

Mathematische Modelle im Dienste der Energiewirtschaft

Autor(en): **Rüst, L.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 4

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904160>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mathematische Modelle im Dienste der Energiewirtschaft

L. Rüst

Unter vorgegebenen Bedingungen die kostengünstigste Energiebedarfsdeckung zu bestimmen, ist das Ziel eines im Rahmen einer internationalen Studie erarbeiteten mathematischen Modells. Der Beitrag zeigt auf, wie dieses Modell auf das schweizerische Energiesystem angewandt werden könnte, und beschreibt erste Testläufe.

Un modèle mathématique élaboré dans le cadre d'une étude internationale a pour but de déterminer quelle est, dans des conditions données, la couverture des besoins en énergie la moins coûteuse. L'article montre comment ce modèle pourrait être appliqué au système énergétique suisse et décrit le déroulement des premiers tests.

Adresse des Autors

Dr. Lukas Rüst, Oberassistent, Institut für Operations Research und mathematische Methoden der Wirtschaftswissenschaften der Universität Zürich, Weinbergstrasse 59, 8006 Zürich

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Seit der Erdölkrise in den Jahren 1973/74 ist sich jedermann bewusst, wie einseitig die Energieversorgung in den meisten Staaten aufgebaut ist. Diese Tatsache veranlasste auch die Wissenschaft zu einem besonderen Effort. Bereits 1978 veröffentlichte das Energy Modeling Forum (EMF) an der Stanford University einen Katalog von beinahe 150 Energiemodellen. In der Schweiz wurde u. a. das Nationale Forschungsprogramm 4 «Forschung und Entwicklung im Bereich der Energie» gestartet.

In der vorliegenden Arbeit soll nun als Beispiel eines mathematischen Ansatzes von einem hierzulande wenig bekannten Energieangebots- und -umwandlungsmodell die Rede sein, das die Lineare Programmierung verwendet. Am International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Wien hat die Energy Systems Program Group eine ganze Kette von Modellen [1] entwickelt, wobei mit MESSAGE (Model for Energy Supply Alternatives and their General Economic Impact) die kostengünstigste Energieversorgung berechnet werden soll. Einerseits steht nämlich eine Anzahl von nutzbaren Primärenergieressourcen zur Verfügung, andererseits muss eine vorgegebene Nachfrage nach Sekundärenergie gedeckt werden. Dabei soll aus den verschiedenen Umwandlungsmöglichkeiten diejenige Mischung ausgewählt werden, die die Nachfrage unter vorgegebenen Bedingungen am kostengünstigsten zu decken vermag. Die zum Modell gehörende Software wurde ebenso am IIASA entwickelt und für eine weltweite Untersuchung, allerdings aufgeteilt in sieben Regionen, eingesetzt. Obwohl die Schweiz nicht Mitglied des IIASA ist, stellte es dem Institut für Operations Research der Universität Zürich die Software von MESSAGE zur Verfügung.

1.2 Globales Modell für das schweizerische Energiesystem

Vor dem Einsatz von MESSAGE für eine Untersuchung des schweizerischen Energiesystems stand folgende Frage im Mittelpunkt: Lässt sich ein Energiemodell, das für globale Untersuchungen entwickelt und eingesetzt wurde, auch für ein kleines nationales Energiesystem, wie die Schweiz es darstellt, sinnvoll verwenden? Zur Beantwortung dieser Frage wurde ein mehrjähriges Projekt durchgeführt, das in die Wissenschaftsbereiche Mathematik, Ökonomie, Physik und Informatik reichte [2]. In der Folge sollen einige interessante Aspekte dieses Projektes beschrieben werden. In einer ersten Phase wurde versucht, ähnlich der weltweiten Anwendung, die Umwandlung von Primär- in End- und teilweise Nutzenergie zu modellieren (vgl. Schweizerische Gesamtenergiestatistik [3]). Dieser Ansatz erwies sich aber als ungeeignet. Schliesslich wurde zur Modellierung die Umwandlung der Endenergie in Nutzenergie ausgewählt. Dieser Umwandlung ist jeweils auch ein eigenes Kapitel in der Gesamtenergiestatistik gewidmet.

Als Resultat einer Modellanwendung wird nun eine günstige Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs berechnet, nämlich diejenige, die die vorgegebene Nachfrage nach Nutzenergie am kostengünstigsten zu decken vermag. Dabei sind allerdings verschiedene Rahmenbedingungen (Restriktionen) zu erfüllen, die natürlich möglichst realistisch vorzugeben sind.

Ebenso sinnvoll sollte sich MESSAGE zur Beantwortung zum Beispiel folgender Fragen einsetzen lassen:

- Wie könnte sich eine überproportionale Steigerung des Heizölpreises auswirken?
- Wie könnte sich eine staatliche Subvention von Hausisolationen auswirken?

- Wie könnte sich der Ausfall eines KKW auswirken?
- Wie hoch dürfen Investition und Unterhalt von Sonnenkollektoren sein, damit sie zur Gebäudeheizung konkurrenzfähig sind?
- Wie stark vermag das Gas bei real konstantem Preis das Erdöl zu ersetzen?
- Wie könnte sich die Zusammensetzung der Endenergie bei einer Zinsatzsteigerung oder -reduktion auswirken?

Es soll nochmals klar betont werden, dass MESSAGE kein Prognosegenerator ist, sondern mögliche Auswirkungen von politischen und/oder wirtschaftlichen Entscheidungen unter Szenario-Annahmen mit Hilfe der Mathematik aufzeigen soll.

2. Modellbeschreibung

MESSAGE ist ein Modell, das die Dynamische Lineare Programmierung benützt mit der zusätzlichen Möglichkeit der gemischt-ganzzahligen Programmierung. Wenn man davon ausgeht, dass auf den meisten in Frage kommenden Computern die Lineare Programmierung verfügbar ist oder zumindest der Einsatz eines Standardsoftwarepaketes möglich wäre, sollte damit MESSAGE weit verbreitet einsetzbar sein.

Die grundlegende Idee (etwa bei Kall [4] zu finden) ist die Optimierung einer linearen Zielfunktion bezüglich einer Menge von linearen Restriktionen. Die Restriktionen bestimmen den zulässigen Bereich, aus dem die Zielfunktion die beste Lösung bezüglich eines Kriteriums auswählt.

2.1 Restriktionen

Entsprechend dem modellierten Energiesystem werden verschiedene Gruppen von Restriktionen generiert. So gilt etwa für die jährliche Nachfrage nach Nutzenergie in Zeitperiode t :

$$\sum_i \eta_i X_i^t \geq dm_m^t$$

Einheit: [TJ]

mit:

t 1, ..., 11 (Zeitperioden)*
 dm_m^t jährliche Nachfrage nach Nutzenergie m in Zeitperiode t [TJ]
 (Die Energie wird in der Gesamtenergiestatistik in TJ angegeben, während MESSAGE im Original mit GWh rechnet.)

η_i Wirkungsgrad der Umwandlungstechnologie i (z.B. 0,69 bei Ölheizung)
 X_i^t jährliche Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie während Zeitperiode t durch Technologie i [TJ]**
 i Umwandlungstechnologie
 m Nachfragesegment nach Nutzenergie (Anwendergruppe und Verwendungsart, z.B. Wärme für den Sektor Haushalt)

In ähnlicher Art werden die anderen Beziehungen im Modell mit Ungleichungen bestimmt, etwa:

- Bedarf an Endenergie
- Verfügbarkeit an Endenergie über den ganzen Planungshorizont
- jährliche Verfügbarkeit der Inlandenergien
- jährliche Importschranken der Endenergien
- usw.

Mit diesen Restriktionen soll das schweizerische Energiesystem möglichst realistisch beschrieben werden. Dabei bleibt allerdings das Modell selbst bei grossem Aufwand «nur» eine Abstraktion der Wirklichkeit. Vorläufig nicht berücksichtigt wurde (u. a.) die Emission von Schadstoffen. Im Modell wäre es allerdings möglich, für alle oder einzelne Schadstoffe maximale Ausstossschranken vorzugeben.

2.2 Zielfunktion

Als Zielfunktion wird die Summe der diskontierten Kosten des Kapitals (Investitionen), des Unterhalts und des Betriebes (laufende Kosten) sowie der Brenn- und Treibstoffe (Endenergiekosten) definiert.

$$\sum_{t=1}^{11} \beta(t) lp \left\{ d(t)'Y(t) + c'X(t) + b(t)'R(t) \right\}$$

mit:

t Zeitperiode
 β Diskontfaktor

* Die Planungsdauer wird in Zeitperioden aufgeteilt. In der hier beschriebenen Arbeit wurde der Planungshorizont auf 11 Perioden zu 2 Jahren (1982–2003) festgelegt, während am IIASA häufig mit etwa 10 Perioden zu 5 Jahren gerechnet wurde.

** Mit X_i^t wird diejenige Menge [TJ] an Endenergie bezeichnet, die ausschliesslich in Nutzenergie umgewandelt wird (Nettobetrag). Die Umwandlungstechnologie kann aber zusätzliche Endenergie verbrauchen, etwa für den Betrieb der Anlage.

lp Anzahl Jahre pro Periode
 d Vektor der Kapitalkosten
 Y Vektor der Kapazitätzunahmen (LP-Variablen)
 c Vektor der Betriebs- und Unterhaltskosten
 X Vektor der Energieumwandlungsaktivitäten (LP-Variablen)
 b Vektor der Energiepreise (Endenergie)
 R Vektor des Endenergieverbrauchs (LP-Variablen)

Die gewählte Form der Zielfunktion erlaubt eine angemessene Brücke zu ökonomischen Betrachtungen.

Insbesondere gibt die Zielfunktion die Rahmenbedingungen zu langfristigen Investitionsprogrammen. Ebenso erlaubt sie, die gesamten Kosten der nachgefragten Energie zu bestimmen, unabhängig davon, ob die Nachfrage nun durch Inland- oder importierte Energie gedeckt wird, wobei natürlich im allgemeinen verschiedene Preise für die beiden Arten gelten.

2.3 Programmablauf

Das zu MESSAGE gehörige Computerprogramm verarbeitet die von aussen einzugebenden Inputdaten und erstellt ein Linearprogramm im standardisierten MPS-Format. Das Lösen des LP hat mittels Optimierungssoftware (im beschriebenen Projekt wurde mit MPSX/370 gerechnet) zu erfolgen.

3. Modellierung des schweizerischen Energiesystems

Vorgegeben durch das mathematische Modell, mussten folgende Punkte gelöst werden, wobei sich die Gesamtenergiestatistik als wichtigste Grundlage erwies:

- Bestimmung der Modellparameter
- Aufarbeitung der statistisch relevanten Daten

3.1 Modellgrössen

Nutzenergienachfrage:

Für die vier Anwendungsgebiete (Wärme, mech. Arbeit, Chemie, Licht) treten (teilweise) vier Verbrauchergruppen auf (Haushalt, Gewerbe/Landwirtschaft/Dienstleistungen, Industrie, Verkehr). Insgesamt werden dreizehn Nachfragesegmente modelliert (Wärme für den Sektor Haushalt, mechanische Arbeit für den Sektor Haushalt, ..., Licht für den Sektor Verkehr).

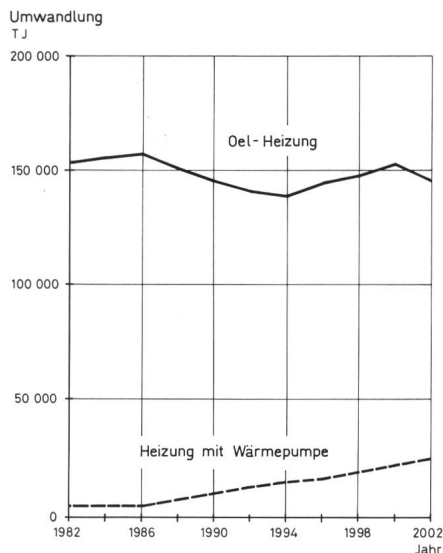


Fig. 1 Beispiel einer Modellrechnung: Wärmeerzeugung im Haushalt mittels Ölheizung und Wärmepumpe

Endenergieangebot:

In den Kategorien Inlandproduktion und/oder Import wird Endenergie angeboten als flüssige Brenn- und Treibstoffe, Elektrizität, Gas, Kohle und Koks, Holz, Fernwärme sowie Industrieabfälle.

Technologien:

In der Gesamtenergiestatistik werden 32 Umwandlungsmöglichkeiten von End- in Nutzenergie samt Wirkungsgrad beschrieben. Von allen diesen Möglichkeiten wurde ein Repräsentant mit dem vorgegebenen Wirkungsgrad ausgewählt, um ihn ins Modell aufzunehmen. Diese Grundlage wurde um sechs besonders interessante Technologien (z. B. Wärme-Kraft-Kopplung) ergänzt.

3.2 Exogene Inputdaten

Die Beschaffung der zur Modellierung notwendigen statistisch relevanten Daten bescherte enorme Schwierigkeiten. Wo die gewünschten Daten fehlten und auch nicht näherungsweise zu bestimmen waren, mussten Annahmen getroffen werden. Die deutlich als Annahmen bezeichneten Daten sind mit der nötigen Vorsicht zu behandeln. Die Nachfrage nach Nutzenergie, die Verfügbarkeitsschranken der Endenergie und die Energiepreise wurden auf der Grundlage der vorliegenden historischen Daten mit jährlichen Zuwachsraten in die Zukunft projiziert. Die Technologiedaten liessen sich mit neueren Untersuchungen und Werkprospekten aufarbeiten, allerdings vervollständigt mit einem grossen An-

teil an eigenen Annahmen. Schliesslich wurde ein konstanter Zinsfuss von 6% den Berechnungen zugrunde gelegt.

3.3 Problemgrösse

Das vorläufige Modell ergibt ein Linearprogramm mit folgender Problemgrösse:

- 1 Zielfunktion
- 728 Restriktionen
- 979 Variablen

Zudem sind 385 Variablen mit oberen Schranken versehen, d.h. deren Werte dürfen eine gesetzte Schranke nicht überschreiten. Auf diese Weise werden beispielsweise die jährlichen Investitionen in Wärmepumpenanlagen beschränkt, da eine Umstellung der Heizungen wohl nur in Raten erfolgen kann.

4. Ergebnisse einer Modellrechnung

Die Resultate der Modellanwendung sind mit Spannung erwartet worden. Aufgrund der Inputdaten waren zwar sensationelle Veränderungen gegenüber dem jetzigen Zustand ausgeschlossen, doch sind kleine Überraschungen nicht ausgeblieben. Es bleibt aber festzuhalten, dass die vorliegenden Ergebnisse vor allem als Test zur quantitativen Erfassung eines Teils des schweizerischen Energieflusses unter bestimmten Modellbetrachtungen zu werten sind. Je nach Gewicht und Genauigkeit der einzelnen Daten können die Resultate auf einfache Art verändert werden. Aus der vorliegenden Untersuchung sollen drei interessante Aspekte kurz erläutert werden.

4.1 Wärmeerzeugung

Für das Anwendungsgebiet «Wärme» steht besonders der Sektor Haushalt im Brennpunkt des öffentlichen Interesses. Dem flüssigen Brennstoff und damit der Ölheizung fällt unter den für dieses Beispiel getroffenen Modellannahmen weiterhin die Funktion des Reservoirs und Puffers zu. Erstaunlich ist die steigende Bedeutung der Holzfeuerung. So werden in allen Perioden die maximal möglichen Investitionen für Holzfeuerungsanlagen getätigt. Die Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpe erreicht den allgemein erwarteten Aufschwung. Die Heizung mittels Sonnenenergie ist bei den vorgegebenen Kostendaten nicht konkurrenzfähig. Für die Industrie und den Sektor Gewerbe/Dienstleistungen er-

scheint die Wärme-Kraft-Kopplung als interessante Kombination.

Als Beispiele für die Wärmeerzeugung für den Sektor Haushalt sind in Figur 1 die Umwandlung mittels Ölheizung und Wärmepumpe (monovalent Luft) dargestellt. Die anfänglich geringe Wärmeproduktion mittels Wärmepumpe ist auf die kleine verfügbare Kapazität zurückzuführen, die zu Beginn der Planung vorgegeben wurde.

In direktem Zusammenhang mit der jährlichen Energieumwandlung steht die bereits installierte oder neu zu installierende Leistung der in Frage kommenden Umwandlungstechnologien. Allerdings liegt das Interesse weniger beim Investitionsvolumen an sich, sondern bei der neu erstellten Kapazität. Wiederum als Beispiel für die Wärmeerzeugung im Sektor Haushalt ist in Figur 2 die neu installierte Leistung dargestellt. So werden (immer gemäss Modellrechnung) in den ersten drei Perioden keine neuen Wärmepumpen installiert, dafür in den restlichen Perioden die maximal möglichen Neuinstallationen dafür getätigt (Fig. 2, unten). Ein recht ruppiges Bild zeigt die neu installierte Kapazität für die Ölheizung (Fig. 2, oben). Dies ist wiederum ein Zeichen für die Puffer- und Reservoirfunktion der Ölheizung. Investitionen für Hausisolationen sind zu Beginn des Planungszeitraumes wegen der modellmässig langen Nutzungsdauer besonders effizient, verlieren aber gegen Ende der Planung an Bedeutung (typischer Endperiodeneffekt!).

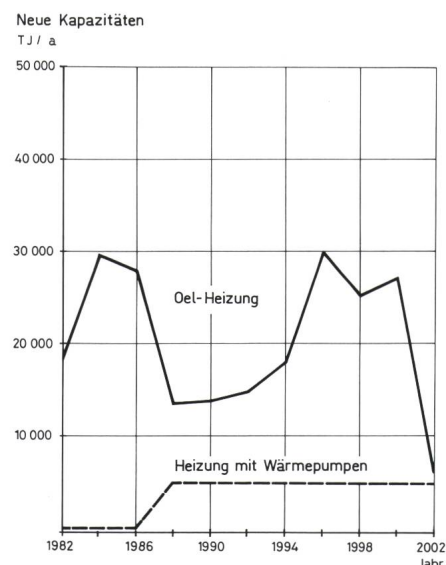


Fig. 2 Ergebnis einer Modellrechnung: neu installierte Wärmeerzeugungs-Kapazitäten im Haushalt am Beispiel Ölheizung und Wärmepumpe

4.2 Mechanische Arbeit

Unter den gewählten Annahmen ist eine konstante Verlagerung von den flüssigen Treibstoffen auf die Elektrizität festzustellen. Als Illustration mögen die relativen Anteile der beiden Endenergiearten zur Erzeugung der mechanischen Arbeit dienen. Über alle vier Sektoren (Haushalt, Gewerbe/Landwirtschaft/Dienstleistung, Industrie und Verkehr) addiert, werden in der Modellrechnung im Jahr 1982 21,4% der mechanischen Arbeit mittels Elektrizität erzeugt (entsprechend 78,6% mit flüssigem Treibstoff), während nach Modellrechnung im Jahr 2003 der Anteil der Elektrizität auf 28,6% steigen wird (entsprechend wird der Anteil des flüssigen Treibstoffs auf 71,4% sinken). Als Vergleich seien noch die entsprechenden Zahlen aus der GES 1982 angefügt: 20,6% Elektrizität und 79,4% flüssiger Treibstoff.

4.3 Zusammensetzung der Endenergie

Als logische Konsequenz der Inputdaten ist die Zusammensetzung der Endenergie im erwarteten Rahmen ausgefallen. Auffallend ist die in dieser Musterrechnung überdurchschnittliche Zunahme der folgenden Energiearten (in relativer Bedeutung geordnet): Holz, Fernwärme, Gas, Elektrizität sowie Kohle und Koks. Unterdurchschnittliche Zunahmen bzw. Abnahmen verzeichnen: flüssige Treibstoffe, flüssige Brennstoffe sowie die Industrieabfälle. Bei den flüssigen Brenn- und Treibstoffen wurde wegen fehlender Angaben mit den gleichen Preisen für Import- und Inlandenergie gerechnet. Deshalb lässt sich hier zurzeit keine spezielle Aussage machen.

Durchschnittliche jährliche Zuwachsraten einer Modellrechnung zwischen 1982 und 2002

Tabelle I

Endenergieart	Durchschnittliche Zuwachsrate % p.a.
flüssige Brennstoffe	+0,08
flüssige Treibstoffe	+1,25
Elektrizität	+3,40
Gas	+3,98
Kohle und Koks	+2,50
Holz	+7,96
Fernwärme	+5,00
Industrieabfälle	-0,84
Endenergie total	+1,73

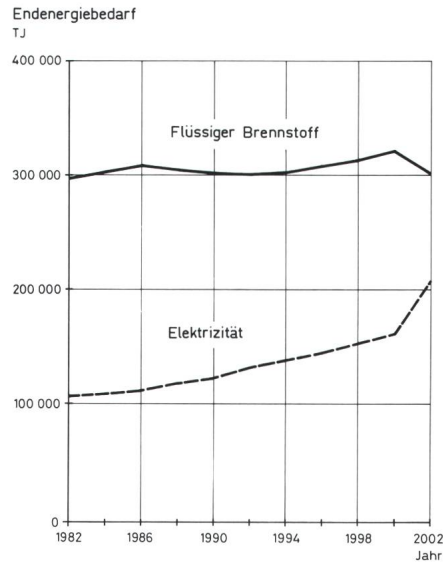


Fig. 3 Beispiel einer Modellrechnung: Entwicklung des Bedarfs an flüssigen Brennstoffen und Elektrizität

Die durchschnittlichen jährlichen Zuwachsraten sind in der Tabelle I zusammengefasst. Dabei wurden die Daten der ersten Periode mit denjenigen der letzten Periode verglichen. Dazwischen ist allerdings die Zunahme fast nirgends konstant ausgefallen. Als Beispiele, wie es gemäss Modellrechnung aussehen würde, dient Figur 3. Während sich der flüssige Brennstoff, wie bereits erwähnt, offenbar gut als Manövriermasse eignet, weist der Bedarf an elektrischer Energie durchwegs Zunahmen auf. Der Sprung bei der Elektrizität in der letzten Periode lässt sich mit dem Endperiodeneffekt erklären.

Eine interessante Tatsache darf nicht unerwähnt bleiben: Als Restriktion wurde die Nachfrage nach verschiedenen Nutzenergiearten mit durchschnittlichen jährlichen Zuwachsraten von 2,15% vorgegeben. Dagegen scheint die entsprechende Zuwachsrate beim Endenergieverbrauch von nur 1,73% fast wundersam. Die Erklärung dieses Phänomens liegt einerseits in der modellierten Technologie Hausisolation, die ohne Endenergieverbrauch modellmässig einen Teil der Wärmenachfrage zu decken vermag bzw. in Wirklichkeit die Wärmenachfrage sinken lässt, andererseits in den ausserordentlich günstigen Wirkungsgraden der Wärmepumpe (Elektrizität/Wärme; die Luft wird als gratis vorausgesetzt) und der Wärme-Kraft-Kopplung in der Industrie.

4.4 Beurteilung

Aufgrund dieser Testläufe ist allgemein festzuhalten, dass das Modell recht schnell auf Änderungen in den Inputdaten reagiert, also nicht grundlegend falsch sein kann. Insbesondere reagiert es schnell auf Energiepreisänderungen und Änderungen in den Unterhalts- und Betriebskosten. Ein Beispiel dazu sei erwähnt: In der Grundversion wurde für alle Endenergiearten mit einer konstanten jährlichen Preissteigerung von 1% gerechnet. Wenn nun gegenüber der Grundversion beim Preis für den flüssigen Brennstoff (Inlandproduktion und Import) mit einer jährlichen Steigerung von 3% gerechnet wird, wirkt sich dies auf die bereits beschriebene Wärmeerzeugung im Haushalt z. B. im Jahr 1994 wie folgt aus (relative Veränderungen gegenüber der Basisberechnung):

- Gasheizung +2,5%
- Kohleheizung +202,2%
- Wärmepumpe +65,8%
- Ölheizung -22,1%

Dabei ist zu bemerken, dass sich bei der Kohleheizung der ursprünglich geringen Bedeutung wegen die Änderung in Prozenten sehr stark auswirkt. Auf den Einsatz der Elektrospeicherheizung und der Holzheizung (bei letzterer werden schon in der Grundversion die vorgegebenen Einsatzrestriktionen erreicht) hat die in dieser Modellrechnung variierte Preisannahme bei den flüssigen Brennstoffen gegenüber der Basisrechnung praktisch keinen Einfluss. Gegen den Planungshorizont hin nimmt übrigens der Anteil der Ölheizung wieder leicht zu, weil die Ausweichheizsysteme teilweise an den oberen Schranken (Umwandlungsmenge und Investition) anstossen.

Auf den Endenergieverbrauch aller Anwendungen wirkt sich die erwähnte Preisänderung wie folgt aus:

- Elektrizität +10,4%
- Gas +5,8%
- Kohle und Koks +192,7%
- flüssige Brennstoffe -53,5%

Mit Ausnahme des hohen Anteils der Kohle, der mit aktiven Schadstoffrestriktionen zweifellos sinken würde, zeigt dieser konstruierte Fall also eine mögliche Lösung für die Ölsubstitution auf.

Mit dem Modell lassen sich natürlich unzählige Beispiele wie in der beschriebenen Art durchrechnen. Allgemein bleibt noch festzuhalten, dass das Modell langsam auf Änderungen in

den Investitionskosten reagiert. Sensitivitätsaussagen über die Wirkungsgrade fehlen zurzeit.

Die Grundversion der Modellanwendung wurde mit den statistischen Daten der letzten Jahre aufgebaut. Deshalb kann es nicht erstaunen, dass auch die optimale (= kostengünstigste) Endenergiezusammensetzung für die ersten Perioden nahe beim Ist-Zustand liegt. Dies zeigt doch auf, dass das Modell die Wirklichkeit recht gut abzubilden vermag.

5. Schlussbetrachtungen

In der Einleitung sind mögliche Fragestellungen an MESSAGE aufgeführt worden. Ohne auf Einzelheiten einzugehen, ist festzuhalten, dass auf solche Fragen mit MESSAGE vernünftige Antworten gegeben werden können.

Auch die Hauptfrage, die zu Beginn der Arbeit gestellt wurde, kann an dieser Stelle positiv beantwortet werden: Das globale Modell MESSAGE lässt sich für ein kleines Energiesystem einsetzen. Einige Punkte sind aber anzufügen.

5.1 Erweiterungen

MESSAGE ist nicht unbedingt anwenderfreundlich (komplizierte Dateneingabe und einige eigentliche Fallen bei Modelländerungen). Damit sich MESSAGE aber weiter einsetzen

lässt, sind einige Erleichterungen für den direkten Anwender unabdingbar.

Das Projekt MESSAGE kann nur teilweise als abgeschlossen betrachtet werden. Das gesteckte Teilziel ist zwar erreicht worden, doch sind Modellerweiterungen nicht nur möglich, sondern geradezu wünschenswert. Im Moment bieten sich die folgenden erfolgversprechenden Hauptstossrichtungen an:

1. Verfeinerung und Erweiterung der Technologien.
Diese Arbeit ist nur mit Hilfe der Industrie (Anbieter von Umwandlungsanlagen) und der Fachverbände (Quervergleiche innerhalb von Branchen) möglich.
2. Erweiterung um eine zweite Stufe, nämlich vom Endverbrauch (als Zwischennachfrage) zum Bruttoverbrauch (als Angebot).
3. Gleichzeitiger Einsatz von oberen und unteren Beschränkungen der Restriktionen und der Variablen.
4. Aufbereitung des Modells und der Modellumgebung (etwa Beschreibungen) für einen nationalen Standardeinsatz.
5. Einsatz eines geeigneten Matrixgenerators als Erleichterung für den Anwender.

5.2 Quervergleiche

Quervergleiche mit anderen Untersuchungen über die zukünftige Ener-

giebedarfsdeckung sind nur bedingt möglich, weil meist ganz bestimmte Fragestellungen unter ganz bestimmten Voraussetzungen beantwortet werden. Deshalb ist es fragwürdig, bestimmte Aussagen ohne detaillierte Kenntnisse der Voraussetzungen zu vergleichen.

5.3 Fazit

Mit der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass sich ein zwar spezielles, aber globales Modell auch für die Schweiz anwenden lässt. Eine erste Untersuchung ist erfolgversprechend durchgeführt worden. Die Werkzeuge sind vorhanden, interessierte Kreise könnten somit im Bedarfsfall, unter Vorbehalt der erwähnten Verbesserungen und Erweiterungen, davon Gebrauch machen.

Literatur

1. Energy Systems Program Group: Energy in a Finite World, A Global System Analysis. Report by the Energy Systems Program Group of the International Institute for Applied Systems Analysis. Häfele W.: Program Leader; Cambridge (Mass.): Ballinger Publishing Company 1981.
2. Rüst L.: MESSAGE - Anwendungsmöglichkeiten eines globalen Energiemodells in der Schweiz (Dissertation). Zürich: Zentralstelle der Studentenschaft 1985.
3. Bundesamt für Energiewirtschaft und Schweizerisches Nationalkomitee der Weltenergiekonferenz: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1982. Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE, Nr. 16/1983, EDMZ 1983.
4. Kall P.: Mathematische Methoden des Operations Research. Stuttgart: Teubner 1976.