

# **Energie und Umwelt als Systemproblem: Die Notwendigkeit für bessere Entscheidungs-Unterstützungs-Systeme**

*Von Alfred Voß*

## **A. Einleitung**

In der Tradition der Vergangenheit ist das Energieproblem vor allem als Versorgungsproblem mit Primärenergie verstanden worden. Noch in den siebziger Jahren, insbesondere nach der ersten Ölpreiskrise, wurden die energiepolitischen Überlegungen von der Endlichkeit der Energiereserven beherrscht. Die Befürchtung, daß der wichtigste Energieträger, nämlich das Mineralöl, bald zu Ende gehen würde, bestimmte die energiepolitischen Programme.

Die Entwicklungen und Ereignisse in den darauffolgenden Jahren, die sich mit Schlagworten wie „Entkopplung von Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum“, „Sanfte Energieversorgung“, „Akzeptanz der Kernenergie“, „Waldsterben“ und „Klimakatastrophe“ kennzeichnen lassen, haben dann aber die Komplexität und Vieldimensionalität dessen, was vereinfachend als das Energieversorgungsproblem angesehen wurde, verdeutlicht. Das Energieproblem ist zu einem Systemproblem geworden. Tragfähige Lösungen sind nur zu gewinnen, wenn die technischen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekte des Energieproblems nicht isoliert voneinander betrachtet, sondern ihre wechselseitigen Beeinflussungen und Abhängigkeiten analysiert und verstanden werden. Dies stellt auch neue Anforderungen an diejenigen, die Entscheidungshilfen für die Energiepolitik und Energiewirtschaft erarbeiten. Die Erstellung von Prognosen des Energiebedarfs und der Bedarfsdeckung ist, wie der folgende Rückblick zeigt, nicht geeignet, diesen neuen Anforderungen gerecht zu werden.

## **B. Energieprognosen — Anspruch und Wirklichkeit**

Es gibt wohl kaum eine Berufsgruppe, deren Ruf in den letzten Jahren so viel Schaden genommen hat, wie die der Prognostiker. Die Energieprognostiker waren dabei leider nicht die berühmte Ausnahme von der Regel. Im Gegenteil, Energieprognosen sind in den letzten Jahren besonders heftig und kontrovers diskutiert und kritisiert worden. Das geringe Vertrauen, das Pro-

gnosen im allgemeinen und Energieprognosen im besonderen genießen, läßt sich an vielen Zitaten und Aussprüchen belegen. So soll z. B. der bekannte Wirtschaftswissenschaftler John Kenneth Galbraith einem Reporter auf die Frage, welche Berufsgruppen die meisten Lügen verbreiten, spontan geantwortet haben: „Die Politiker, die Statistiker, die Theologen und die Prognostiker.“ Über Politik und Statistik wird zumindest indirekt die Rede sein müssen, wenn die Möglichkeiten und Grenzen von Energieprognosen als Entscheidungshilfe diskutiert werden sollen.

Energiepolitisches Handeln ist, ebenso wie jede unternehmerische Entscheidung in der Energiewirtschaft, eingebettet in ein komplexes Spannungsfeld von wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Interessen sowie technischen und ökologischen Randbedingungen. Gerade die Jahre seit der ersten Ölpreiskrise haben uns dies drastisch bewußt gemacht.

Neben der Notwendigkeit der Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflußfaktoren und von konfliktären Zielen, werden die Entscheidungen in der Energiewirtschaft und Energiepolitik aber auch noch dadurch erschwert, daß sie Zeiträume betreffen, die eher in Jahrzehnten als in Jahren zu messen sind. Änderungen der Energieversorgungsstrukturen brauchen im allgemeinen Jahrzehnte, bevor sie wirksam werden. Der Bau eines Kraftwerks dauert etwa 5-10 Jahre. Hinzu kommt, daß diese Anlagen dann noch mehrere Jahrzehnte in Betrieb sind und so die Energieversorgungsstruktur weit in die Zukunft mitbestimmen.

Komplexität und Langfristigkeit und damit natürlich auch Unsicherheit, sind also wesentliche Charakteristika energiewirtschaftlicher und energiepolitischer Entscheidungen. Angesichts der dadurch gegebenen Risiken von Fehlentscheidungen wäre es natürlich aus der Sicht desjenigen, der zu entscheiden hat, ideal, wenn er wüßte, wie die Zukunft aussieht, um dann bei vermeintlicher Kenntnis der Zukunft seine optimale Entscheidung treffen zu können. Aus diesem Grunde ist es nur zu verständlich, daß man mit mehr oder weniger fundierten wissenschaftlichen Methoden, aufbauend auf eine Analyse der Vergangenheit und Gegenwart, die Zukunft vorherzusagen, also zu prognostizieren versucht, um dann, ausgehend von dieser vermeintlichen Kenntnis der Zukunft, optimale Entscheidungen treffen zu können.

Daß Prognosen aber genau diesem Anspruch, die Zukunft vorherzusagen, nicht gerecht werden konnten und wohl auch in Zukunft nicht gerecht werden können, sei vereinfachend durch eine Gegenüberstellung der prognostizierten Primärenergieverbräuche mit der tatsächlich eingetretenen Entwicklung demonstriert.

In Abb. 1 sind die Prognosen über die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland, die in den Jahren 1955 bis 1972 erstellt worden sind, der tatsächlichen Entwicklung gegenübergestellt. Die Zahlen an den Kurven geben dabei jeweils das Erscheinungsjahr der Prognose an. Die in den 50ziger und zu Beginn der 60ziger Jahre veröffent-

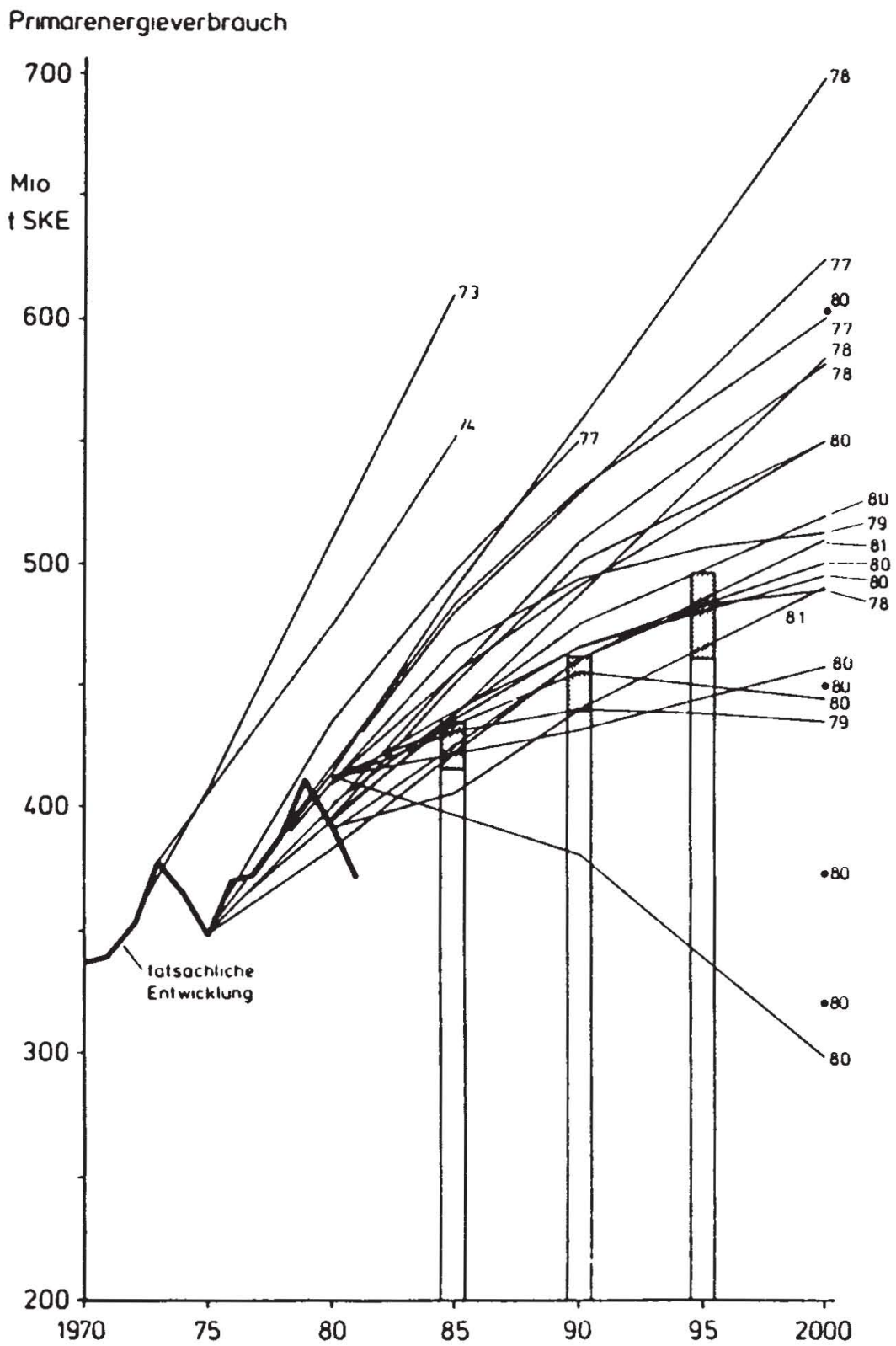


Abb. 1: Energieprognosen aus den Jahren 1955-1972

lichten Vorhersagen haben das zukünftige Wachstum des Primärenergieverbrauchs systematisch unterschätzt, während die Prognosen aus den späten 60ziger und zu Beginn der 70ziger Jahre die sogenannte erste Ölkrise und die durch sie ausgelöste wirtschaftliche Rezession nicht voraussagen konnten und somit zu überhöhten Verbrauchsschätzungen führten.

Die Abb. 2 zeigt nun die Energieverbrauchsentwicklung, wie sie von verschiedenen Prognostikern nach der sogenannten Ölkrise des Jahres 1973 vorausgesagt wurde. Aus dieser Abbildung ist unschwer erkennbar, daß auch diesen Prognosen oder Szenarien kein größerer Erfolg im Sinne einer Vorhersage der Zukunft beschieden sein wird, denn sonst dürften derartig große Abweichungen für das Jahr 2000 nicht auftreten.

Zur Ehrenrettung derjenigen die sich mit Aussagen über die Zukunft der Energieversorgung befassen ist hier anzumerken, daß einige der in Abb. 2 aufgeführten Zukunftsentwicklungen keine Prognosen, sondern Szenarien, also alternative Zukunftsentwicklungen, darstellen. Hierauf ist später noch zurückzukommen.

Der Blick zurück zeigt, daß Prognosen nicht nur Krisen oder unerwartete Ereignisse, wie zum Beispiel die drastische Ölpreissteigerung in den Jahren 1973 und 1979/80 nicht vorhersagen konnten, sondern daß selbst in Zeiten kontinuierlicher Entwicklung auch über kurze Zeiträume hinweg es nicht gelang, den Energieverbrauch richtig zu prognostizieren.

Die Gegenüberstellung der verschiedenen Energieprognosen — wobei diese nur exemplarisch für alle Voraussagen stehen sollen — macht deutlich, daß das Unterfangen, die Zukunft, verstanden als die tatsächlich eintretende Entwicklung, quantitativ exakt vorherzusagen, nicht möglich war, wobei gelegentliche Treffer wohl rein statistisch begründet sind. Natürlich kann man für jede einzelne Prognose im nachhinein aufzeigen, warum sie daneben gelegen hat, z. B. weil das Wirtschaftswachstum geringer war als unterstellt oder weil die Energiepreise stärker gestiegen sind als angenommen. Aber dies nützt natürlich dem Entscheidungsträger wenig, der seine Entscheidung aufgrund der Prognose ja bereits getroffen hat.

Ohne hier in eine tiefergehende Diskussion über die Grenzen der Prognosen eintreten zu wollen, sei nur angemerkt, daß es gerade der einer Prognose zugrundeliegende Anspruch, die Zukunft vorhersehen zu können, ist, der suspekt erscheint. Denn dieser Anspruch unterstellt, daß Zukunft etwas ist, was quasi hinter der nächsten Bergkette bereits vorgefertigt vor uns liegt, auf das wir also keinen Einfluß haben. Des weiteren suggeriert ein derartiger Anspruch für den Energieplaner eine Gewißheit, die, wie die Vergangenheit gezeigt hat, nicht vorhanden ist. Daß Zukunft in diesem Sinne nicht vorhersehbar ist, hängt ja, gerade damit zusammen, daß Zukunft in einem gewissen Sinne offen ist und von uns mitgestaltet werden kann.

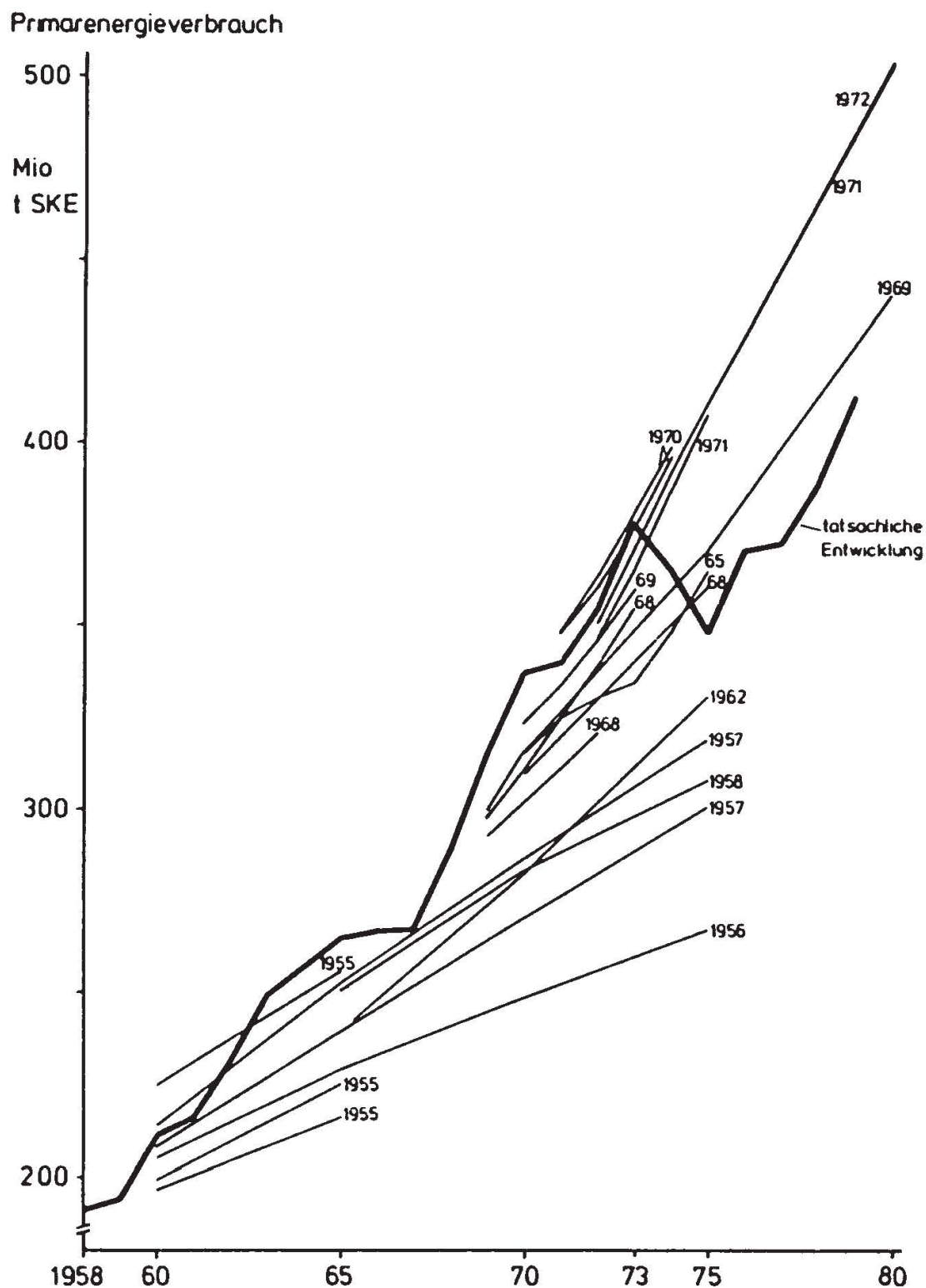


Abb. 2: Energieprognosen aus den Jahren 1973-1981

Einige der Energieprognostiker und Energieplaner haben versucht, der zunehmenden Unsicherheit dadurch Rechnung zu tragen, daß sie bedingte Prognosen und in jüngster Zeit Szenarien, d. h. Entwürfe denkbarer Zukünfte, erstellt haben. Dabei werden unterschiedliche Annahmen über die Entwicklung der unsicheren Parameter z. B. der Energiepreise getroffen und dann wird aufgezeigt, welche Entwicklungen eintreten werden. Damit wird die Prognoseverbindlichkeit der Aussagen reduziert.

Ob diese Vorgehensweise, dem Entscheidungsträger mögliche unterschiedliche Entwicklungen des Energiebedarfs und der Energieversorgung aufzuzeigen und ihn mit der Entscheidung, wie diese untereinander zu bewerten sind, allein zu lassen, wirklich weiterhilft, ist zu bezweifeln.

Versucht man eine erste Konsequenz aus dem bisher Gesagten zu ziehen, so kann diese doch nur lauten, daß die Erstellung von Energieprognosen, verstanden als Vorhersage der tatsächlich eintretenden Entwicklungen, ein wenig nützliches Unterfangen ist, da Zukunft in diesem Sinne nicht prognostizierbar ist.

Diese Feststellung ist für denjenigen, der Informationen über die Zukunft für seine Entscheidungsfindung benötigt, natürlich wenig tröstlich und er wird zu Recht fragen, was denn an die Stelle von Prognosen und Szenarien zu setzen ist? Bevor auf diese Frage eine Antwort gegeben wird, scheint es notwendig, sich zunächst einmal zu fragen, warum wir uns denn mit der Zukunft beschäftigen und vor allem, was wir mit dem Wissen über die Zukunft anfangen wollen?

Wozu also brauchen wir im Bereich der Energiewirtschaft und Energiepolitik Informationen über die Zukunft? Die Antwort hierauf lautet, um unsere heutigen Entscheidungen auf eine rationalere Basis zu stellen, wobei die Betonung auf heutigen liegt. In diesem Sinne ist es dann doch kein sinnvolles Ziel herausfinden zu wollen, wieviel Kraftwerke im Jahre 2030 installiert sein werden, oder wieviel Öl wir im Jahre 2010 noch verbrauchen, denn exakte Zahlenangaben darüber sind in der Regel für die heute zu treffenden Entscheidungen nicht erforderlich und wie zuvor erläutert, wohl auch nicht zu gewinnen. Übertragen auf das Kraftwerksbeispiel heißt dies, ob im Jahr 2030 100 GW oder 110 GW an Kraftwerksleistung installiert sein wird, ist für die Entscheidung, heute ein neues Kraftwerk in Auftrag zu geben, ohne Belang. Deshalb macht es auch wenig Sinn, darüber zu diskutieren, welche der beiden für das Jahr 2030 prognostizierten Kraftwerksleistungen realistischer ist.

Oder anders formuliert, wir sollten uns mit der Zukunft beschäftigen, um unter Berücksichtigung der Unsicherheiten die heute zu treffenden Entscheidungen so abzusichern, daß sie zu einem späteren Zeitpunkt nicht zu bereuen sein werden.

Im Unterschied zu Prognosen oder Szenarien sei der Versuch, komplexe, weit in die Zukunft reichende Entwicklungen hinsichtlich ihrer Gestaltungs-

und Beeinflussungsmöglichkeiten zu analysieren, um Rückschlüsse auf die heute zu treffenden Entscheidungen zu ziehen, als „systematische Zukunftsanalyse“ bezeichnet. Dabei wird weder die Vergangenheit fort-, noch die Zukunft normativ festgeschrieben, sondern unter Berücksichtigung der vielfältigen Unsicherheiten werden mögliche zukünftige Entwicklungen der Energieversorgung analysiert, um Handlungsnotwendigkeiten abzuleiten und um Handlungsspielräume aufzuzeigen.

Ein wesentlicher Teil einer derartigen systematischen Zukunftsanalyse ist dabei die Identifizierung sogenannter „robuster“ nächster Schritte, worunter diejenigen Entscheidungen zu verstehen sind, die sich über einen weiten Unsicherheitsbereich der Einflußfaktoren, wie z. B. der Energiepreisentwicklung, heute als notwendig und richtig erweisen. Robuste Entscheidungen zeichnen sich damit gerade dadurch aus, daß sie einer genauen Kenntnis der Zukunft nicht bedürfen, sondern für ein weites Spektrum der Entwicklung wichtiger Bestimmungsfaktoren immer richtig sind. Im Sinne einer brauchbaren Entscheidungshilfe besteht dann eine weitere wesentliche Aufgabe einer derartigen systematischen Zukunftsanalyse darin, aufzuzeigen, warum denkbare alternative Entscheidungen bzw. Maßnahmen eben nicht robust sind. Dem Entscheidungsträger sollen damit die Risiken seiner Entscheidung bewußter und damit bewertbarer gemacht werden.

Eine weitere wichtige Aufgabe einer „systematischen Zukunftsanalyse“ besteht darin, die Konsequenzen, die Vor- und Nachteile von Entscheidungs- und Handlungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Erreichung energiepolitischer und energiewirtschaftlicher Ziele aufzuzeigen. Hierzu gehört z. B. die Erarbeitung von Trade-offs zwischen den unterschiedlichen energiepolitischen Zielen wie Preisgünstigkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit, oder auch die Analyse effizienter Wege und Strategien zur Minderung der energiebedingten Umweltbelastungen.

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

### **C. Energiemodelle zur Erarbeitung von Entscheidungshilfen**

Die Anfänge der Energiemodellentwicklung gehen zurück in die sechziger Jahre, obwohl es das in den siebziger Jahren ins Zentrum des öffentlichen

Interesses tretende Energieproblem war, das der Entwicklung von Energiemodellen neue Impulse gab.

Die Energiemodelle, die in den sechziger Jahren entwickelt wurden, befaßten sich vornehmlich mit dem Bedarf und der Versorgung oder der Erzeugung einzelner Energieträger, wie Elektrizität, Öl oder Erdgas. Von den Ölfirmen wurden in diesem Zusammenhang große Allokationsmodelle für die Optimierung des Öltransports und für den Betrieb und die Auslegung von Raffinerien entwickelt. Ein anderes Beispiel für die erfolgreiche Anwendung von sektoralen, d. h. energieträgerspezifischen Modellen sind die Modelle, die im Bereich der Elektrizitätswirtschaft zur Betriebsoptimierung und zur langfristigen Kapazitätsausbauplanung benutzt wurden und werden.

Beide zuvor erwähnten Modelltypen haben ihren Schwerpunkt auf der Versorgungsseite, d. h. sie beantworten Fragen nach dem besten Weg, eine vorgegebene Energienachfrage zu decken. Die Entwicklung der Energieträgernachfrage ist ein exogen vorgegebener Input für diese Modelle. Sie wurde oftmals mit Hilfe von ökonometrischen Energiebedarfsmodellen geschätzt, in denen die Energienachfrage eine Funktion der Energiepreise, der Bevölkerungsentwicklung, des Wirtschaftswachstums oder anderer Bestimmungsfaktoren ist.

Ein wesentlicher Kritikpunkt, der gegen diese sektoralen oder Einzelenergieträger-Modelle vorgebracht wurde, ist, daß sie die Entwicklung des jeweiligen Sektors oder Energieträgers nur isoliert von den Entwicklungen in den anderen Bereichen des Energiesystems und der Volkswirtschaft beschreiben. Sie sind deshalb nicht in der Lage, die Substitutionsvorgänge zwischen den Energieträgern in den verschiedenen, Energie einsetzenden Sektoren zu erfassen.

Genau diese Anforderung der konsistenten Beschreibung der „interfuel substitution“ führte in den siebziger Jahren zur Entwicklung der Energiesystem-Modelle, die den gesamten Bereich von der Gewinnung der Primärenergie, ihre Umwandlung, den Transport und die Verteilung der Sekundärenergieträger sowie ihren Einsatz in den Sektoren private Haushalte, Kleinverbraucher, Industrie und Verkehr zur Deckung des Bedarfs an Raum- und Prozeßwärme, an Transportarbeit oder an Licht und Kraft abbilden.

Die meisten der Energiesystemmodelle benutzen eine Netzwerkabbildung des Energiesystems, um im einfachsten Fall die Konsequenzen unterschiedlicher sektoraler Bedarfsentwicklungen und Energieträger-Substitutionsprozesse auf den Primärenergieverbrauch oder den Ausbau von Umwandlungsanlagen, z. B. von Kraftwerken, zu ermitteln. Neben Simulationsmodellen wurden in der Vergangenheit auch Modelle entwickelt, die einen Optimierungsansatz benutzen. Diese Modelle des gesamten Energiesystems, die entweder statisch oder quasi-dynamisch sind, eignen sich im besonderen Maße, entsprechend einer vorgegebenen Zielfunktion die optimale Nutzung der Energieressourcen und den optimalen Ausbau von Energieumwandlungs-



Energietransport- und Energienutzungsanlagen unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen, z.B. hinsichtlich der Umweltbelastung oder energiepolitischer Randbedingungen, zu ermitteln. Besonders fortgeschrittene Modelle dieses Typs erfassen dabei sowohl die Substitutionsprozesse auf der Endverbraucherseite, z.B. zwischen verschiedenen Raumheizungssystemen in den privaten Haushalten, als auch die Preiselastizität der Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsnachfrage, worunter z.B. die Nachfrage nach Personenbeförderungsleistung zu verstehen ist. Des weiteren erlauben sie die Quantifizierung der energiebedingten Umweltbelastungen sowie die Analyse von Maßnahmen zur Minderung von Umweltauswirkungen. Derartige Modelle des gesamten Energiesystems enthalten eine Fülle energietechnischer Details, d.h. eine Vielzahl von Energiegewinnungs-, umwandlungs-, -transport- und Endbenutzertechnologien, die durch ihre technischen und ökonomischen Daten sowie ihre umweltseitigen Wirkungen charakterisiert sind.

Eine weitere Kategorie von Energiemodellen zielt auf die Abbildung der Wechselwirkungen zwischen dem Energiesektor und der übrigen Volkswirtschaft ab. Dabei ist die im Rahmen des Wirtschaftsgeschehens nachgefragte Energie ein Produktionsfaktor, der im Substitutionswettbewerb mit den anderen Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit steht. Ihren Ursprung haben diese Modelle in der makro-ökonomischen Modellbildung, wobei ein wesentliches Charakteristikum die Verwendung von Verhaltensgleichungen, z.B. Produktions- oder Konsumfunktionen, zur Beschreibung der vielen Einzelentscheidungen auf der Konsumenten- und Produzentenseite ist.

Mit den derzeit verfügbaren Energiemodellen, die sicher noch in Teilbereichen verbesserungs- und erweiterungsbedürftig sind, stehen Hilfsmittel zur Verfügung, die geeignet sind, fundierte Entscheidungshilfen für die Energiepolitik und Energiewirtschaft zu erarbeiten. Die Anwendung komplexer Energiemodelle bringt aber nur dann einen wirklichen Nutzen und rechtfertigt den damit verbundenen Aufwand, wenn sie nicht, wie in der Vergangenheit, auf die Erstellung von Prognosen und Szenarien, sondern auf das Ziel der Erarbeitung rational begründbarer Entscheidungshilfen ausgerichtet ist und dabei auf einer ganzheitlichen Problemerkennung aufbaut sowie Unsicherheiten mit einbezieht. Im folgenden seien einige Beispiele für eine derartig entscheidungsorientierte Nutzung von Energiemodellen erläutert.

#### **D. Energie für den Verkehr**

Als erstes Beispiel sei Bezug genommen auf eine modellgestützte systemanalytische Untersuchung des Verkehrssektors und seiner Versorgung mit Energie. Ziel der Untersuchung war es, die Energieversorgung des Verkehrssektors und in diesem Zusammenhang die Rolle alternativer Kraftstoffe unter expliziter Berücksichtigung der wechselseitigen Einflüsse zwischen dem Sektor Verkehr, der Wirtschaftsentwicklung und der Energieversorgung zu analy-

sieren. Aufbauend auf einer Erfassung der komplexen Zusammenhänge und unter Berücksichtigung der vielfältigen Unsicherheiten, z. B. hinsichtlich der Entwicklung der Ölpreise, sollten denkbare und plausible Zukünfte systematisch analysiert werden, um daraus Informationen und Hilfen für die Entscheidungen in der Mineralöl- und Automobilindustrie abzuleiten.

Für die quantitative Analyse zukünftiger Entwicklungen des Systems „Wirtschaft — Energie — Verkehr“ wurde ein Modellsystem genutzt, das in einem Wirtschafts- und Bevölkerungsmodul die wesentlichen Determinanten zur Ermittlung der Güter- und Personenverkehrsleistung und in einem Energiemodell die zur Befriedigung der Verkehrsleistung einsetzbaren Verkehrssysteme sowie die Bereitstellung der dafür notwendigen Kraftstoffe und Energieträger durch das Energieversorgungssystem beschreibt.

Um im Rahmen der Untersuchungen unterschiedlichen gesellschaftlichen, energie- und verkehrspolitischen Zielvorstellungen sowie der Unsicherheit wichtiger Einflußfaktoren, wie z. B. der Ölpreisentwicklung, gerecht zu werden, wurden drei Szenarien entworfen, die in sich konsistente aber alternative Entwicklungen des Systems „Wirtschaft — Energie — Verkehr“ darstellen. Die Szenarien repräsentieren unterschiedliche gesellschaftliche Wertvorstellungen, beschreiben unterschiedliche Entwicklungen des Wirtschaftssystems und weisen bezüglich der Energiepreisentwicklung eine Spannweite auf, die von real konstanten Ölpreisen auf dem Niveau von 1980 bis zu einem Anstieg auf –130 \$/bbl im Jahr 2010 reicht. Damit sollte der Unsicherheit der für den Verkehrs- und Energiesektor wichtigen Bestimmungsfaktoren Rechnung getragen werden.

Die Abb. 3 zeigt exemplarisch für die Ergebnisse der modellgestützten Analysen, die Entwicklungstendenzen des Endenergieverbrauchs der PKW nach Kraftstoffen in den drei Szenarien. Trotz der großen Bandbreite wichtiger Bestimmungsfaktoren für die Verkehrsleistung und den Energieverbrauch, die den Szenarien zugrunde liegt, lassen sich einige wichtige gemeinsame Entwicklungstendenzen erkennen. In allen Szenarien geht der Energieverbrauch des Personenindividualverkehrs deutlich zurück. Das Benzin verliert seine dominierende Rolle als Kraftstoff. Auch bei einer für das Benzin insgesamt günstigeren Rohölpreisentwicklung (moderat steigende Rohölpreise), wie sie der Preissensitivität zum Referenzszenario zugrunde liegt, ergeben sich erhebliche Marktanteilsverluste. In allen Szenarien nimmt dagegen der Marktanteil von mit Diesel betriebenen PKW zu. Von den alternativen Kraftstoffen (Methanol, Wasserstoff, CNG, Ethanol und Elektrizität) hat nur das Methanol Marktchancen und zwar dann, wenn die Ölpreise erheblich steigen.

Ähnlich wie für den Kraftstoffbereich ließen sich auch für den Bereich der Mineralölverarbeitung robuste Entwicklungstrends aufzeigen. Die Ergebnisse dieser modellgestützten Zukunftsanalyse zeigten, daß auch bei Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung wichtiger Bestimmungsfaktoren und Rand-

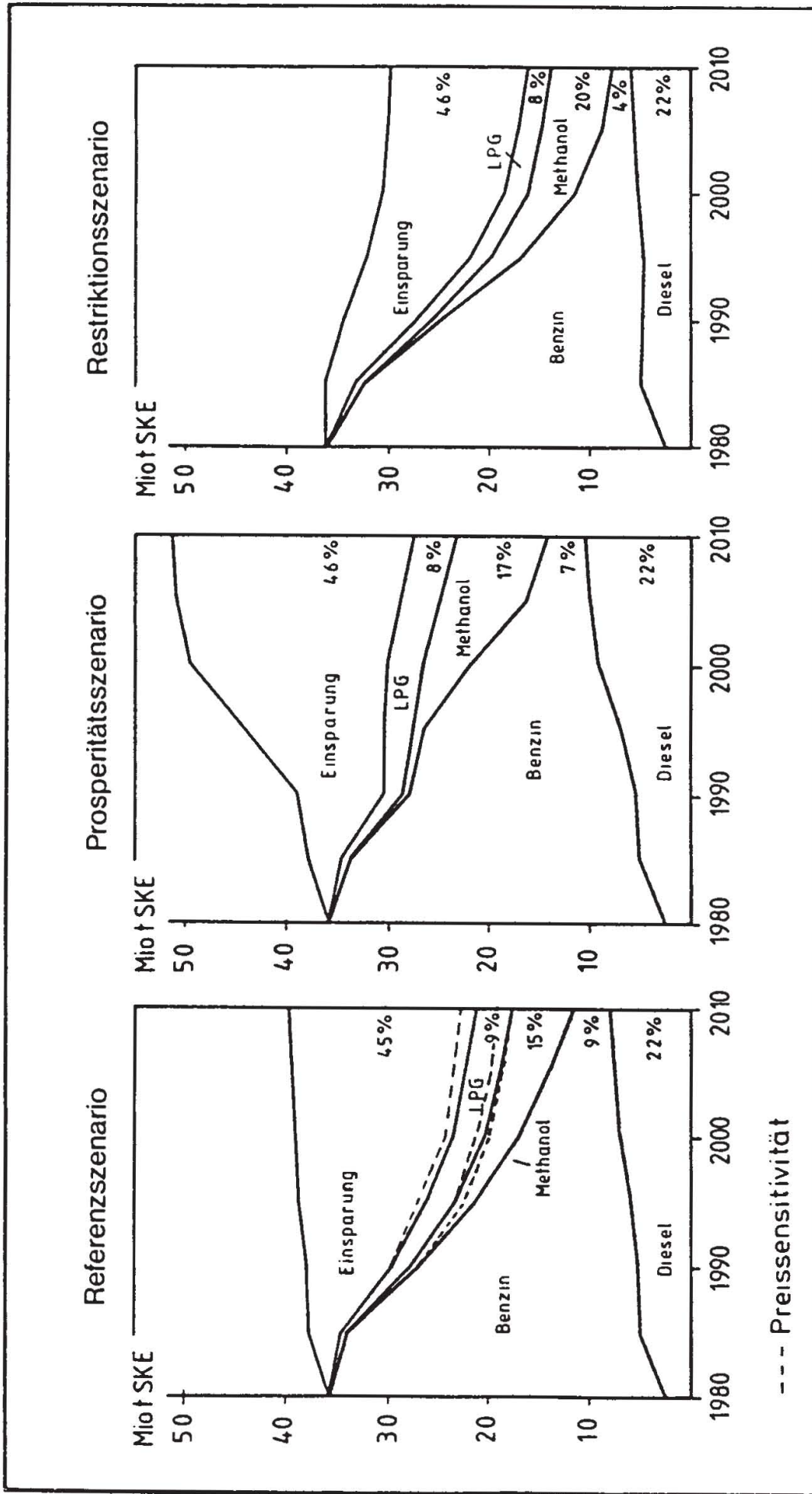


Abb. 3: Endenergieverbrauch der PKW

bedingungen die Identifizierung robuster Entscheidungen möglich ist. Dies ist eine für die Erarbeitung von Hilfen zur Fundierung komplexer Entscheidungen wichtige Feststellung.

### **E. Minderung der Umweltbelastung durch Energienutzung**

Als zweites Beispiel zur Verdeutlichung der Möglichkeiten von Energiemodellen im Rahmen der Erarbeitung von Entscheidungshilfen sei hier der Problembereich der Umweltbelastung durch Energienutzung ausgewählt.

Die Gewinnung, Umwandlung und Nutzung von Energie ist die Hauptquelle der Luftbelastung. Die Freisetzung von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}_2$  ist dabei zu mehr als 90% auf die Umsetzung von Energie in stationären Anlagen und im Verkehrssektor zurückzuführen.  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  wurden und werden, neben den flüchtigen organischen Verbindungen, als Verursacher der neuartigen Waldschäden angesehen, obwohl eindeutige Erkenntnisse über die Dosis-Wirkungsbeziehungen noch nicht vorliegen.  $\text{CO}_2$  gilt als das wichtigste anthropogen freigesetzte Treibhausgas. Auch bezüglich der Wirkungen von Treibhausgasemissionen auf das Klima und die daraus resultierenden Konsequenzen bestehen heute noch wesentliche Wissenslücken.

Angesichts der bestehenden Wissensdefizite über die Umweltwirkungen der durch Energienutzung freigesetzten Luftschadstoffe und der Tatsache, daß eine drastische Reduzierung der Emissionen mit erheblichen Kosten verbunden ist, gibt es natürlich unterschiedliche Auffassungen über die Handlungsnotwendigkeiten und den Umfang der notwendigen Emissionsminderungen.

Modellgestützte Analysen können die bestehenden Unsicherheiten über das notwendige Ausmaß der Emissionsminderung nicht beseitigen, sie können aber dennoch einen wichtigen Beitrag zu einer effizienten Luftreinhaltepolitik leisten. Dieser besteht in der Identifizierung kosteneffizienter Minderungsstrategien, worunter die Luftreinhaltemaßnahmen zu verstehen sind, die vorgegebene Emissionsminderungsziele mit dem geringsten Kostenaufwand für die Emissionsminderungsmaßnahmen erreichen.

Als methodischer Ansatz zur Ermittlung kosteneffizienter Minderungsstrategien bietet sich die Kosten-Wirksamkeits- oder Kosten-Effektivitäts-Analyse an. Sie basiert auf der Untersuchung der Emissionsminderung einzelner Emissionsminderungsmaßnahmen und den damit verbundenen Kosten und kombiniert sie dergestalt, daß Emissionsminderungen mit dem geringsten Kostenaufwand erreicht werden. In Anbetracht der Vielzahl von energiebedingten Emissionsquellen sowie der verschiedenen verfügbaren Minderungstechniken sind Energiemodelle, die ein entsprechendes Umweltmodul integriert haben, ein geeignetes, Konsistenz sicherndes Instrumentarium für derartige Kosten-Effektivitäts-Analysen. Ein wesentliches Ergebnis sind Ko-

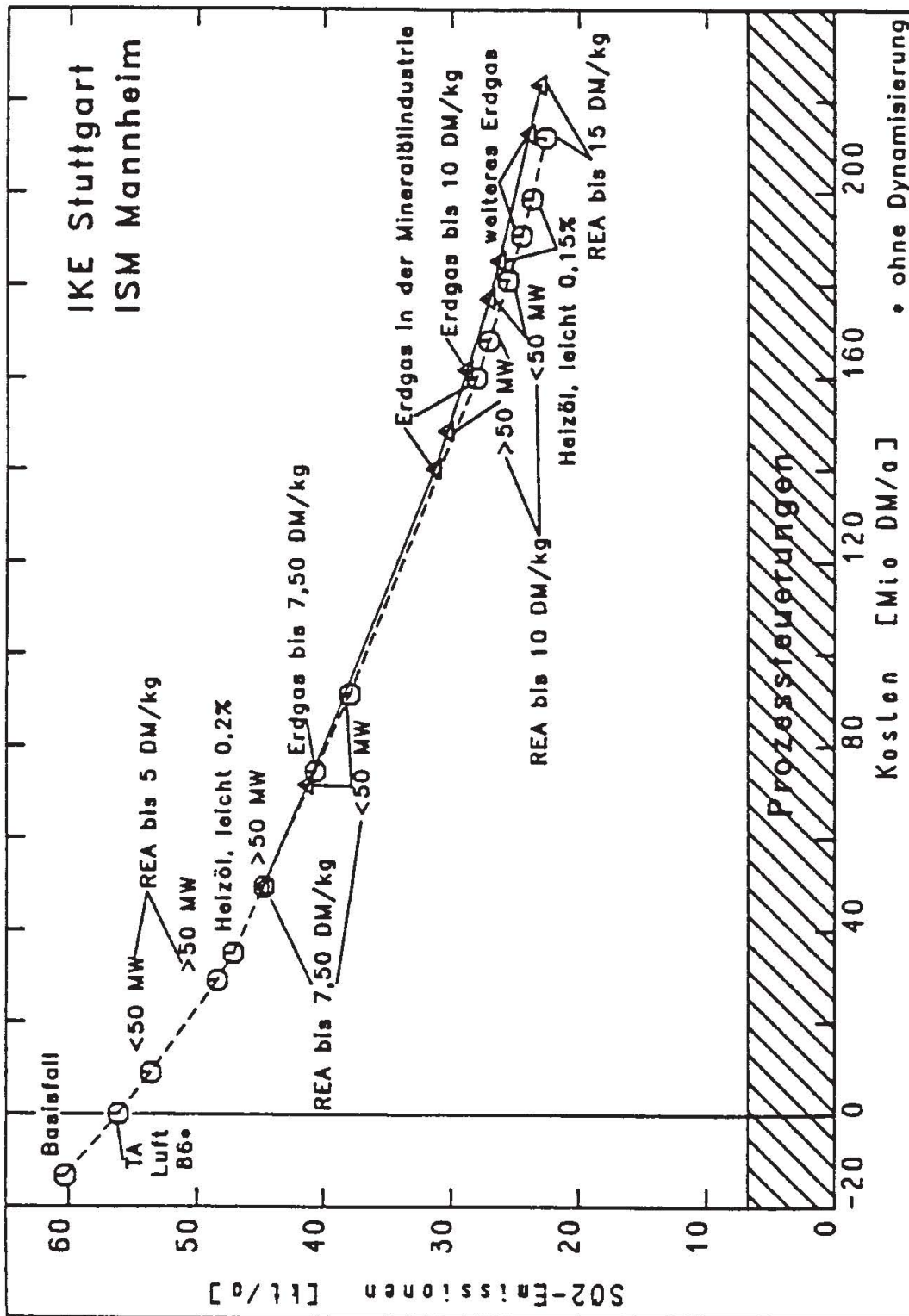


Abb. 4: Kostenfunktion der Minderung der SO<sub>2</sub>-Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg

stentfunktionen der Schadstoffminderung, die in Abhängigkeit von den Minderungskosten die maximal erreichbaren Emissionsminderungen effizienter Luftreinhaltestrategien beschreiben.

Abb. 4 zeigt eine derartige Kostenfunktion für die Minderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg. Jeder Punkt der Kostenkurve repräsentiert eine Vielzahl von Emissionsminderungsmaßnahmen, die in ihrer Summe das optimale Maßnahmenbündel zur Erreichung der jeweiligen Emissionsminderung bilden.

Für die Minderung von  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind in Abb. 5 für ausgewählte Grenzkosten der Kostenfunktion die entsprechenden Minderungsmaßnahmen dargestellt. Die Darstellung läßt erkennen, daß sich mit steigenden Grenzkosten der Emissionsminderung das optimale Maßnahmenbündel verändert.

Auch für die gerade in den letzten Jahren zunehmend bedeutsamer gewordenen Überlegungen zur Minderung von Treibhausgasemissionen können energiemodellgestützte Kosten-Effektivitäts-Analysen wesentliche Entscheidungshilfen geben. In Abb. 6 ist das Ergebnis einer modellgestützten Kosten-Effektivitäts-Analyse zur Minderung der energiebedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer) dargestellt.

Hiernach ließe sich bei einer Kostenentlastung der Volkswirtschaft von rund 4,8 Mrd/a gegenüber der Trendentwicklung durch Ausschöpfung kosteneffizienter  $\text{CO}_2$ -Minderungsmaßnahmen im Jahr 2005 eine  $\text{CO}_2$ -Minderung um 30% gegenüber 1987 erreichen.

## F. Schlußbemerkungen

Die vorangegangenen Ausführungen sollten deutlich machen, daß trotz der bestehenden Unsicherheiten und Wissensdefizite, die sachgerechte Anwendung von Energiemodellen brauchbare Hilfen für die im Bereich der Energiewirtschaft und Energiepolitik anstehenden Entscheidungen bereitstellen kann. Dabei ist die Erstellung von „Prognosen“ im eigentlichen Sinne des Wortes wenig hilfreich, sondern es müssen unter expliziter Berücksichtigung von Unsicherheit alternative Entwicklungen des Energiesystems analysiert werden, um diejenigen Entscheidungen und Maßnahmen zu identifizieren, die heute zur Sicherung einer kostengünstigen und umweltverträglichen Energieversorgung einzuleiten sind. Eine derartige systematische Zukunftsanalyse kann dabei weder Patentrezepte liefern, noch kann sie dem Entscheidungsträger das Abwägen von Nutzen und Risiko abnehmen. Sie kann aber dazu beitragen, die Entscheidungen auf eine rationalere Basis zu stellen und Vorsorge bezüglich der Ungewißheit in der Zukunft zu treffen. Die Zukunft wird dann sicher immer noch Überraschungen bringen, vielleicht aber zunehmend solche, die bereits heute schon in Erwägung gezogen worden sind.

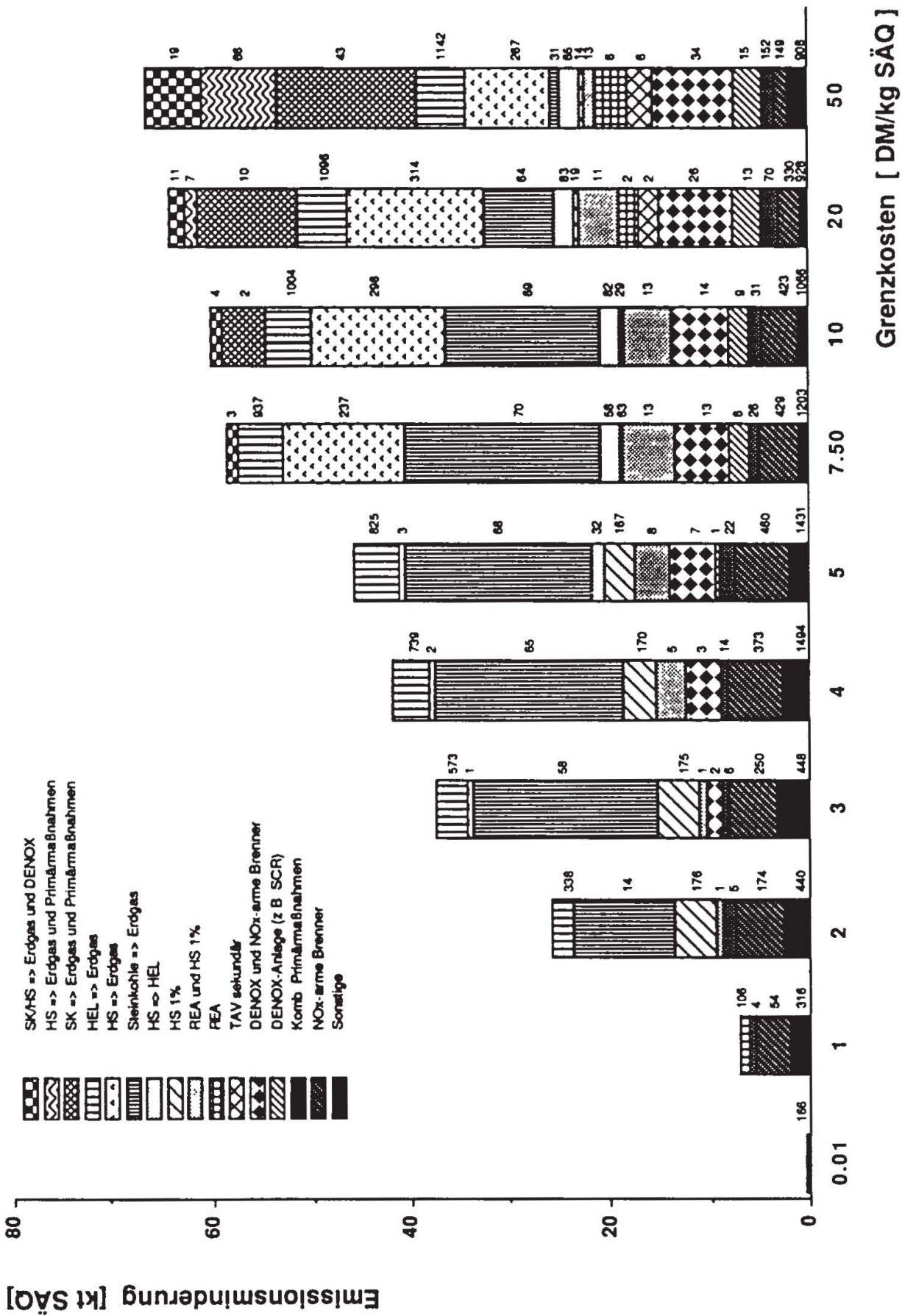


Abb. 5: Optimale SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Minderungsmaßnahmen bei den genehmigungs bedürftigen Feuerungsanlagen für ausgewählte Grenzkosten

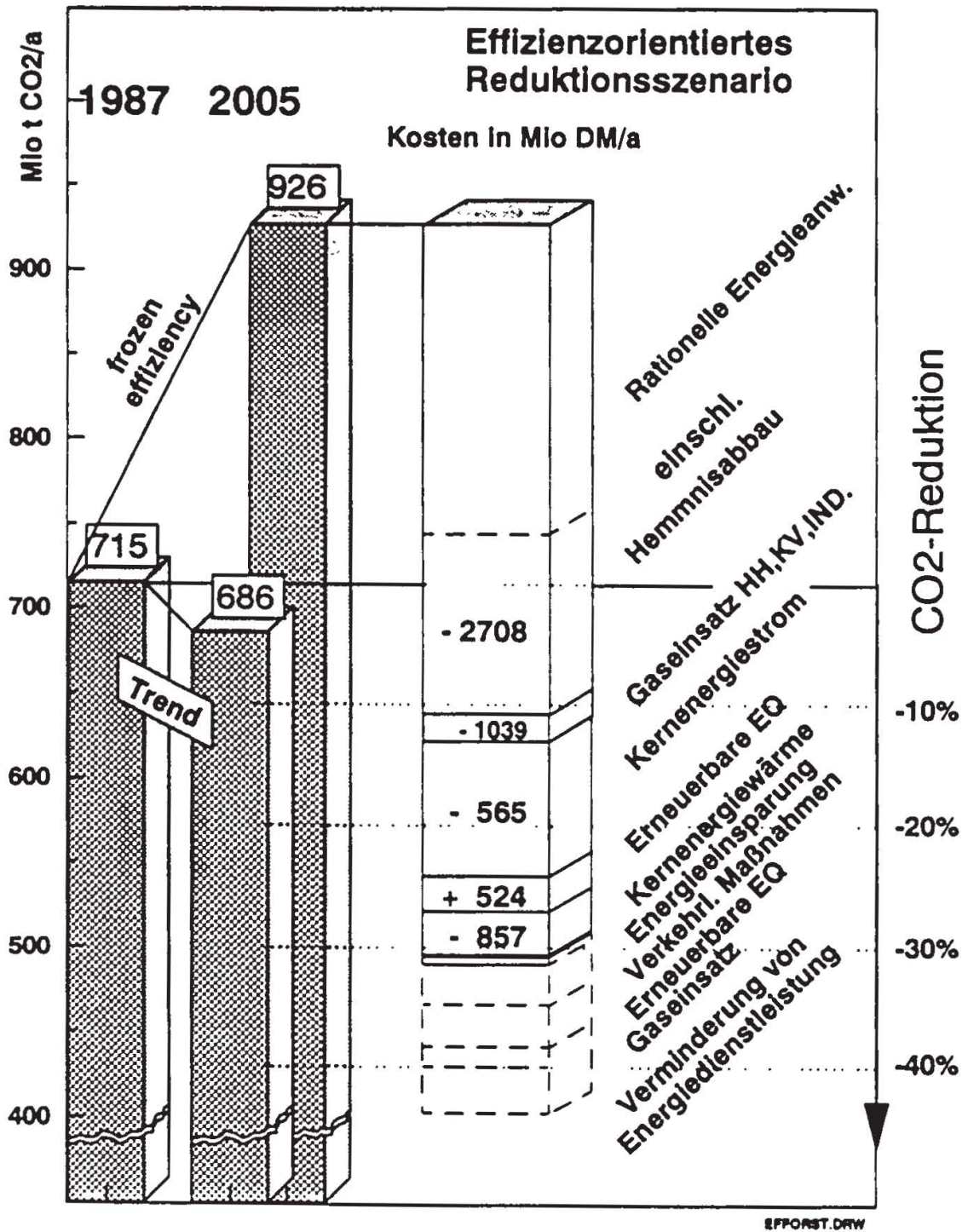


Abb. 6: Effizienzorientiertes Maßnahmenbündel zur CO<sub>2</sub>-Minderung



### Literatur

- Voß, Alfred*: Möglichkeiten und Grenzen von Energieprognosen, in *Existenzfrage Energie*; Econ Verlag, Dusseldorf, 1980.
- Voß, Alfred*: Nutzen und Grenzen von Energiemodellen — einige grundsätzliche Überlegungen, in: *Angewandte Systemanalyse*, Heft 3, 1982, S. 111ff.
- von Kortzfleisch, Gert; Voß, Alfred*: Energie für den Verkehr, Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie e.v. (VDA), Nr. 42, 1984.
- Voß, Alfred; von Kortzfleisch, Gert*: Maßnahmen und Investitionen der EVU in Baden-Württemberg zur Minderung von SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen. Resultate systemanalytischer Studien, in: *Waldschaden: Theorie u. Praxis auf der Suche nach Antworten*, R. Oldenbourg Verlag, München, 1985.
- Bericht der Arbeitsgruppe „Wirtschaftliche Entwicklung — Umwelt — Industrielle Produktion“, Staatsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, 1986.
- Voß, Alfred*: Energie und Klima — Ist eine klimaverträgliche Energieversorgung erreichbar?, in *Brennstoff — Wärme — Kraft (BWK)*, Heft 1/2, 1991, S. 19ff.