittel						
Energieverbraucher	Energieversorgung	Verkehr	Industrie	Gebäude	Land- und Forstwirtschaft	Bergbau	Kleingewerbe/Handel			
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere						
Quellen anderer Klimagase										
CH ₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung							
N ₂ O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung						
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie							
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen						
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe						
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen								
physische Effekte										
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung							
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung				
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion								
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion							
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung							
sozio-ökonomische Effekte										
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	Investitionen	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung					
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen				
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel							
Maßnahmen										
klimapolitische Grundstrategie	Vorsorgeprinzip	No-Regret-Politik	Anpassung (Adaptation)	Laissez Faire						
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbra	Umwandlungstechnologien	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal						
Instrumente	Ordnungsrecht	Steuern/Abgaben	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtung	Subventionen	Festpreisgarantien	Quoten	Forschung und Entwicklung		
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquote					

Tab. 9.3 Relevante Aspekte innerhalb des Strukturierungsansatzes bezogen auf Frage 3 (Joint Implementation)

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	<u>national</u>	<u>multinational</u>	global					
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	<u>Zukunft</u>								
Zeithorizont	<u>kurzfristig</u>	<u>mittelfristig</u>	langfristig								
Wissenschaftsdisziplin	<u>Technik</u>	<u>Ökonomie</u>	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	<u>Reserven</u>	<u>Rohstoffgewinnung</u>	<u>Transport</u>	<u>Umwandlung</u>	<u>Verbrauch</u>						
Energiesystemstruktur	<u>zentral</u>	dezentral	Insel								
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	<u>Biomasse</u>	Wind	Solarthermie	Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	<u>Jahresmittel</u>							
Energieverbraucher	<u>Energieversorgung</u>	<u>Verkehr</u>	<u>Industrie</u>	<u>Gebäude</u>	<u>Land- und Forstwirtschaft</u>	<u>Bergbau</u>	<u>Kleingewerbe/Handel</u>				
Senken	<u>Biomasse</u>	<u>Böden</u>	<u>Wälder</u>	<u>Meere</u>							
Quellen anderer Klimagase											
<u>CH₄</u>	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
<u>N₂O</u>	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
<u>fluorierte Gase</u>	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
<u>Aerosole</u>	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
<u>troposphärisches Ozon</u>	Methan	CO	NOx	Kohlenwasserstoffe							
<u>stratosphärisches Ozon</u>	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	<u>Investitionen</u>	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	<u>Gerechtigkeit</u>	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen					
Internationales	Entwicklungshilfe	<u>internationale Lastenverteilung</u>	<u>internationaler Handel</u>								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	<u>Vorsorgeprinzip</u>	<u>No-Regret-Politik</u>	Anpassung (Adaptation)	Laissez Faire							
technologische Optionen	<u>Effizienzsteigerung Endverbra</u>	<u>Umwandlungstechnologien</u>	<u>erneuerbare Energien</u>	<u>CO₂ storage / removal</u>							
Instrumente	Ordnungsrecht	Steuern/Abgaben	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtungen	Subventionen	Festpreisgarantien	<u>Quoten</u>	<u>Forschung und Entwicklung</u>			
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	<u>Joint Implementation</u>	CDM	Verifikation	Emissionsquote						

Tab. 9.4 Relevante Aspekte innerhalb des Strukturierungsansatzes bezogen auf Frage 4 (regenerative Energien)

Übergreifende Dimensionen										
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	national	multinational	global				
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	Zukunft							
Zeithorizont	kurzfristig	mittelfristig	langfristig							
Wissenschaftsdisziplin	Technik	Ökonomie	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht
CO₂ Quellen und Senken										
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	Umwandlung	Verbrauch					
Energiesystemstruktur	zentral	dezentral	Insel							
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	Biomasse	Wind	Solarthermie Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	Jahresmittel						
Energieverbraucher	Energieversorgung	Verkehr	Industrie	Gebäude	Land- und Forstwirtschaft	Bergbau	Kleingewerbe/Handel			
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere						
Quellen anderer Klimagase										
CH₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung							
N₂O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung						
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie							
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen						
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe						
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen								
physische Effekte										
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung							
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung				
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion								
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion							
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung							
sozio-ökonomische Effekte										
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	Investitionen	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung					
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen				
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel							
Maßnahmen										
klimapolitische Grundstrategie	Vorsorgeprinzip	No-Regret-Politik	Anpassung (Adaptation)	Laissez Faire						
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbrauch	Umwandlungstechnologien	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal						
Instrumente	Ordnungsrecht	Steuern/Abgaben	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtungen	Subventionen	Festpreisgarantien	Quoten	Forschung und Entwicklung		
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquote					

Tab. 9.5 Relevante Aspekte innerhalb des Strukturierungsansatzes bezogen auf Frage 5 (Mittelrückfluß Ökosteuer)

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	<u>regional</u>	<u>national</u>	multinational	global					
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	<u>Zukunft</u>								
Zeithorizont	<u>kurzfristig</u>	<u>mittelfristig</u>	langfristig								
Wissenschaftsdisziplin	Technik	<u>Ökonomie</u>	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	<u>Umwandlung</u>	<u>Verbrauch</u>						
Energiesystemstruktur	zentral	dezentral	Insel								
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	Biomasse	Wind	Solarthermie	Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	<u>Jahresmittel</u>							
Energieverbraucher	Energieversorgung	Verkehr	Industrie	Gebäude	Land- und Forstwirtschaft	Bergbau	Kleingewerbe/Handel				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
CH₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
N₂O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NOx	Kohlenwasserstoffe							
statosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	<u>Bruttoinlandsprodukt</u>	<u>Investitionen</u>	<u>Außenhandelsbilanz</u>	<u>Staatsquote</u>	<u>Beschäftigung</u>						
Gesellschaft	<u>Einkommensverteilung</u>	Versorgungssicherheit	<u>Gerechtigkeit</u>	Armut	<u>Arbeitslosigkeit</u>	<u>Intergenerationsfragen</u>					
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	<u>Vorsorgeprinzip</u>	<u>No-Regret-Politik</u>	Anpassung (Adaptation)	Laissez Faire							
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbrauch	Umwandlungstechnologien	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal							
Instrumente	Ordnungsrecht	<u>Steuern/Abgaben</u>	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtungen	Subventionen	Festpreisgarantien	Quoten	Forschung und Entwicklung			
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquote						

Tab. 9.6 Überschneidungen der Allgemeinen Gleichgewichtsmodelle mit Aspekten innerhalb des Strukturierungsansatzes

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	national	multinational	global					
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	Zukunft								
Zeithorizont	kurzfristig	mittelfristig	langfristig								
Wissenschaftsdisziplin	Technik	Ökonomie	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO ₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	Umwandlung	Verbrauch						
Energiesystemstruktur	zentral	dezentral	Insel								
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	Biomasse	Wind	Solarthermie	Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	Jahresmittel							
Energieverbraucher	Energieversorgung	Verkehr	Industrie	Gebäude	Land- und Forstwirtschaft	Bergbau	Kleingewerbe/Handel				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
CH ₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
N ₂ O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe							
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	Investitionen	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen					
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	Vorsorgeprinzip	No-Regret-Politik	Anpassung (Adaptation)	Laissez Faire							
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbrauch	Umwandlungstechnologien	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal							
Instrumente	Ordnungsrecht	Steuern/Abgaben	Zertifikate	freiwillige Selbstverpflichtung	Subventionen	Festpreisgarantien	Quoten	Forschung und Entwicklung			
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquote						

Tab. 9.7 Überschneidungen der Input-Output-Modelle mit Aspekten innerhalb des Strukturierungsansatzes

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	lokal	regional	<u>national</u>	<u>multinational</u>	<u>global</u>					
Zeitperspektive	<u>Vergangenheit</u>	<u>Gegenwart</u>	<u>Zukunft</u>								
Zeithorizont	<u>kurzfristig</u>	<u>mittelfristig</u>	langfristig								
Wissenschaftsdisziplin	Technik	<u>Ökonomie</u>	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO ₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	<u>Umwandlung</u>	<u>Verbrauch</u>						
Energiesystemstruktur	zentral	dezentral	Insel								
Energieträger und -quellen	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Strom	Wasser	Biomasse	Wind	Solarthermie	Photovoltaik
Differenzierung Ganglinien	Tagesgang	Wochengänge	Jahresgänge	<u>Jahresmittel</u>							
Energieverbraucher	<u>Energieversorgung</u>	<u>Verkehr</u>	<u>Industrie</u>	<u>Gebäude</u>	<u>Land- und Forstwirtschaft</u>	<u>Bergbau</u>	<u>Kleingewerbe/Handel</u>				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
CH ₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
N ₂ O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe							
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	<u>Bruttoinlandsprodukt</u>	<u>Investitionen</u>	<u>Außenhandelsbilanz</u>	<u>Staatsquote</u>	<u>Beschäftigung</u>						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen					
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	<u>Vorsorgeprinzip</u>	No-Regret-Politik	Anpassung (Adaptation)	<u>Laissez Faire</u>							
technologische Optionen	Effizienzsteigerung Endverbrauch	Umwandlungstechnologien	erneuerbare Energien	CO ₂ storage / removal							
Instrumente	Ordnungsrecht	<u>Steuern/Abgaben</u>	<u>Zertifikate</u>	freiwillige Selbstverpflichtungen	<u>Subventionen</u>	Festpreisgarantien	<u>Quoten</u>	Forschung und Entwicklung			
internationale Maßnahmen	Emissionshandel	Joint Implementation	CDM	Verifikation	Emissionsquote						

Tab. 9.8 Überschneidungen der Optimierungsmodelle mit Aspekten innerhalb des Strukturierungsansatzes

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	<u>lokal</u>	<u>regional</u>	<u>national</u>	<u>multinational</u>	<u>global</u>					
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	<u>Zukunft</u>								
Zeithorizont	<u>kurzfristig</u>	<u>mittelfristig</u>	<u>langfristig</u>								
Wissenschaftsdisziplin	<u>Technik</u>	<u>Ökonomie</u>	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO ₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	<u>Umwandlung</u>	<u>Verbrauch</u>						
Energiesystemstruktur	<u>zentral</u>	<u>dezentral</u>	Insel								
Energieträger und -quellen	<u>Öl</u>	<u>Gas</u>	<u>Steinkohle</u>	<u>Braunkohle</u>	<u>Kernenergie</u>	<u>Strom</u>	<u>Wasser</u>	<u>Biomasse</u>	<u>Wind</u>	<u>Solarthermie</u>	<u>Photovoltaik</u>
Differenzierung Ganglinien	<u>Tagesgang</u>	<u>Wochengänge</u>	<u>Jahresgänge</u>	Jahresmittel							
Energieverbraucher	<u>Energieversorgung</u>	<u>Verkehr</u>	<u>Industrie</u>	<u>Gebäude</u>	<u>Land- und Forstwirtschaft</u>	<u>Bergbau</u>	<u>Kleingewerbe/Handel</u>				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
<u>CH₄</u>	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
<u>N₂O</u>	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
<u>fluorierte Gase</u>	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
<u>Aerosole</u>	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
<u>troposphärisches Ozon</u>	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe							
<u>stratosphärisches Ozon</u>	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	<u>Investitionen</u>	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	<u>Versorgungssicherheit</u>	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	<u>Intergenerationsfragen</u>					
Internationales	Entwicklungshilfe	<u>internationale Lastenverteilung</u>	<u>internationaler Handel</u>								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	<u>Vorsorgeprinzip</u>	<u>No-Regret-Politik</u>	<u>Anpassung (Adaptation)</u>	<u>Laissez Faire</u>							
technologische Optionen	<u>Effizienzsteigerung Endverbra</u>	<u>Umwandlungstechnologien</u>	<u>erneuerbare Energien</u>	<u>CO₂ storage / removal</u>							
Instrumente	<u>Ordnungsrecht</u>	<u>Steuern/Abgaben</u>	<u>Zertifikate</u>	<u>freiwillige Selbstverpflichtung</u>	<u>Subventionen</u>	<u>Festpreisgarantien</u>	<u>Quoten</u>	<u>Forschung und Entwicklung</u>			
internationale Maßnahmen	<u>Emissionshandel</u>	<u>Joint Implementation</u>	<u>CDM</u>	Verifikation	Emissionsquote						

Tab. 9.9 Überschneidungen der Simulationsmodelle mit Aspekten innerhalb des Strukturierungsansatzes

Übergreifende Dimensionen											
räumliche Ausdehnung	Individuum	<u>lokal</u>	<u>regional</u>	<u>national</u>	<u>multinational</u>	<u>global</u>					
Zeitperspektive	Vergangenheit	Gegenwart	<u>Zukunft</u>								
Zeithorizont	<u>kurzfristig</u>	<u>mittelfristig</u>	<u>langfristig</u>								
Wissenschaftsdisziplin	<u>Technik</u>	Ökonomie	Mathematik	Chemie	Physik	Biologie	Soziologie	Philosophie	Psychologie	Recht	
CO ₂ Quellen und Senken											
Komponenten Energiebilanz	Reserven	Rohstoffgewinnung	Transport	<u>Umwandlung</u>	<u>Verbrauch</u>						
Energiesystemstruktur	<u>zentral</u>	<u>dezentral</u>	<u>Insel</u>								
Energieträger und -quellen	<u>Öl</u>	<u>Gas</u>	<u>Steinkohle</u>	<u>Braunkohle</u>	<u>Kernenergie</u>	<u>Strom</u>	<u>Wasser</u>	<u>Biomasse</u>	<u>Wind</u>	<u>Solarthermie</u>	<u>Photovoltaik</u>
Differenzierung Ganglinien	<u>Tagesgang</u>	<u>Wochengänge</u>	<u>Jahresgänge</u>	Jahresmittel							
Energieverbraucher	<u>Energieversorgung</u>	<u>Verkehr</u>	<u>Industrie</u>	<u>Gebäude</u>	<u>Land- und Forstwirtschaft</u>	<u>Bergbau</u>	<u>Kleingewerbe/Handel</u>				
Senken	Biomasse	Böden	Wälder	Meere							
Quellen anderer Klimagase											
CH ₄	Landwirtschaft	Abfallwirtschaft	Energieerzeugung								
N ₂ O	Landwirtschaft	Industrie	Straßenverkehr	Energieerzeugung							
fluorierte Gase	Kälte- und Klimatechnik	Isolierschäume	Leichtindustrie								
Aerosole	Energieerzeugung	Industrie	Meere	biologische Quellen							
troposphärisches Ozon	Methan	CO	NO _x	Kohlenwasserstoffe							
stratosphärisches Ozon	FCKW	andere halogenierte Verbindungen									
physische Effekte											
Klima	Temperatur	Niederschläge	Wolkenbildung								
Wasser	Meeresströme	Meeresspiegel	Hochwasserereignisse	Fischerei	Küstenschutz	Eisbedeckung					
Boden	Wüstenbildung	Bodenerosion									
biologische Ressourcen	Waldbedeckung	Biodiversität	Biomasseproduktion								
Menschen	Krankheiten	Trinkwasserversorgung	Lebensmittelversorgung								
sozio-ökonomische Effekte											
Volkswirtschaft	Bruttoinlandsprodukt	Investitionen	Außenhandelsbilanz	Staatsquote	Beschäftigung						
Gesellschaft	Einkommensverteilung	Versorgungssicherheit	Gerechtigkeit	Armut	Arbeitslosigkeit	Intergenerationsfragen					
Internationales	Entwicklungshilfe	internationale Lastenverteilung	internationaler Handel								
Maßnahmen											
klimapolitische Grundstrategie	<u>Vorsorgeprinzip</u>	<u>No-Regret-Politik</u>	Anpassung (Adaptation)	<u>Laissez Faire</u>							
technologische Optionen	<u>Effizienzsteigerung Endverbra</u>	<u>Umwandlungstechnologien</u>	<u>erneuerbare Energien</u>	<u>CO₂ storage / removal</u>							
Instrumente	<u>Ordnungsrecht</u>	Steuern/Abgaben	Zertifikate	<u>freiwillige Selbstverpflichtung</u>	Subventionen	<u>Festpreisgarantien</u>	<u>Quoten</u>	Forschung und Entwicklung			
internationale Maßnahmen	<u>Emissionshandel</u>	<u>Joint Implementation</u>	<u>CDM</u>	Verifikation	Emissionsquote						

Beim Vergleich der Relevanz der verschiedenen Aspekte für die Fragestellungen und deren Vergleich mit den Modelltypen ist folgendes festzustellen:

Alle Fragen haben sowohl technische als auch ökonomische Komponenten mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Von den 5 beispielhaften Fragen ziehen die Fragen zur Kraft-Wärme-Kopplung (Nr.1), zu Joint Implementation (Nr. 3) und zu den regenerativen Energien (Nr. 4) eher auf technische Aspekte, die übrigen eher auf ökonomische Sachverhalte.

Für Frage 1 (Kraft-Wärme-Kopplung) zeigt sich, daß sowohl Teilaspekte des Energiesystems, der Energieträger und –technologien aber auch auf der Maßnahmenebene relevant sind. Es ergeben sich die meisten Überlappungen mit Energiesystemmodellen.

Für Frage 2 (Klimaschutzprogramm) betrifft im wesentlichen alle Bereiche des Energiesystems mit verschiedenen Energieträgern und Verbrauchssektoren sowie ein Spektrum von Maßnahmen. Hier sind größere Überschneidungen mit beiden Grundtypen von energieökonomischen Modellen.

Für Frage 3 (Joint Implementation) sind neben den CO₂-Quellen auch Senken von Bedeutung sowie einige Technologien. Hier sind Überlappungen mit allen Modelltypen feststellbar, weil sowohl technologische Details als auch ökonomische Rahmenbedingungen relevant sind.

Für Frage 4 (Prioritäten regenerative Energien) tauchen auch in der Frage genannten Bereiche des Teils der Energiequellen und bestimmte Instrumente auf. Beim Vergleich der Überschneidungen zeigt sich eine weitgehende Abdeckung mit Energiesystemmodellen, ohne hier zwischen Simulations- und Optimierungsmodell eine Präferenz erkennen zu lassen.

Für Frage 5 (Mittlerückfluß) sind schwerpunktmäßig Aspekte von Volkswirtschaft und Gesellschaft relevant. Dieses wird weitgehend von energieökonomischen Modellen abgedeckt.

Wesentliche Unterschiede in den Fragen ergeben sich auch, ob eher nach der Umsetzung von Zielen oder nach Auswirkungen von Maßnahmen gefragt wird.

Insgesamt bietet dieser Strukturierungsansatz gute Möglichkeiten die Schwerpunkte von Modelltypen und Einzelmodellen zu identifizieren und Unterschiede zu ermitteln. Innerhalb der energieökonomischen Modelle und der Energiesystemmodelle ist eine Unterscheidung auf der Ebene von Modelltypen nur schwierig möglich. Hier ist bevorzugt auf der Ebene von Einzelmodellen anzusetzen.

Für die Zuordnung von Fragestellungen zu Modelltypen ist dieser Ansatz insgesamt hilfreich. So können mit dem Strukturierungsansatz Stärken und Schwächen aufgezeigt werden und damit für Fragen von Modellweiterentwicklungen einbezogen werden.

Grundsätzlich sind für die einzelnen Modelltypen folgende Anwendungsschwerpunkte zu erkennen: Allgemeine Gleichgewichtsmodelle sind auf gesamtwirtschaftliche Fragestellungen ausgerichtet. Input-Output-Modelle werden insbesondere für Anwendungen mit starker sektoraler Komponente eingesetzt. Optimierungsmodelle bieten Vorteile für komplexe, weitgehend über den Preis determinierte Entscheidungen, insbesondere für die Bereiche Elektrizitätserzeugung und Industrie. Simulationsmodelle sind insbesondere für Entscheidungen mit begrenzter Komplexität in preisunelastischen Sektoren anwendbar, d.h. insbesondere Haushalte und Verkehr. Anzumerken bleibt für diese Ausrichtungen allerdings, daß Einzelmodelle stark von dieser Charakterisierung abweichen können.

9.2 Kriterienliste

Um Energiemodelle für bestimmte Fragestellungen anzuwenden und nach Abschluß die Anwendung von Modellen für bestimmte Fragestellungen zu bewerten, kann der Strukturierungsansatz manche Hilfestellungen leisten, grundsätzlich sollten aber eine Reihe von Kriterien zugrundegelegt werden. Im folgenden werden die Kriterien zusammengefaßt, die an verschiedenen Stellen in diesem Bericht auftauchen:

- Modelltyp
- Grundannahmen, z.B. Wirtschaftswachstum, Energiepreise, Technologie- und Kostenentwicklung
- Struktur und Verflechtungszusammenhänge
- Transparenz und Dokumentation des Modells und des Modelldurchlaufs
- Zeitliche und räumliche Kompatibilität
- Exogene Faktoren
- Abbildung der Außenbeziehungen
- Detailgetreue Abbildung z.B. wesentlicher Technologien
- Berücksichtigung der Rückkopplungseffekte
- Sensitivitätsanalysen
- Vergleich mit anderen Modellergebnissen
- Reviewprozesse durch Stakeholder und Fachkollegen

9.3 *Ansatz: Normung?*

In anderen Kontexten (z.B. Ökobilanzen) haben Diskussionen über adäquate Annahmen und Vorgehensweisen letztlich dazu geführt, daß Ökobilanzen einem Normungsprozeß unterzogen wurden. Hier werden z.B. methodische Vorgaben gemacht, Systemgrenzen definiert und ein Begutachtungsprozeß vorgeschrieben.

Ähnliches wäre auch für Energiemodelle grundsätzlich vorstellbar. Allerdings sind die methodischen Zusammenhänge wesentlich komplexer als für Ökobilanzen und aufgrund der Verschachtelung von technischen und ökonomischen Aspekten nicht leicht zu vereinheitlichen. Auch nicht unberechtigterweise wird von Normungsprozessen gesagt, daß Normung Innovationsprozeß bisweilen eher hemmen als fördern, da sie nur langsam auf neue Entwicklungen reagieren und bis dahin neue Ansätze als nicht normkonform gelten.

Grundsätzlich ist daher eine gewisse Skepsis gegenüber einer Normierung von Energiemodellen nicht völlig unangebracht. Eine Vorgabe von gewissen methodischen und strukturellen Rahmenbedingungen sowie die Festlegung von Anforderungen an die Transparenz von Modellergebnissen könnte sich dagegen als durchaus sinnvoll erweisen.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUßFOLGERUNGEN

Eine Reihe verschiedener Kriterien für die Systematisierung von Energiemodellen hat sich etabliert. Sie beziehen sich meist auf die zugrundeliegende Wissenschaftsdisziplin, auf die Art der Auswahl von plausiblen Lösungen, auf die Schlußfolgerung vom Detail zum Allgemeinen oder umgekehrt, auf die Schwerpunktsetzung bei der Angebotsseite oder Nachfrageseite. Aus diesen vielfältigen Ansätzen zur Systematisierung haben sich Energiewirtschaftsmodelle mit Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen und Input-Output-Modellen sowie Energiesystemmodellen mit Optimierungsmodellen und Simulationsmodellen als übliche Modelltypen herauskristallisiert. Die Übergänge zwischen diesen Modelltypen sind fließend. Innerhalb dieser Modelltypen können Einzelmodelle große Unterschiede aufweisen. Die Hauptmerkmale dieser Modelltypen sind im folgenden zusammengefaßt.

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle gehen von einer neoklassisch fundierten Theoriebasis der Marktgleichgewichte aus und bilden Entscheidungsprozesse von Produzenten und Konsumenten mikroökonomisch ab. Die Art der Strukturierung der Produktionsfunktion und die angesetzten Elastizitäten sind wesentliche ergebnisbestimmende Größen. Ihre empirische Fundierung ist oft begrenzt und es ist fraglich, ob sowohl elastische als auch unelastische Bereiche realitätsnah wiedergegeben werden. Ein ebenfalls kritischer Bereich ist der Grundansatz der Erzielung von Marktgleichgewichten, von den für marktunvollkommene Bereiche in zunehmendem Maße abgewichen werden kann. Vorteile von Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen bieten sich durch den geschlossenen Theorieansatz und die weitgehende Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten. Schwerpunkte der Anwendung sind gesamtwirtschaftliche Fragestellungen mit nationalem, multinationalem und globalem Bezugsraum.

Für **Input-Output-Modelle** (auch empirisch fundierte, makroökonomische Modelle genannt) basieren auf Zeitreihen der volkswirtschaftlichen Verflechtungsmatrix mit Input-Output-Tabelle, Energiebilanz und Arbeitsmarktstatistiken. Die

Zusammenhänge werden hinsichtlich sektoraler Entwicklung, Energieträgerverbräuche und Emissionsentwicklung beschrieben. In klassischen - auf Leontief zurückgehende - Input-Output-Modellen wird von statischen Beziehungen ausgegangen, die heute nur für kurzfristige Betrachtungen vertretbar erscheinen. Durch die zunehmende Berücksichtigung dynamischer Beziehungen gehen auch zeitabhängige Prozesse verstärkt ein. Kritische Faktoren sind die Konsistenz der zugrundeliegenden Zeitreihen und die Dynamisierung. Innerhalb der Wirtschaftsverflechtungen wurden Strukturbrüche durch die deutsche Einheit und die Umstellung auf eine einheitliche europäische Statistik über begrenzte Rückrechnungen und Anpassungen abgemildert. Eine umfassende Dynamisierung ist Voraussetzung für die Gültigkeit der Verflechtungsbeziehungen über den kurzfristigen Zeithorizont hinaus. Vorteile bieten die dynamischen Input-Output-Modelle durch ihre starke empirische Fundierung über die ökonometrische Schätzung und die Unabhängigkeit vom Ansatz der Marktgleichgewichte und Marktvollkommenheiten. Schwerpunkte der Anwendung von Input-Output-Modellen bilden gesamtwirtschaftliche und sektorale Fragestellungen.

Optimierungsmodelle basieren auf Technologiedatenbanken mit hohem Detaillierungsgrad hinsichtlich anwendungsorientierter und kostenseitiger Informationen. Projektionen der zukünftigen Entwicklung werden meist mit Hilfe eines Modellgenerators über Optimierungsalgorithmen, häufig unter Anwendung der linearen Programmierung, implementiert. Über Zielgrößen und Restriktionen werden zukünftige Entwicklungen generiert. Es erfolgt eine Kopplung von Mengen und Preisen, der Zusammenhang zur Gesamtwirtschaft bleibt exogen. Probleme bereitet der sogenannte „Bang-Bang-Effekt“, bei dem für bestimmte Anwendungsfelder nur noch eine optimale Technologie für den Zubau ausgewählt wird. Nur durch eine detaillierte Wiedergabe von Ganglinien und von technologischen Anforderungsprofilen kann eine vielseitige technologische Implementierung erzielt werden. Optimierungsmodelle mit Modellgeneratoren bieten den Vorteil der vielseitigen Einsetzbarkeit. Anwendungsschwerpunkte bilden technisch-ökonomische Fragestellungen mit einem breiten Spektrum möglicher Bezugsräume.

Simulationsmodelle basieren auf Beschreibungen von derzeitigen und zukünftigen Energietechnologien mit detaillierten Informationen zu Einsatzbereichen und Kosten.

Anhand von Szenarien werden verschiedene Entwicklungspfade mit ihren kostenseitigen und emissionsseitigen Auswirkungen entwickelt. Simulationsmodelle bilden allein den Energiebereich ab und lassen den gesamtwirtschaftlichen Zusammenhang außen vor. Eine direkte Kopplung zwischen Mengen und Preisen erfolgt nicht. Die Qualität der Expertenschätzungen wird letztlich zum entscheidenden Faktor für die Qualität der Simulation. Anwendungsschwerpunkte von Simulationsmodellen bilden damit Fragestellungen von technologisch-orientierten Maßnahmen, bei denen ein hohes Detailwissen erforderlich ist und gesamtwirtschaftliche Zusammenhänge und Preiseffekte im Hintergrund stehen.

In der Modellentwicklung sind grundsätzlich zwei Trends festzustellen: Eine feinere technologische und sektorale Detailauflösung auf der einen Seite und eine zunehmende Integration bislang externer Rahmenbedingungen auf der anderen Seite. Letzterer Ansatz zielt im Extrem in die Richtung von „Integrated Assessment Modellen“, die auch die Wirkungsseite mit einbeziehen und darüber eine Rückkopplung zu den erforderlichen Maßnahmen erzielen. Aufgrund der zunehmenden Komplexität von Fragen zur Umsetzung und zu Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen geht der Trend in Richtung Kopplung von Energiesystem- und Energiewirtschaftsmodellen sowie in Richtung Hybrid-Modelle, die Komponenten mehrerer Modelltypen enthalten. Ziel ist es, gleichzeitig gesicherte Aussagen über die Umsetzung im Detail wie auch über die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen zu machen.

Neben der Wahl des Modelltyps wurde in dieser Studie ausführlich auf den bedeutsamen Einfluß von Rahmen- und Randbedingungen sowie Annahmen und Restriktionen eingegangen. Für Modelle mit geringem Endogenisierungsgrad ist dieser Einfluß selbstverständlich wesentlich stärker als für solche mit hohem Endogenisierungsgrad. Zu den wichtigsten Faktoren gehören:

- Wirtschaftswachstum
- Energiepreise
- Technologieentwicklung

Umfassende Sensitivitätsanalysen, Transparenz bzgl. kritischer Faktoren und klare Aussagen über die Unsicherheit der Ergebnisse sollten deshalb zu einer seriösen Darstellung von Modellergebnissen gehören.

Es wurde ein Strukturierungsansatz entwickelt, mit dem die thematische Abdeckung von Fragestellungen zum Klimaschutz und von Energiemodellen untersucht werden kann. Der Strukturierungsansatz erlaubt, die Schwerpunktsetzung von Modellen festzustellen, die Überlappung von Fragestellungen mit Modelltypen zu ermitteln sowie Stärken und Schwächen von Modellen zu identifizieren.

Es obliegt umgekehrt dem Auftraggeber oder Nutzer von Modellrechnungen, sich angemessen auch mit diesen Hintergrundinformationen zu befassen und der Versuchung zu widerstehen, in der Hitze kontroverser öffentlicher Diskussionen „Modellergebnisse unter Annahmen“ als Gewißheiten darzustellen.

Die Implementierung weiterer Zusammenhänge und die Berücksichtigung noch komplexerer Strukturen in Energiemodellen ist grundsätzlich wünschenswert und anzustreben. Oft ist es aber weniger ein Problem der Umsetzung in den Modellen, sondern vielmehr die Qualität der empirischen Absicherung, zu einer praxistauglichen Abbildung wesentlicher Zusammenhänge zu gelangen. Für eine Erhöhung der Verlässlichkeit von Modellen ist daher in einigen Bereichen verstärkt empirische Forschung notwendig. Beispiele sind Aspekte des Arbeitsmarktes sowie die Lohn- und Technologieentwicklung.

Letztlich sollte nie vergessen werden, daß Energiemodelle nur eine vereinfachte Abbildung der Realität sind und auch nur sein können. Sie können damit ausschließlich heute plausible Entwicklungen in die Zukunft fortsetzen. Weder die wirtschaftliche Entwicklung, Technologiesprünge noch Brüche im Konsumentenverhalten sind letztlich vorhersagbar. Recht trefflich und ohne Verlust an Aktualität gilt auch heute und gerade für Energiemodelle: „Vorhersagen sind schwierig – vor allem wenn es dabei um die Zukunft geht“.

11 DANKSAGUNG

Dieses Vorhaben wäre nicht ohne die Unterstützung folgender Personen möglich geworden.

Für die Bereitschaft Auskunft über ihre Energiemodelle zu geben und die Kommentierung früherer Versionen von Teilen dieses Berichtes sei insbesondere Dr. Ulrich Fahl (IER, Universität Stuttgart), Prof. Bernd Meyer und Dr. Christian Lutz (GWS Osnabrück), Tim Hoffmann und Andreas Löschel (ZEW Mannheim), Dr. Wolf Fichtner (IIP, Universität Karlsruhe), Prof. Heinz Welsch und Prof. Wolfgang Pfaffenberger (beide Universität Oldenburg), Dr. Peter Markewitz (FZ Jülich) und Wolfram Knörr (ifeu Heidelberg) gedankt.

Herzlicher Dank gilt auch Dr. Martin Patel (Universität Utrecht), der insbesondere bei der Systematisierung der Energiemodelltypen wichtige Beiträge leistete.

Für ihre Diskussionsbereitschaft sei folgenden Mitarbeitern des Joint Program on the Science and Policy of Global Change des Massachusetts Institute of Technology (MIT) herzlich gedankt: Dr. John M. Reilly, Dr. Denny Ellman, Dr. Ian Sue Wing, Dr. Mort Webster sowie Dr. Andreas Schäfer.

Von Seiten des Umweltbundesamtes gebührt großer Dank insbesondere Bernd Strobel, Dr. Jürgen Landgrebe und Dr. Wolf-Dieter Glatzel (zur Zeit Berater der SPD Fraktion im Bundestag) für zahlreiche Ideen und Anregungen, die sie in das Projekt eingebracht haben.

12 LITERATURVERZEICHNIS

AGFW 2000:

Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. (AGFW) bei dem Verband der Elektrizitätswirtschaft (VDEW): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. Zeithorizont 2020, AGFW 2000.

Ausubel 1995:

Jesse H. Ausubel: Technical progress and climatic change. In: Energy Policy 23 (1995), S. 411-416.

Azar und Dowlatabadi 1999:

Christian Azar, Hadi Dowlatabadi: A Review of Technical Change in Assessment of Climate Policy. In: Annual Review of Energy and the Environment 24 (1999), S. 513-544.

Bach et al. 1994:

Stefan Bach, Michael Kohlhaas, Volker Meinhardt, Barbara Praetorius, Hans Wessels, Rudolf Zwiener: Ökologische Steuerreform auch im nationalen Alleingang! Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Wochenbericht 24/94, Berlin 1994, S. 395-404.

Bach et al. 1995a:

Stefan Bach, Michael Kohlhaas, Barbara Praetorius: Möglichkeiten einer ökologischen Steuerreform. WSI Mitteilungen, 4/1995, S. 244-254.

Bach et al. 1995b:

Stefan Bach, Michael Kohlhaas, Volker Meinhardt, Barbara Praetorius, Hans Wessels, Rudolf Zwiener: Wirtschaftliche Auswirkungen einer ökologischen

Steuerreform. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Sonderhefte Nr. 153, Duncker & Humblot, Berlin 1995.

Bach et al. 2001a:

Stefan Bach, Michael Kohlhaas, Barbara Praetorius: Wirkungen der ökologischen Steuerreform in Deutschland. DIW-Wochenbericht 14 (2001).

<http://www.diw.de/deutsch/publikationen/wochenberichte/docs/01-14-2.html>

Bach et al. 2001b:

Stefan Bach, Michael Kohlhaas, Bernd Meyer, Barbara Praetorius, Heinz Welsch: Modellgestützte Analyse der ökologischen Steuerreform mit LEAN, PANTA RHEI und dem Potsdamer Mikrosimulationsmodell. DIW Diskussionspapier No. 248, Berlin 2001.

Beutel und Stahmer 1982:

Jörg Beutel, Carsten Stahmer: Input-Output-Analyse der Energieströme. Allgemeines statistisches Archiv 3 (1982), S. 209-239.

Beutel und Mürdter 1984:

Jörg Beutel, Heinz Mürdter: Die Erfassung der quantitativen Energieströme in einer Volkswirtschaft. In: Horst Siebert (Hrsg.): Quantitative Ansätze zur Modellierung des Energiesektors. J.C.B. Mohr Verlag, Tübingen 1984.

Bhattacharyya 1996:

Subhes C. Bhattacharyya: Applied general equilibrium models for energy studies – a survey. Energy Economics 18 (1996), S. 145-164.

Blok et al. 1999:

Kornelis Blok, Harald Bradke, Ann Haworth, Jasper Vis: Economic engineering studies for Western Europe. In: IEA Workshop on Technologies to Reduce Greenhouse Gas Emissions: Engineering-Economic Analyses of Conserved Energy and Carbon. Washington DC 1999. <http://www.iea.org/workshop/engecon/blok.pdf>,

BMU 1997:

The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety: Climate Protection in Germany – Second Report of the Government of the Federal Republic of Germany Pursuant to the United Nations Framework Convention on the Climate Change. BMU, Bonn 1997.

Böhringer 1996:

Christoph Böhringer: Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der energie- und umweltpolitischen Analyse – Theoretische Grundlagen und empirische Anwendung. Peter Lang, Frankfurt am Main 1996.

Böhringer 1997:

Christoph Böhringer: NEWAGE – Modellinstrumentarium zur gesamtwirtschaftlichen Analyse von Energie- und Umweltpolitiken. In: Molt/Fahl 1997, S. 99-121.

Böhringer 1998:

Christoph Böhringer: The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. Energy Economics 20 (1998), S. 233-248.

Böhringer 1999a:

Christoph Böhringer: NEWAGE. In: Forum 1999, S. 191-213.

Böhringer 1999b:

Christoph Böhringer: Die Kosten von Klimaschutz – Eine Interpretationshilfe für die mit quantitativen Wirtschaftsmodellen ermittelten Kostenschätzungen. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, 22 (1999), S. 369-382.

Böhringer 2000:

Christoph Böhringer: Cooling down hot air - a global CGE analysis of post-Kyoto carbon abatement strategies. Energy Policy, 28 (2000), S. 779-789.

Böhringer et al. 1997a:

Christoph Böhringer, Andreas Pahlke, Frank Vöhringer, Uli Fahl, Alfred Voß:

Ökosteuerstudien im Vergleich – eine wissenschaftliche Zwischenbilanz.

Diskussionsbeitrag des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle

Energieanwendung der Universität Stuttgart, Stuttgart 1997.

Böhringer et al. 1997b:

C. Böhringer, T. F. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß: Volkswirtschaftliche

Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer

Berücksichtigung von Umweltsteuern. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle

Energieanwendung der Universität Stuttgart, Band 37, Stuttgart 1997.

Böhringer et al. 1998:

Christoph Böhringer, Andreas Pahlke, Frank Vöhringer, Ulrich Fahl, Alfred Voß:

Ökosteuerstudien – ein Vergleich. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 48 (1998), S. 167-172.

Böhringer und Welsch 1997:

Chr. Böhringer, H. Welsch: Mehr Arbeitsplätze durch eine ökologische Steuerreform?

In: VDI Berichte 1311: Industriestandort Deutschland – Arbeitsplätze und Energie,

Düsseldorf 1997, S. 39-51.

Brosthaus et al. 1995:

Josef Brosthaus, Ralf Kober, Wolf-Rüdiger Müller, Heinrich Waldeyer:

Klimagasrelevante Energie- und Kostenstrukturen im Straßen-, Schienen-, Schiffs-

und Luftverkehr. Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Technologieforschung,

Band 20, Jülich 1995.

Bruce et al. 1996:

James P. Bruce, Hoesung Lee, Erik F. Haites: Climate Change 1995 – Economic and

Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the

Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Cambridge University Press, Cambridge, New York und Melbourne 1996.

Burniaux et al. 1992:

Jean-Marc Burniaux, John P. Martin, Giuseppe Nicoletti, Joaquim Oliveira Martins: GREEN - a multi-sector, multi-region dynamic general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Working papers 116, Paris 1992.

Capros 1997:

P. Capros: The PRIMES Energy Model. In: Molt/Fahr 1997, S. 61-70.

Carraro und Hourcade 1998:

Carlo Carraro, Jean Charles Hourcade: Climate modelling and policy strategies – The role of technical change and uncertainty. In: Energy Economics 20 (1998), S. 463-471.

COHERENCE 1999:

COHERENCE, ECOFYS, NTUA, ECOSIM: Economic Evaluation of Quantitative Objectives for Climate Change. Im Auftrag der Europäischen Kommission, Brüssel 1999.

Conrad und Schmidt 1997a:

K. Conrad, T.F.N. Schmidt: National Economic Impacts of an EU-Wide Permit System for CO₂ – An Applied General Equilibrium Analysis. In: Molt/Fahl 1997, S. 123-152.

Conrad und Schmidt 1997b:

Klaus Conrad, Tobias F.N. Schmidt: Double Dividend of Climate Protection and the Role of International Policy Co-ordination in the EU – An Applied General Equilibrium analysis with the GEM-E3 Model. ZEW Discussion Paper No. 97-26, Zentrum für Wirtschaftsforschung, Mannheim 1997.

De Beer 1998:

Jeroen de Beer: Potential for industrial energy efficiency improvement in the long term. PhD Thesis, Utrecht University, 1998.

Diekmann 1997:

Jochen Diekmann: Die DIW-Modelle zur Untersuchung gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen von Energieszenarien. In: Molt/Fahl 1997, S. 171-191.

Dietzsch 1997:

L. Dietzsch: Untersuchungen zu Reduktionsstrategien für klimarelevante Schadgase mit dem DSS DICTUM. In: Molt/Fahl 1997, S. 39-59.

Döhrn et al. 1987:

R. Döhrn, B. Hillebrand, M. Kiy, O. Knieper, R. Neuhaus, H. W. Schmidt: Ein Energiemodell für die Bundesrepublik Deutschland: Ergänzungen zum Prototyp eines Energiemodells. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen 1987.

Dreher et al. 1999:

M. Dreher, M. Wietschel, M. Göbelt, O. Rentz: Energy price elasticities of energy-service demand for passenger traffic in the Federal Republic of Germany. In: Energy 24 (1999), S. 133-140.

Drillisch et al. 2000:

Jens Drillisch, Walter Schulz, Frank Starrmann: Charakterisierung und Bewertung verschiedener Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung. Kurzexpertise im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln, Köln 2000.

Edler 1990:

Dietmar Edler: Ein dynamisches Input-Output-Modell zur Abschätzung der Auswirkungen ausgewählter neuer Technologien auf die Beschäftigung in der Bundesrepublik Deutschland. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Beiträge zur Strukturforschung, Heft 116, Berlin 1990.

Enquete-Kommission 1994:

Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Mobilität und Klima – Wege zu einer klimaverträglichen Verkehrspolitik. Economica Verlag, Bonn 1994.

Fahl et al. 1999:

Ulrich Fahl, Peter Schaumann, Uwe Remme: E³NET. In: Forum 1999, S. 283-344.

Fichtner et al. 1999:

Wolf Fichtner, Martin Dreher, Martin Göbelt, Martin Wietschel, Otto Rentz: PERSEUS. In: Forum 1999, S. 214-247.

Fishedick und Hennicke 1999:

Manfred Fishedick und Peter Hennicke: Bonusregelung für Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Energiedialog 2000. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn 1999.

Fishbone und Abilock 1981:

L.G. Fishbone, H. Abilock: MARKAL – a linear-programming model for energy systems analysis, technical description of the BNL version. International Journal of Energy Research 5 (1981), S. 353-375.

Fleissner et al. 1993:

P. Fleissner, W. Böhme, H.-U. Brautzsch, J. Höhne, J. Siassi, K. Stark: Input-Output-Analyse – Eine Einführung in Theorie und Anwendungen. Springer-Verlag, Wien 1993.

Forum 1999:

Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (Hrsg.): Energiemodelle zum Klimaschutz in Deutschland – Strukturelle und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen aus nationaler Perspektive. Physica Verlag, Heidelberg 1999.

Frohn et al. 1998:

Joachim Frohn, Ulrich Leuchtmann, Roman Käussl: Fünf makroökonomische Modelle zur Erfassung der Wirkungen umweltpolitischer Maßnahmen – eine vergleichende Betrachtung. Band 7 der Schriftenreihe „Beiträge zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen“, Verlag Metzler-Poeschel, Wiesbaden 1998.

Gerdey und Pfaffenberger 1999:

Hans-Jörg Gerdey, Wolfgang Pfaffenberger: MIS. In: Forum 1999, S. 118-131.

Goulder 1994:

Lawrence H. Goulder: Environmental Taxation and the “Double Dividend”: A Reader’s Guide. Center for Economic Studies, University of Munich. CES Working Paper No. 74, München 1994.

Goulder und Mathai 2000:

Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change. In: Journal of Environmental Economics and Management 39 (2000), S. 1-38.

Goulder und Schneider 1999:

Lawrence H. Goulder, Stephen H. Schneider: Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies. In: Resource and Energy Economics 21 (1999), S. 211-253.

Greßmann et al. 1999:

A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich: Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 61, Stuttgart 1999.

Gritsevskiy und Nakićenović 2000:

Andrii Gritsevskiy, Nebojša Nakićenović: Modeling uncertainty of induced technological change. In: Energy Policy 28 (2000), S. 907-921.

Grubb et al. 1991:

Michael Grubb, Peter Brackley, Michèle Ledic, Ajay Mathur, Steve Rayner, Jeremy Russell, Akira Tanabe: Energy Policies and the Greenhouse Effect. Volume Two: Country Studies and Technical Options. The Royal Institute of International Affairs, Dartmouth 1991.

Grubb et al. 1993:

Michael Grubb, Joe Edmonds, Patrick ten Brink, Michael Morrison: The costs of limiting fossil-fuel CO₂ emissions – a survey and analysis. *Annual Review of Energy and the Environment*, 18 (1993), S. 397-478.

Grubb et al. 1999:

Michael Grubb, Christian Vrolijk, Duncan Brack: The Kyoto Protocol – A Guide and Assessment. The Royal Institute of International Affairs, London 1999.

Grübler et al. 1998:

Arnulf Grübler, Nebojša Nakićenović, David G. Victor: Dynamics of energy technologies and global change. In: *Energy Policy* 27 (1999), S. 247-280.

Grübler und Messner 1998:

Arnulf Grübler, Sabine Messner: Technological change and the timing of mitigation measures. In: *Energy Economics* 20 (1998), S. 495-512.

Grübler et al. 1999:

Arnulf Grübler, Nebojša Nakićenović, David G. Victor: Modelling Technological Change – Implications for the Global Environment. In: *Annual Review of Energy and the Environment* 24 (1999), S. 545-569.

Grundmann 1999:

Thomas Grundmann: Volkswirtschaftlich konsistente Energieszenarien zur CO₂-Reduktion – Eine Sektoranalyse mittels Kopplung von einem energietechnischen mit einem makroökonomischen Modell am Beispiel des IKARUS-Instrumentariums. Berichte des Forschungszentrums Jülich 3663, Jülich 1999.

Hake und Markewitz 1997:

Jürgen-Friedrich Hake, Peter Markewitz (Hrsg.): Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien – IKARUS-Workshop am 14. und 15. April 1997, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad Godesberg. Forschungszentrum Jülich, Umwelt – Systemanalysen Band 4200003, Jülich 1997.

Håkonsen und Mathiesen 1997:

Håkonsen, Mathiesen: CO₂-Stabilization May Be a 'No-Regrets' Policy – A General Equilibrium Analysis of the Norwegian Economy. In: Environmental and Resource Economics 9 (1997), S. 171-198.

Hartard et al. 2000:

Susanne Hartard, Carsten Stahmer, Friedrich Hinterberger (Hrsg.): Magische Dreiecke - Berichte für eine nachhaltige Gesellschaft. Band 1 Stoffflussanalysen und Nachhaltigkeitsindikatoren. Metropolis Verlag, Marburg 2000.

Heinze 2000:

Angela Heinze: Material- und Energiefluss-Informationssystem (MEFIS) des Statistischen Bundesamtes - Ein Bericht aus der Werkstatt. In: Susanne Hartard, Carsten Stahmer, Friedrich Hinterberger (Hrsg.): Magische Dreiecke - Berichte für eine nachhaltige Gesellschaft. Band 1 Stoffflussanalysen und Nachhaltigkeitsindikatoren. Metropolis Verlag, Marburg 2000, S. 211-220.

Hettich et al. 1997:

Frank Hettich, S. Killinger, P. Winkler: Die ökologische Steuerreform des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung. In: ZFU 2/97, Konstanz 1997, S. 199-225.

Hillebrand 1991:

Bernhard Hillebrand: Ein Kraftwerksmodell für die Bundesrepublik Deutschland. In: RWI-Mitteilungen 42 (1991), S. 53-73.

Hillebrand und Buttermann 1996:

Bernhard Hillebrand und Hans-Georg Buttermann: Regionale Anpassungsprobleme einer Energiesteuer – das Beispiel Nordrhein-Westfalen. In: Glückauf, 132 (1996), S. 833-838.

Hillebrand und Wackerbauer 1996:

Gesamtwirtschaftliche Beurteilung von CO₂-Minderungsstrategien. Ifo-Schnelldienst 36 (1996).

Hillebrand et al. 1996:

Bernhard Hillebrand, Johann Wackerbauer, Karin Behring, Hans-Dieter Karl, Ulrike Lehr, Andreas Oberheitmann, Ralf Ratzenberger, Thomas Siebe, Karl-Heinz Storchmann, unter Mitarbeit von Georg Goldrian und Reinhard Hild: Gesamtwirtschaftliche Beurteilung von CO₂-Minderungsstrategien. Untersuchung des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung, Heft 19, Essen 1996.

Hoffmann et al. 1997:

H.-J. Hoffmann, W. Katscher, G. Stein: Energiestrategien für den Klimaschutz in Deutschland – Das IKARUS-Projekt des BMBF, Zusammenfassender Endbericht. Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Technologiefolgenforschung, IKARUS Bericht Nr. 0-01, Jülich 1997.

Hoster et al. 1997:

Frank Hoster, Heinz Welsch, Christoph Böhringer: CO₂ abatement and economic structural change in the European Internal Market. Physica Verlag, Heidelberg 1997.

Hourcade und Chapuis 1995:

Jean-Charles Hourcade, Thierry Chapuis: No-regret potentials and technical innovation – A viability approach to integrated assessment of climate policies. In: Energy Policy 23 (1995), S. 433-445.

Hourcade et al. 1996:

J.C. Hourcade, R. Richels, J. Robinson, W. Chandler, O. Davidson, J. Edmonds, D. Finon, M. Grubb, K. Halsnaes, K. Hogan, M. Jaccard, F. Krause, E. La Rovere, W.D.

Montgomery, P. Nastari, A. Pegov, K. Richard, L. Schrattenholzer, D. Siniscalco, P.R. Shukla, Y- Sokona, P. Sturm, A. Tudini: Estimating the Costs of Mitigating Greenhouse Gases. In: James P. Bruce, Hoesung Lee, Erik F. Haites (Hrsg.): Climate Change 1995 – Economic and Social Dimensions of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge 1996, S. 263-296.

Italianer 1986:

A. Italianer: The HERMES model – Complete specification and first estimation results. Commission of the European Communities, Brussels 1984.

Jaffe und Stavins 1994:

Adam B. Jaffe, Robert N. Stavins: The energy paradox and the diffusion of conservation technology. In: Resource and Energy Economics 16 (1994), S. 91-122.

Jochem 1997:

E. Jochem: Some critical remarks on today's bottom-up energy models. In: Jürgen-Friedrich Hake, Peter Markewitz (Hrsg.): Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien – IKARUS-Workshop am 14. und 15. April 1997, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad Godesberg. Forschungszentrum Jülich, Umwelt – Systemanalysen Band 4200003, Jülich 1997, S. 271-284.

Jorgenson und Wilcoxon 1993:

D.W. Jorgenson, P.J. Wilcoxon: Reducing US carbon emissions: An econometric general equilibrium assessment. Resour. Energy Econ., 15 (1993), S. 7-25.

Kemfert und Kuckshinrichs 1997:

C. Kemfert, W. Kuckshinrichs: MIS – A model-based macroeconomic information system for energy analysis in Germany. In: D.W. Bunn, E.R. Larsen (Hrsg.): Systems modelling for energy policy. Chichester 1997, S. 47-66.

Kemfert 1998:

C. Kemfert: Makroökonomische Wirkungen umweltökonomischer Instrumente – Eine Untersuchung der Substitutionseffekte anhand ausgewählter volkswirtschaftlicher Modelle für Deutschland. Frankfurt/M 1998.

Kemfert und Welsch 2000:

Claudia Kemfert und Heinz Welsch: Energy-Capital-Labor Substitution and the Economic Effects of CO₂ Abatement: Evidence for Germany. In: Journal of Policy Modelling, 2000, S. 641-660.

Kirchgässner 1998:

Gebhard Kirchgässner: Ökologische Steuerreform – Utopie oder realistische Alternative? In: Gerold Krause-Junk (Hrsg.): Steuersysteme der Zukunft. Schriften des Vereins für Socialpolitik, Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Band 256, Berlin 1998, S. 279-319.

Knörr und Höpfner 1998:

Wolfram Knörr, Ulrich Höpfner: TREMOD - Schadstoffe aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland. In: Wolfram Knörr und Ulrich Höpfner (Hrsg.): 20 Jahre ifeu-Institut – Engagement für die Umwelt zwischen Wissenschaft und Politik. Vieweg Verlag, Braunschweig und Wiesbaden 1998, S. 115-129.

Knörr et al. 2000:

Wolfram Knörr, Ulrich Höpfner, Udo Lambrecht, Andreas Patyk: Fortschreibung Daten- und Rechenmodell – Energieverbrauch und Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg 2000.

Kraft et al. 1999:

Armin Kraft, Peter Markewitz, Dag Martinsen: IKARUS-MARKAL. In: Forum 1999, S. 248-282.

Krause 1996:

The costs of mitigating carbon emissions – A review of methods and findings from European Studies. In: Energy Policy 24 (1996), S. 899-915.

Kuckshinrichs 1996:

Macroeconomic simulation of energy policy in Germany - Effects of a CO₂ tax system. In: P. Alvfors, L. Eidenstein, G. Svedberg, J. Yan (Hrsg): Proceedings of ECOS'96: Efficiency, costs, optimization, simulation and environmental aspects of energy systems. Stockholm 1996, S. 525-532.

Kuckshinrichs et al. 1998:

W. Kuckshinrichs, W. Pfaffenberger, W. Ströbele: Das Markoökonomische Informationssystem (MIS). In: Markewitz et al. 1998, S. 9-55.

Kydes 1999:

Andy S. Kydes: Energy Intensity and Carbon Emission Responses to Technological Change – The U.S. Outlook. In: The Energy Journal 20 (1999), S. 93-121.

Kypreos 1996:

S. Kypreos: The MARKAL-MACRO Model and the Climate Change. Paul Scherrer Institut, PSI Bericht 96-14, Villigen 1996.

Lambrecht 2000:

Udo Lambrecht: How can we estimate today's and future particulate emissions from transport and air quality? 4. ETH Conference on Nanoparticle Measurement. Ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Zürich 2000.

Leontief 1996:

W. Leontief: Input-Output Economics. Oxford University Press, 1966.

Linscheidt und Linnemann 1997:

Bodo Linscheidt und Ludger Linnemann: Wirkungen einer ökologischen Steuerreform – eine vergleichende Analyse der Modellsimulationen von DIW und RWI. Finanzwissenschaftliche Diskussionsbeiträge, Nr. 97-2, Köln 1997.

Lottje 1998:

Christine Lottje: Climate Change and Employment in the European Union. Climate Network Europe, Brüssel 1998.

Lucas 1976:

R. Lucas: Econometric policy evaluation – a critique. J. Monetary Econ. 1 (1976), S. 19-46.

Lutz und Meyer 2001:

Christian Lutz, Bernd Meyer: Wirkungen der ökologischen Steuerreform auf Wirtschaft und Umwelt in Deutschland – Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit dem umweltökonomischen Modell PANTA RHEI. GWS Discussion Paper 1, Osnabrück 2001.

Manne und Richels 1992:

Alan S. Manne, Richard G. Richels: Buying Greenhouse Insurance – The Economic Costs of Carbon Dioxide Emission Limits. MIT Press, Cambridge 1992.

Markewitz 2000a:

Peter Markewitz: Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung in den IKARUS-CO₂-Minderungsszenarien. Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung, Jülich 2000.

Markewitz 2000b:

Politiksznarien für den Klimaschutz II – Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. DIW Berlin, FhG-ISI Karlsruhe, Forschungszentrum Jülich, Öko-Institut Berlin. Energiedialog 2000, Friedrich-Ebert-Stiftung, Berlin 2000.

Markewitz 2001:

P. Markewitz: Zusammenstellung und Vergleich einiger wichtiger Daten. Persönliche Mitteilung. Forschungszentrum Jülich, 2001.

Markewitz et al. 1998:

P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen, M. Walbeck, J.-Fr. Hake: Modelle für die Analyse energiebedingter

Klimagasreduktionsstrategien. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt Band 7, Jülich 1998.

Martinsen et al. 1997:

D. Martinsen, P. Markewitz, D. Müller, M. Walbeck: Das IKARUS-Optimierungsmodell. In: Molt und Fahl 1997, S. 11-37.

Matthes 1997:

Felix Chr. Matthes: Die Doppelte Dividende - Zur Kontroverse um die Beschäftigungseffekte einer ökologischen Steuerreform. Öko-Institut, Berlin 1997.

Matthes und Ziesing 2000:

Felix Christian Matthes, Hans-Joachim Ziesing: Zur ökologischen und ökonomischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Institut für angewandte Ökologie, Berlin 2000.

Meier 1984:

Peter Meier: Energy Systems Analysis for Developing Countries. Springer-Verlag, Berlin 1984.

Mensink 2000:

Paul G. C. Mensink: A mathematical modeling methodology categorization with an application to global warming related models. Short communication.

<http://www.sls.wau.nl/me/staff/mesnsink/mensink.html>, Wageningen 2000.

Messner und Schrattenholzer 2000:

Sabine Messner, Leo Schrattenholzer: MESSAGE-MAKRO – linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively. In: Energy 25 (2000), S. 267-282.

<http://www.elsevier.com/locate/energy>.

Meyer et al. 1997:

Bernd Meyer, Andreas Bockermann, Georg Ewerhart, Christian Lutz: Was kostet eine Reduktion der CO₂-Emissionen? Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit dem umweltökonomischen Modell PANTA RHEI. Beiträge des Instituts für Empirische Wirtschaftsforschung der Universität Osnabrück, Beitrag Nr. 55, Osnabrück 1997.

Meyer et al. 1998:

B. Meyer, A. Bockermann, G. Ewerhart, C. Lutz: Modellierung der Nachhaltigkeitslücke. Physica Verlag, Heidelberg 1998.

Meyer et al. 1999a:

Bernd Meyer, Andreas Bockermann, Georg Ewerhart, Christian Lutz: Marktkonforme Umweltpolitik – Wirkungen von Luftschadstoffemissionen, Wachstum und Struktur der Wirtschaft. Physica-Verlag, Heidelberg 1999.

Meyer et al. 1999b:

Bernd Meyer, Andreas Bockermann, Christian Lutz: PANTA RHEI. In: Forum 1999, S. 85-117.

Meyer und Ewerhart 1999:

B. Meyer, G. Ewerhart: INFORGE – Ein disaggregiertes Simulations- und Prognosemodell für Deutschland. In: H.-W. Lorenz, B. Meyer (Hrsg.): Studien zur Evolutorischen Ökonomik IV, Berlin 1999.

Mohr et al. 1997:

M. Mohr, H. Unger, A. Ziegelmann: Sektorielle Arbeitsmarkteffekte infolge einer Umsetzung von Ausbaustrategien neuer Energiesysteme. In: VDI Berichte 1311: Industriestandort Deutschland – Arbeitsplätze und Energie, Düsseldorf 1997, S. 53-67.

Molt und Fahl 1997:

S. Molt, U. Fahl (Hrsg.): Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland – Stand der Entwicklung. Forschungszentrum Jülich, Umwelt – Systemanalysen Band 4200001, 1997.

Müsgens et al. 2000:

Felix Müsgens, Walter Schulz, Frank Starrmann: Kurzexpertise zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. Kurzexpertise im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln, Köln 2000.

Nathani 2000:

Carsten Nathani: Entwicklung eines Modellsystems zur Simulation der energiewirtschaftlichen und strukturellen Veränderungen einer verstärkten Kreislaufwirtschaft. Systemtechnische und ökonomische Modellierung am Beispiel des Stoffstroms "Papier". Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe 2000.

Nyhus 1991:

D. Nyhus: The INFORUM International System. Economic Systems Research, 3 (1991), S. 55-64.

OECD/IEA 1998:

International Energy Agency/Organisation for Economic Co-operation and Development (Hrsg.): Mapping the energy future – Energy modelling and climate change policy. Paris 1998

Pfaffenberger und Kemfert 1997a:

W. Pfaffenberger, C. Kemfert: Das gesamtwirtschaftliche Informationssystem IKARUS (MIS). In: Molt und Fahl 1997.

Pfaffenberger und Kemfert 1997b:

W. Pfaffenberger, C. Kemfert: Liberalisierung der Energiewirtschaft und Beschäftigung. In: VDI Berichte 1311: Industriestandort Deutschland – Arbeitsplätze und Energie, Düsseldorf 1997, S. 81-93.

Rentz et al. 1999:

O. Rentz, S. Nunge, U. Karl, T. Holtmann, T. Zundel: Machbarkeitsstudie zur Entwicklung eines Emissionsprojektionsmodells auf der Grundlage des CORINAIR-Ansatzes. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1999.

RFF 1984:

Resources for the Future: An Energy-Oriented Input-Output Model. EA-3625, Research Project 1366-1, Electric Power Research Institute, Palo Alto 1984.

Richter und Wiegard 1997:

Die Ökosteuer in der Waagschale der Ökonomie. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 3.5.1997, S. 15.

Ruocco und Wiegard 1997:

Anna Ruocco, Wolfgang Wiegard: Green Tax Reforms: Understanding the Double Dividend Hypothesis. In: ZFU 2 (1997), Tübingen 1997, S. 171-198.

Ruth et al. 1999:

Michael Ruth, Stephen Bernow, Gale Boyd, R. Neal Elliot, Joe Roop: Analytical Approaches to measuring the potential for Carbon Emission Reductions in the Industrial Sectors of the United States and Canada. In: IEA Workshop on Technologies to Reduce Greenhouse Gas Emissions: Engineering-Economic Analyses of Conserved Energy and Carbon, Washington DC, 1999.

<http://www.iea.org/workshop/engecon/ruth.pdf>

Schaumann und Schlenzig 1997:

Peter Schaumann, Christoph Schlenzig: MESAP III – Ein Werkzeug für Energie- und Umweltmanagement. In: Molt/Fahr 1997, S. 71-98.

Scheelhaase 2000:

Janina Scheelhaase: Arbeitsplätze und Klimaschutz. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Energie und Klimaschutz. Forschungsbericht 298 14 338. Untersuchung im Auftrag des

Umweltbundesamtes. Prognos: Europäisches Zentrum für Wirtschaftsforschung und Strategieberatung, Berlin 2000.

Schlenzig 1997:

PlaNet – Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Band 47, Stuttgart 1997.

Schmid 1994:

Günter Schmid: Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen. Institut für Wirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Stuttgart 1994.

Schmidt und Koschel 1999:

Tobias F. N. Schmidt, Henrike Koschel: GEM-E3. In: Forum 1999, S. 153-190.

Schön et al. 1997:

M. Schön, H. Kalb, C. Nathani, R. Walz, F. Chr. Matthes, M. Cames, R. Fendler: Politiksznarien für den Klimaschutz – Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 2: Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt Band 6, Jülich 1997.

Shoven und Whalley 1992:

John B. Shoven, John Whalley: Applying General Equilibrium. Cambridge surveys of economic literature, Cambridge University Press, Cambridge 1995.

Stahmer 2000:

Carsten Stahmer: Das magische Dreieck der Input-Output-Rechnung. In: Susanne Hartard, Carsten Stahmer, Friedrich Hinterberger (Hrsg.): Magische Dreiecke - Berichte für eine nachhaltige Gesellschaft. Band 1 Stoffflussanalysen und Nachhaltigkeitsindikatoren. Metropolis Verlag, Marburg 2000, S. 43-91.

Statistisches Bundesamt 2000:

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Fachserie 18 Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, Reihe 2 Input-Output-Tabellen. Wiesbaden 1995.

Steiner und Strobel 1997:

Gotthard Stein, Bernd Strobel (Hrsg.): Politiksszenarien für den Klimaschutz.

Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 5,

Toman 1998:

Michael Toman: Research Frontiers in the Economics of Climate Change. In: Environmental and Resource Economics 11 (1998), S. 603-621.

Traube 1998:

Klaus Traube: Quoten-/Zertifikatsmodell zur Förderung des Ausbaus der Elektrizitätserzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung. Im Auftrag der Bundesländer Berlin, Brandenburg, Bremen, Hessen, Saarland und Schleswig-Holstein, 1998. Energiedialog 2000. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn 1999.

<http://www.energiedialog2000.de/Kwk-qu1.html>

Traube 1999:

Klaus Traube: Die Kraft-Wärme-Kopplung – ein deutsches Trauerspiel. Energiedialog 2000. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn 1999.

<http://www.energiedialog2000.de/Kwktra1.html>

Traube und Schulz 2001:

Klaus Traube, Wolfgang Schulz: Aktuelle Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung – Ökologische und ökonomische Wirkung eines mittelfristigen Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung zur Nah-/Fernwärmeversorgung in Deutschland. Kommunalwirtschaftliche Forschung und Praxis, Band 3, Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main 2001.

Ungenannt 2000:

<http://www.ier.uni-stuttgart.de/extern/forum>

Ungenannt 2000a:

<http://www.ier.uni-stuttgart.de/extern/forum/models/mex2/diogenes.htm>

Ungenannt 2000b:

<http://www.ier.uni-stuttgart.de/extern/forum/models/mex2/gem-e3.htm>

Ungenannt 2000c:

<http://www.ier.uni-stuttgart.de/extern/forum/models/mex2/planet.htm>

Ungenannt 2001a:

http://www.ifeu.de/v_tremod.htm

Ungenannt 2001b:

<http://www.oeko.de/service/gemis>

UNO 1993:

Vereinte Nationen (Hrsg.): Integrated Environmental and Economic Accounting. Handbook of National Accounting. Studies in Methods, Series F61, New York 1993.

Vögele 2001:

Stefan Vögele: Analyse von Energie- und Umweltpolitiken mit DIOGENES – Ein gesamtwirtschaftliches Modell und seine Anwendung auf die Elektrizitätswirtschaft in Baden-Württemberg. Forschungsbereich Umwelt- und Ressourcenökonomik, Umweltmanagement des ZEW. Physica-Verlag, Heidelberg 2001.

Walz 1997:

R. Walz: Auswirkungen auf Beschäftigung durch rationelle Energieanwendung in Deutschland. In: VDI Berichte 1311: Industriestandort Deutschland – Arbeitsplätze und Energie, Düsseldorf 1997, S. 69-79.

Welsch 1996:

Heinz Welsch: Klimaschutz, Energiepolitik und Gesamtwirtschaft – Eine allgemeine Gleichgewichtsanalyse für die Europäische Union. R. Oldenbourg Verlag, München 1996.

Welsch 1998:

Heinz Welsch: Environmental Taxes and Employment: The Role of Wage Formation. Volkswirtschaftliche Reihe der Universität Oldenburg, Oldenburg 1998.

Welsch 1999:

Heinz Welsch: LEAN. In: Forum 1999, S. 132-152.

Welsch und Hoster 1997:

H. Welch, F. Hoster: LEAN – Modellcharakteristika und Anwendungsbeispiele. In: Molt/Fahl 1997, S. 153-170.

Wietschel et al. 1997a:

M. Wietschel, O. Rentz, A. Ardone, W. Fichtner, O. Lüth, H. Schöttle: PERSEUS – Modellentwicklungsstand, Anwendungsfälle und Perspektiven. In: Jürgen-Friedrich Hake, Peter Markewitz (Hrsg.): Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien – IKARUS-Workshop am 14. und 15. April 1997, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad Godesberg. Forschungszentrum Jülich, Umwelt – Systemanalysen Band 4200003, Jülich 1997, S. 223-240.

Wietschel et al. 1997b:

M. Wietschel, A. Michaelowa, A. Ardone, W. Fichtner, O. Rentz: Die Kompensation in der Klimavorsorge – Chancen und Grenzen. Zeitschrift für angewandte Umweltforschung 19 (1997), Heft 2.

Wietschel et al. 1997c:

M. Wietschel, W. Fichtner, H. Schöttle, O. Lüth, O. Rentz: Integrated Resource Planning als ein Instrument zur umweltorientierten Unternehmensführung. In: EVU auf dem Weg zum Dienstleistungsunternehmen – Instrumente und Beispiele. VDI Bericht 1309, Düsseldorf 1997, S. 11-34.

Wilson und Swisher 1993:

Deborah Wilson and Joel Swisher: Exploring the gap – Top-down versus bottom-up analyses of the cost of mitigating global warming. In: Energy Policy 1993, S. 249-263.

Zhang und Folmer 1998:

ZhongXiang Zhang, Henk Folmer: Economic modelling approaches to cost estimates for the control of carbon dioxide emissions. Energy Economics 20 (1998), S. 101-120.

Ziesing et al. 1997:

H.-J. Ziesing, J. Diekmann, R. Hopf, M. Kleemann, G. Kolb, P. Markewitz, D. Martinsen, E. Jochem, K. Ostertag, B. Schlomann, M. Cames, F. Chr. Matthes: Politikszenerarien für den Klimaschutz – Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt Band 5, Jülich 1997.

Ziesing et al. 1999:

H.-J. Ziesing, J. Diekmann, R. Hopf, W. Katscher, M. Kleemann, A. Kraft, P. Markewitz, D. Martinsen, E. Jochem, B. Schlomann, M. Cames, F. Chr. Matthes: Politikszenerarien für den Klimaschutz - Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes. Band 5: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt Band 20, Jülich 1999.

Ziesing 2000:

Hans-Joachim Ziesing: Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung in der zukünftigen Energieversorgung und ihr Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. Fachgespräch im Rahmen des Energiedialogs 2000.

<http://www.energedialog2000.de>